

RELAZIONI PRESENTATE

Mobile laser scanning lungo i fronti veneziani del Canal Grande

Andrea Adami (*), Caterina Balletti (*), Francesco Guerra (*),
Simone Orlandini (**), Paolo Vernier (*)

(*) Università Iuav di Venezia, Sistema dei Laboratori, Laboratorio di Fotogrammetria
aadami@iuav.it, balletti@iuav.it, guerra2@iuav.it, vernier@iuav.it
(**) Microgeo S.r.l., simone@microgeo.it

Riassunto

Il Canal Grande è senza dubbio la principale via d'acqua di Venezia e deve la sua importanza sia al fatto che attraversa tutta la città lagunare, sia agli scambi commerciali che ospitava. Come tale è oggetto di numerosi studi storico-artistico-conservativi che però mettono in luce le difficoltà legate al rilievo e analisi di un edifici "sull'acqua".

L'Università Iuav di Venezia in collaborazione con Riegl e Microgeo, ha progettato e realizzato la scansione di tutti i prospetti dei palazzi attraverso un sistema di acquisizione integrato (laser scanner, fotogrammetria e GPS inerziale) da natante, ottenendo quindi un punto di vista assolutamente nuovo e particolarmente adatto al rilievo degli edifici.

L'acquisizione è avvenuta con il sistema di scansione Riegl VMX-250, costituito dallo scanner rotativo VQ250, da un sistema inerziale INS e da un sistema di ripresa delle immagini tramite fotocamere o videocamere. Il sistema ha una frequenza di misura di 300.000 mis/sec ottenuta con uno scanner rotativo a 360° per una completa copertura. Inoltre il sistema utilizza l'ultima generazione dei laser scanner che consente una superiore qualità, completezza e densità del dato, ottenuta con la consolidata tecnica Riegl di misura della completa forma d'onda del segnale laser (FULL WAVE FORM), già utilizzata negli scanner aviotrasportati e ora introdotta anche nelle scansioni in movimento "terrestri". Ciò consente di superare molte delle zone di ombra dovute alla vegetazione o agli oggetti in movimento.

La grande quantità di dati acquisita è stata elaborata e georeferenziata nel sistema cartografico ed ora costituisce un database di grande importanza per ricavare i prospetti degli edifici e per affrontare altri temi legati alla diagnostica.

Abstract

The Grand Canal is certainly the main waterway of Venice, and it owes its importance to the fact that crosses the lagoon city. Moreover it was important as the seat of trade for Venice. For these reasons there are a lot of studies about the Grand Canal and its architectural heritage, but there are some difficulties connected with buildings that "grow on the water".

The University Iuav, in collaboration with Riegl and Microgeo, has designed to scan all the facades of the palaces by an acquisition system (laser scanners, photogrammetry and GPS inertial) mounted on a boat, thus obtaining a point of view totally new and particularly suited to the survey of important buildings.

The acquisition was made with the scanning system Riegl VMX-250, consisting of the rotary scanner VQ250, an INS inertial system and a system recovery using images of cameras or camcorders. The system has a measuring frequency of 300,000 pts/sec obtained with a scanner rotating at 360 degrees for complete coverage. Moreover, the system uses the latest generation of laser scanner that allows a higher quality, completeness and resolution of the data. We obtained this

result with the well-established technique to measure the complete waveform of the laser signal (Full Wave form), already used in scanners airborne and now also introduced by Riegl in the terrestrial laserscanner. This overcomes many of the shadows due to vegetation or moving objects. The large amount of data acquired was processed and geo-referenced in the cartographic reference system. It represents a big geographic database to get the front of the buildings and to address other issues related to diagnosis.

Introduzione

Il mobile laser scanner è una tecnologia che si sta diffondendo molto rapidamente in funzione dei grandi vantaggi che comporta quali la possibilità di acquisire grandi aree in tempi rapidi e l'alta densità di punti per la descrizione di edifici e manufatti. A Venezia si è voluto portare questa tecnologia montando il sistema di acquisizione mobile su un natante, con tutte le difficoltà di orientamento che ciò comporta. Inoltre si è voluto finalizzare le scansioni non alla realizzazione della cartografia come solitamente avviene, ma per approfondire lo studio del patrimonio architettonico costituito dai palazzi che si affacciano sul Canal Grande.

I palazzi veneziani, in particolare le loro facciate, sono da lungo tempo oggetto di numerosi studi storico-artistico-conservativi. Il rilievo architettonico, fase preliminare e necessaria per qualsiasi successiva analisi, ha sempre rappresentato un elemento critico nell'intero processo perché fortemente legato alle caratteristiche del sito. Con i tradizionali metodi e strumenti di rilievo è infatti necessario individuare dei punti sulla terraferma da cui condurre le operazioni di misura topografiche e fotogrammetriche. Ma ciò non è sempre possibile poiché in alcune parti la densità del tessuto veneziano lungo il Canal Grande è tale da non concedere spazi liberi. Così di alcuni fronti si ha un'estesa documentazione fotografica, ma senza le corrispondenti informazioni metriche.



Figura 1 – Il Canal Grande a Venezia.

Il laser scanner da natante permette invece di ottenere un'eshaustiva documentazione metrica e radiometrica di ogni palazzo, aggirando quindi i problemi del rilievo tradizionale.

Per questo motivo l'Università Iuav di Venezia, in collaborazione con Riegl e Microgeo, ha infatti progettato e realizzato la scansione di tutti i prospetti che si affacciano sul Canal Grande (figura 1) attraverso il sistema di acquisizione integrato Riegl VMX-250 (laser scanner, fotogrammetria e INS-GNSS) da natante, ottenendo quindi un punto di vista assolutamente nuovo e particolarmente adatto al rilievo degli edifici.

Il progetto

Nel progetto del rilievo si sono presi in considerazioni sia gli aspetti logistici in cui ci si sarebbe trovati ad operare, sia le caratteristiche degli edifici da rilevare.

Per quanto riguarda le considerazioni operative, essenziali sono le dimensioni del Canal Grande (estensione lineare di circa 4 km e larghezza da 40 a 70 m), la velocità consentita ed il traffico di natanti (che è concentrato nelle ore del mattino, soprattutto nella zona di Rialto).

Inoltre la presenza dei ponti condizionava la funzionalità dei GPS, nonostante la buona copertura prevista del segnale satellitare: da 7 a 10 satelliti ben distribuiti.

Per quanto riguarda invece i fronti da rilevare, un elemento fondamentale, in fase di progetto, oltre alla già citata larghezza del canale è stata l'altezza media dei prospetti (4 o 5 piani, altezza massima 20 m) che si affacciano sul Canale. E' stato importante definire questo aspetto per poter impostare correttamente il sistema di acquisizione e garantire di arrivare fino alle coperture di tutti gli edifici. Tutte queste informazioni hanno determinato le modalità operative del rilievo. Infatti lo strumento è stato installato su una struttura appositamente realizzata e ancorata alla barca utilizzata così da alzare il punto di acquisizione rispetto al livello dell'acqua per evitare il traffico di natanti privati e vaporette. Per lo stesso motivo il rilievo è stato progettato tenendo conto della marea, scegliendo gli orari di bassa marea per aumentare il ricoprimento del laser sulle facciate dei palazzi.

Contemporaneamente, per quanto riguarda il sistema di acquisizione, ciò ha comportato anche il settaggio delle camere digitali in modo tale che con i due sensori si riuscisse ad acquisire l'intera facciata, garantendo una fascia di sovrapposizione tra le due strisciate.

Riegl VMX-250

L'acquisizione è avvenuta nelle giornate dal 10 al 12 novembre 2010 con il sistema di scansione Riegl VMX-250 (figura 2 e 3), costituito da due scanner rotativi VQ250 - 2D, da un sistema inerziale INS e dal sistema di ripresa delle immagini VMX-250-CS6 composto di due sensori di 5Mega pixel ciascuno con ottica calibrata di 12 mm.

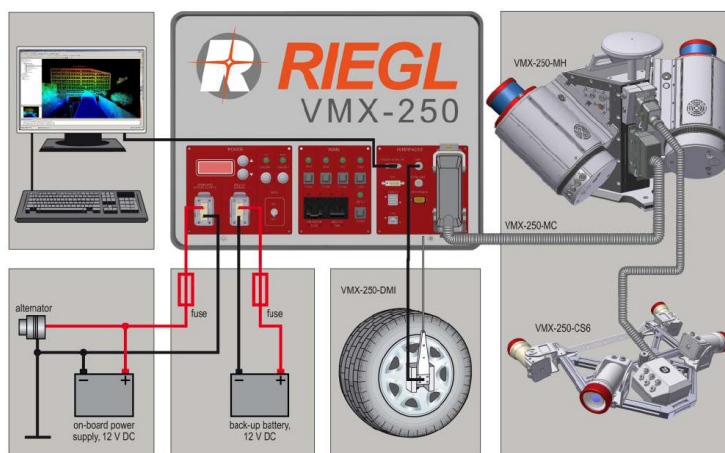


Figura 2 – Schema del sistema di acquisizione Riegl VMX-250 in combinazione con il sistema di acquisizione ottico VMX-250-CS6.

Il laserscanner VQ-250 ha una frequenza di misura di 300.000 mis/sec ottenuta con uno scanner rotativo a 360° per una completa copertura. La velocità di scansione, fino a 100 linee/sec garantisce una precisione di 10mm. La presenza del doppio scanner rotativo permette di effettuare più "passate" sullo stesso oggetto da diverse posizioni. Inoltre consente di minimizzare le zone d'ombra e di rilevare completamente gli aggetti delle facciate. Inoltre il sistema utilizza l'ultima generazione

dei laser scanner che consente una superiore qualità, completezza e densità del dato, ottenuta con la consolidata tecnica Riegl di misura della completa forma d'onda del segnale laser (FULL WAVE FORM), già utilizzata negli scanner aviotrasportati e ora introdotta anche nelle scansioni "terrestri". Ciò consente di superare molte delle zone di ombra dovute alla vegetazione o agli oggetti in movimento.



Figura 3 – Lo strumento di acquisizione composto da scanner rotativi e camere digitali.

Oltre allo scanner, a comporre il sistema mobile di acquisizione anche l'unità INS-GNSS composta dal sensore per il rilievo real-time kinematic (RTK) e tre sensori per il sistema di navigazione inerziale, il ricevitore satellitare GNSS e il misuratore di distanza (disattivato nel caso della scansione da natante in quanto costituito da un collegamento con le ruote del veicolo).

La terza unità del sistema di acquisizione è il sistema di camere digitali VMX-250-CS6 che può montare fino a 6 sensori ad alta risoluzione. Sul Canal Grande sono stati utilizzati due sensori, posizionati sullo stesso lato dello strumento, con un'ottica calibrata di 12 mm. I due sensori, con un field of view verticale di circa 40° ciascuno, sono stati impostati per garantire una fascia di sovrapposizione di circa 10°. Con questo settaggio, pari circa ad un angolo di copertura di 70°, ad una distanza di 20 metri ogni pixel ricopre un'area di circa 14 mm.

L'acquisizione fotografica può essere impostata in base alla distanza percorsa o al tempo trascorso e quando viene effettuato lo scatto il sistema registra il momento di acquisizione per poi attribuire il colore alla nuvola di punti. Lungo il Canal Grande il tempo di esposizione è stato impostato a 8ms e lo scatto ogni 1.5 secondi per garantire la sovrapposizione tra due acquisizioni consecutive.

Tutte le unità di acquisizione dati vengono controllate da un unico sistema composto da touch-screen, hard disk removibili per la registrazione dei dati, batterie e sistema di riserva per l'alimentazione, tutti gestiti attraverso il software Riegl RiACQUIRE.

2x RIEGL VG-250 Laserscanner	
Velocità di acquisizione	Fino a 2 x 300.000 punti/sec
Portata massima	500 m @ $\rho \geq 80\%$ e 100 KHz 75 m @ $\rho \geq 10\%$ e 600 KHz
Accuratezza	10 mm
Precisione	5 mm
Passo di scansione	Fino a 2 x 100 linee/sec
INS/GNSS	
Posizione assoluta	Tipica 20-50 mm
Posizione relativa	Tipica 10 mm
Roll, Pitch, Yaw	0.005°, 0.005°, 0.015°
Camere digitali	
Numero di camere	Fino a 6 (sul Canal Grande 2)
Risoluzione	2Megapixel FullHD
Ottiche	5 mm (sul Canal Grande 12 mm)

Tabella 1– Caratteristiche tecniche del VMX-250.

L'acquisizione

Il sistema di acquisizione Riegl VMX-250 è stato montato sul natante tramite una gru e installato su una struttura sopraelevata per garantire un punto di vista senza ostruzioni. Ciò è avvenuto fuori dal Canal Grande per facilitare le operazioni di montaggio dello scanner e per consentire l'inizializzazione del sistema attraverso una procedura di allineamento statico rapido ed alcuni minuti di acquisizione dinamica oltre che il bilanciamento del bianco.

La scansione dell'intero canale è avvenuta in tre giornate, suddividendo il lavoro quattro parti corrispondenti ai tratti del Canal Grande compresi tra ponte e ponte. Ognuna di queste parti è stata percorsa in entrambi i sensi di navigazione per avere una buona copertura fotografica di entrambi i fronti, aumentando così anche la quantità di dati geometrici.

Dal punto di vista metrico, l'obiettivo era quello di poter ottenere un rilievo in scala 1:100 dei fronti per cui si è scelto di effettuare l'acquisizione con una risoluzione di circa 1 cm. Attraverso il software RiAQUIRE sono stati calcolati i parametri necessari per ottenere questo risultato, definendo così una velocità di crociera ideale di 5km/h per avere una spaziatura dei punti, ad una distanza di 20m, di circa 2.3 cm per passata (ca.2000 punti/m²).

Con queste impostazioni sono necessarie almeno tre scansioni sovrapposte per avere la densità di punti necessaria per ottenere dei buoni elaborati grafici come prospetti al tratto ed ortofoto.



Figura 4 – Sistema di gestione dei dati.



Figura 5– Il natante lungo il Canal Grande.

Processamento dei dati

Al termine di ogni giornata di acquisizione i dati sono stati processati attraverso il software RiPROCESS per un primo controllo della qualità e per verificare le impostazioni dei parametri.

Il processamento dei dati avviene per parti. La prima sezione analizzata parte dal Ponte degli Scalzi, vicino alla Stazione fino a Rialto. Per questo tratto del canale sono stati acquisiti 19 Gb di scansioni 3d, 9 Gb di immagini per un totale di 7 passate e circa 635 milioni di punti.



Figura 6 – Vista della nuvola di punti 3d colorati con indicazione della traiettoria percorsa dal natante (colore ciano) e delle posizioni delle camere digitali in una singola passata (giallo e rosso).



Figura 7 – Vista dei tie-plane (piani di controllo), colorati in rosso, utilizzati nella compensazione delle traiettorie.

E' stato necessario compensare i dati per ottenere la traiettoria percorsa. Innanzitutto si è dovuto compensare l'angolo di deriva (attorno all'asse delle Z) che, a causa della bassa velocità di acquisizione assieme alla perdita di direzione per la "linearità" dalla via acqua, non rappresentava il percorso corretto. Per questo sono stati utilizzati alcuni piani di riferimento con diversa giacitura e presenti nelle diverse scansioni estratti in automatico dal software ed utilizzati come piani di raccordo (tieplane) attraverso cui correggere la direzione con il software RiPROCESS.

Si è proceduto quindi alla compensazione di tutti i dati, angoli e posizioni, per ricostruire la traiettoria effettivamente percorsa, con una deviazione standard di 13 mm basata sui 95 piani di raccordo utilizzati.

Al termine della compensazione, la traiettoria è stata applicata alle scansioni e successivamente queste sono state colorate con le foto acquisite dal sensore (eliminando le immagini peggiori).

Ottenuta così una serie di nuvole, georeferenziate e colorate, i dati sono stati esportati nel sistema cartografico italiano Gauss-Boaga.

Elaborati

La grande quantità di dati, in fase di ultimazione, si presta a numerosi utilizzi nel settore dei beni culturali, sia per ottenere rilievi precisi lungo il Canal Grande, sia come punto di partenza per analisi specifiche.

E' possibile, come primo risultato, ottenere le viste dei fronti (figura 8) direttamente dalla nuvola di punti utilizzando software come Pointools. Questo elaborato, che richiede ulteriori elaborazioni per chiudere gli inevitabili buchi dovuti a ostacoli nel momento dell'acquisizione, è significativo

proprio per la possibilità di “vedere assieme” i singoli palazzi che si affacciano sul canal. Questo stesso prodotto può essere implementato scegliendo di elaborare uno “sviluppo” del fronte in modo che ogni edificio venga rappresentato in proiezione ortogonale.

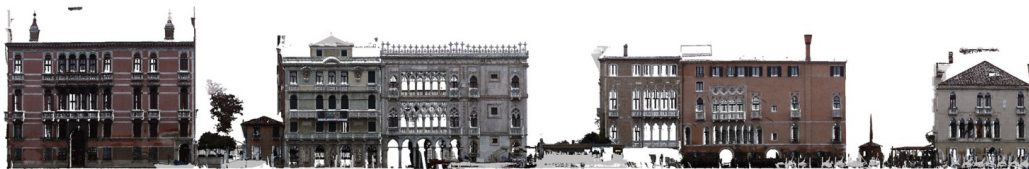


Figura 8 – Vista dei fronti del Canal Grande ottenuta direttamente dalle nuvole di punti colorate.

Su alcuni edifici inoltre sono stati condotti alcuni test per verificare quali tipi di elaborati si possono ottenere e le loro caratteristiche. Poichè l'interesse è fin dall'inizio incentrato sui beni culturali si è scelto di lavorare sulla Ca' Pesaro, sede della galleria internazionale d'arte moderna.

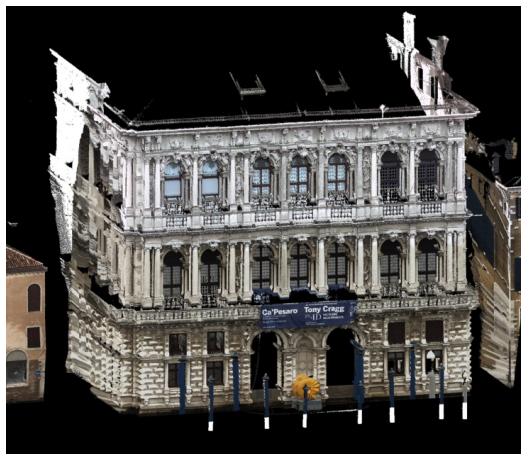


Figura 9 – Vista della nuvola di punti iniziale della facciata della Ca' Pesaro.

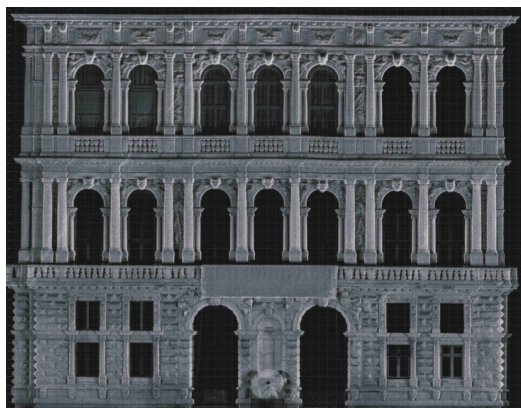


Figura 10 – Vista ortogonale con valori di amplitudine.

Figura 11 – Vista ortogonale della facciata in falsi colori in funzione della profondità da un piano di riferimento.



Figura 12 – Simil ortofoto della facciata realizzata con le foto acquisite durante la scansione.



Il processo di trattamento dei dati per ottenere degli elaborati di stampo architettonico, a partire da tutte le scansioni del tratto di Canal Grande registrare in un unico sistema di riferimento, ha previsto le seguenti operazioni ben note nella pratica del rilievo laserscanner.

In particolare:

- selezione dell'edificio da restituire graficamente;
- pulitura della nuvola di punti per eliminare outliers e oggetti non legati all'edificio (barche, pali per ormeggio,...);
- verifica della planarità del prospetto da restituire e degli oggetti;
- determinazione del piano di proiezione mediante due punti sulla facciata (software Pointools);
- creazione della quasi-ortofoto con ricoprimento del pixel pari a 0.5 cm;
- importazione in ambiente CAD e restituzione del disegno in scala 1:100.

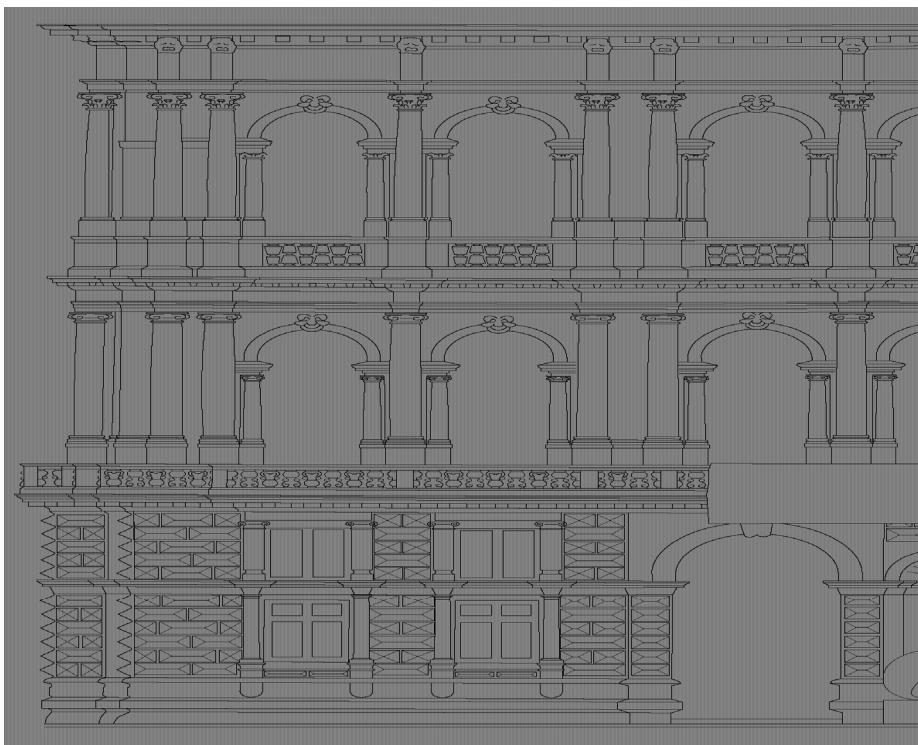


Figura 13 – Prospetto in scala nominale 1:100.

Dagli elaborati riportati si possono ricavare alcune osservazioni.

In particolare la rappresentazione a falsi colori dei fuori-piombo e della planarità della facciata risulta interessante poichè deriva dal confronto con un riferimento verticale noto (l'asse Z del sistema di riferimento). Questo tipo di analisi è molto importante nello studio del patrimonio architettonico veneziano poichè sembra appartenere ad una precisa prassi costruttiva. Indagini svolte in precedenza su questo tema hanno verificato questa ipotesi, ma erano ovviamente legate solamente ad alcuni edifici i cui prospetti si affacciavano su calli e campielli e non c'erano invece dati riguardanti edifici sull'acqua.

L'ortofoto ottenuta mediante il software Pointools dimostra una buona qualità nei dettagli, adatti alla scala 1:100, ma evidenzia come non sia sempre possibile utilizzare le immagini acquisite durante la scansione. Compaiono infatti degli ostacoli che non permettono di "colorare" correttamente la nuvola. E' necessario quindi ricorrere a scatti esterni per ottenere ortofoto corrette dal punto di vista radiometrico,

Il disegno al tratto, anch'esso in scala 1:100, è stato ottenuto attraverso un processo di digitalizzazione dell'ortofoto, integrando le informazioni con un rilievo fotografico di dettaglio per i particolari architettonici.

Conclusioni

Dai test effettuati risulta che i dati acquisiti ed orientati rappresentano un database tridimensionale molto dettagliato e assai utile nello studio dei Beni Architettonici. Si rivela adatto sia per le operazioni di rilievo architettonico, per ottenere classiche rappresentazioni architettoniche come

prospetti e profili, sia nello studio di fenomeni altrimenti difficili da indagare come i fuori piombo delle facciate.

La grande quantità di punti richiede però anche una riflessione sui tempi necessari al trattamento dei dati sia per la filtratura e l'orientamento, sia per ricavare gli elaborati previsti.

Secondo i dati forniti da Riegl le operazioni del rilievo e del trattamento dei dati risultano molto onerose in termini di tempo. Per configurare il sistema sono stati impiegati 3 operatori per un totale di 4 ore, mentre per l'acquisizione ci sono volute 13 ore totali e la presenza di un operatore per il software RiACQUIRE oltre allo skipper per la barca. Per il trattamento dati interno ed esterno, del primo tratto del Canal Grande compreso tra la stazione ferroviaria e il Ponte di Rialto, sono state necessarie 30 ore di lavoro effettivo da parte di un operatore specializzato oltre ad altre 30 ore di calcolo.

Per ottenere gli elaborati finali, il calcolo diventa più complesso poiché dipende dal metodo utilizzato e dalla complessità dell'edificio da restituire. Con il metodo proposto, a partire dalla nuvola di punti già colorata, si è calcolato che il tempo necessario per la restituzione di un prospetto in scala 1:100 è di circa 4-10 ore (tempo variabile in funzione della complessità).

Il progetto proseguirà da un lato con la rappresentazione analitica di tutti i fronti del Canal Grande, in modo da ottenere un atlante dei palazzi che vi si affacciano. Inoltre sono previsti alcuni test per approfondire gli studi sulle condizioni di fuori piombo delle facciate, in modo da completare i dati già esistenti sul patrimonio veneziano con quelli riguardanti i fronti prospicienti il Canal Grande.

Si ringraziano:

Riegl Laser Measurement Systems GmbH - www.riegl.com

Bibliografia

-Ullrich A. and Reichert, R. (2005): *High resolution laser scanner with waveform digitization for subsequent full waveform analysis*, Proceedings SPIE Laser Radar Technology and Applications X, Orlando, Vol 5791;

-Rieger P., Studnicka N., Pfennigbauer M., Zach G., Ullrich A. (2010): *Mobiles laser scanning: technologische fortschritte bei der Datenakquisition*, Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D.Tage 2010, Vichmann Verlag;

Caratterizzazione del dato WorldView-2 su aree d'interesse naturalistico

Maria Adamo, Cristina Tarantino, Francesco P. Lovergine, Guido Pasquariello, Palma Blonda

ISSIA – CNR, Via Amendola 122/D-O, Bari, Italy, Tel. +390805929437, Fax +390805929460, adamo@ba.issia.cnr.it

Riassunto

Il presente lavoro descrive i risultati dell'analisi di un'immagine Worldview-2 concessa dalla DigitalGlobe nell'ambito della sua "8-bands Research Challenge". L'intento è stato quello di stimare il contributo apportato dalle nuove bande spettrali in dotazione al nuovo sensore Worldview-2 rispetto a quelle tradizionali di cui sono dotati i sensori ad altissima risoluzione spaziale in commercio (ad es. Quickbird e GeoEye-1) per applicazioni mirate alla produzione di mappe tematiche di copertura del suolo.

Lo studio è stato articolato in due parti. Nella prima parte l'immagine è stata utilizzata per individuare le differenti classi di copertura del suolo mediante l'applicazione di un algoritmo di segmentazione non supervisionata e con l'aiuto di una mappa di uso del suolo tipo *Corine Land Cover* prodotta alla scala 1:10.000. I profili spettrali di ciascuna classe sono stati confrontati con gli spettri ottenuti mediante un'acquisizione del sensore iperspettrale MIVIS.

Nella seconda parte è stata applicata una procedura di classificazione supervisionata per produrre una mappa di copertura del suolo sfruttando le 8 bande del sensore con le seguenti configurazioni in input: R, G, B, NIR ovvero il set delle 4 bande tradizionali disponibili sui sensori ad altissima risoluzione spaziale in commercio; R, G, B, NIR + ciascuna delle 4 bande aggiuntive; l'intero set delle 8 bande di cui è dotato il sensore Worldview-2.

L'accuratezza della mappa risultante è stata stimata utilizzando un dataset di campi di test selezionati in maniera casuale sull'immagine considerata. La scena investigata è caratterizzata da una notevole diversità di tematismi essenzialmente naturali: paludi, coltivi vegetati e non, boschi e cespuglieti, con diverso contenuto di umidità. I risultati dell'analisi si prestano a molteplici considerazioni: sebbene le bande siano alquanto correlate tra loro, l'aggiunta d'informazione spettrale consente di aumentare la capacità di discriminazione di alcuni specifici tematismi.

Abstract

The work describes the results of the analysis of a Worldview-2 image granted by DigitalGlobe in its "8-bands Research Challenge". The aim of the work was the study of the performance of the new add on spectral bands offered by the Worldview-2 sensor respect to the traditional spectral bands of other very high spatial resolution commercial sensors (i.e. Quickbird, GeoEye-1) for the extraction of land cover thematic maps. The study was developed in two parts. In the first part the image was used to investigate among the different land cover classes applying an unsupervised algorithm for the clustering and using an available land use map, Corine-like, at a 1:10000 scale. The spectral profiles for each class were compared with those acquired by the hyperspectral MIVIS sensor.

In the second part a supervised classification algorithm was applied in order to produce a land cover map using the 8 bands of the sensor with different input configurations to the classifier: R, G, B, NIR that are the 4 traditional bands available in other very high spectral resolution commercial sensors; R, G, B, NIR + each of the 4 add on bands; the whole spectral set of 8 bands of Worldview-2 sensor.

The accuracy of the resulting map was estimated using a test set randomly selected on the image. The scene is characterized by different, essentially natural, classes: marshlands, arable land with or without vegetation, woods or shrublands, with different moisture content. The results of the analysis offer many considerations: even though the spectral bands are quite correlated each other, the amount of spectral information can increase the discrimination capability of some specific ground classes.

L'immagine Worldview-2

Il dataset analizzato consiste in un'immagine Worldview-2 acquisita su un'area di 100 km² il 13 Giugno 2010 alle ore 09:48 UTC. Il frame acquisito include la zona SIC denominata "Oasi Naturale del Lago Salso". Il sito scelto si rivela particolarmente significativo per la presenza di una zona umida tra le più importanti del sud dell'Italia. In Figura 1 è rappresentata la composizione RGB, nel visibile, dell'immagine.

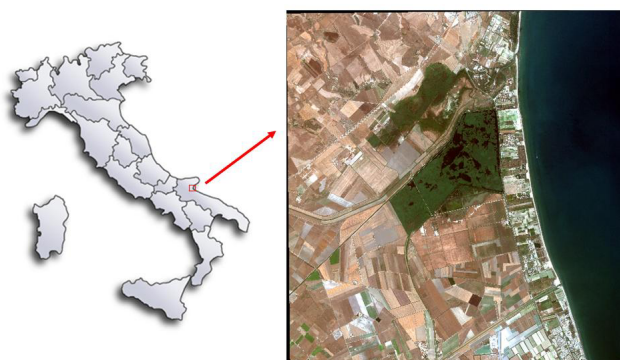


Figura 1 – Composizione RGB dell'immagine Worldview-2.

L'immagine è stata calibrata e trasformata in riflettanza al TOA (Top of the Atmosphere) per ottenere profili spettrali delle classi a terra indipendenti dalla geometria d'illuminazione in modo da poter eseguire confronti con le immagini iperspettrali acquisite sul sito. In aggiunta alle 4 bande multispettrali di cui sono dotati i sensori ad altissima risoluzione spaziale (BLUE, GREEN, RED e NIR) il sensore Worldview-2 è dotato di altre 4 bande aggiuntive: la banda denominata COASTAL (400-450 nm), la banda YELLOW (585-625 nm), la banda in corrispondenza del RED EDGE (705-745 nm) e una seconda banda nel NIR (NIR2, 860-1040 nm).

In letteratura sono presenti molti lavori in cui è stata esplorata la possibilità di usare le nuove bande del sensore in differenti campi di applicazione (Bramante et al., 2010, Ozdemir, Karnieli, 2011, Borel, 2010). Inoltre è stata evidenziata l'alta correlazione fra alcune bande. In particolare tra la COASTAL e la banda nel BLUE e tra le due bande nel NIR le cui informazioni potrebbero rivelarsi pertanto ridondanti e poco utili (Peroni et al., 2010).

Selezione e caratterizzazione delle classi

Per la selezione delle classi su cui effettuare l'analisi è stata utilizzata come verità a terra una mappa di *land use* del 2006 prodotta nella tassonomia CORINE e ad una scala 1:10000. Originariamente sulla mappa erano presenti 40 classi tematiche delle quali sono state selezionate solo quelle esclusivamente di *land cover*. Successivamente è stata applicata sull'immagine telerilevata una procedura di segmentazione non supervisionata al fine di riconoscere un certo numero di classi spettralmente differenti.

E' stato utilizzato l'algoritmo "K-Means" applicato sulle 8 bande dell'immagine Worldview-2 con un numero massimo di iterazioni pari a 50 e una soglia dell'1% come criterio di convergenza.

A completamento di questo step sono state così selezionate 20 classi. Dal confronto di questi risultati con l'informazione di *ground truth*, alcune delle classi originarie sono state separate in più classi mentre per altre è stato effettuato un *merging* sino ad ottenere una serie di 18 classi distinte di *land cover* su cui eseguire lo studio di caratterizzazione.

Nella Tabella 1 sono schematizzate le classi scelte, raggruppate in 4 principali macro-classi: ACQUA, SUOLI, VEGETAZIONE e SUPERFICI ARTIFICIALI.

Le classi appartenenti a quest'ultima macro-classe non sono state considerate nell'analisi seguente in quanto caratterizzate da una presenza poco significativa sulla scena.

MACRO-CLASSI	N°	CLASSI	TRAINING pixels (TOT.21948)	TEST pixels (TOT.26428)
ACQUA	1	MARE 1 (massima profondità)	1365	1270
	2	MARE 2 (media profondità)	938	1845
	3	MARE 3 (zona costiera)	2009	2067
	4	FIUMI	1322	2012
	5	PALUDI	1924	1991
SUOLI	6	TERRENI NUDI 1 (marrone scuro)	1224	1245
	7	TERRENI NUDI 2 (marrone chiaro)	1104	1409
	8	TERRENI NUDI 3 (arancione)	1483	1646
	9	TERRENI NUDI 4 (marrone chiarissimo)	1316	1198
	10	SABBIA	857	730
VEGETAZIONE	11	CAMPI VEGETATI 1 (verde intenso)	1250	918
	12	AREA PALUDOSA VEGETATA 1 (verde scuro)	1272	537
	13	VEGETAZIONE NON ALBERATA	1031	3252
	14	FORESTE	561	1693
	15	CAMPI VEGETATI 2 (verde chiaro)	1302	742
	16	AREA PALUDOSA VEGETATA 2 (verde meno scuro)	1154	748
SUPERFICI ARTIFICIALI	17	STRUTTURE ARTIFICIALI	984	1521
	18	CAMPI VEGETATI CON TELONI	852	1265

Tabella 1 – Selezione delle classi sull'immagine.

Analisi spettrale delle classi

La caratterizzazione spettrale delle classi selezionate è stata effettuata con l'ausilio di un dataset di immagini iperspettrali acquisite dal sensore aviotrasportato MIVIS. In particolare è stata utilizzata un'immagine acquisita il giorno 25 Maggio 2009 alle ore 06:18 UTC.

Il MIVIS (Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer) è un sistema a scansione costituito da quattro spettrometri che acquisiscono simultaneamente la radiazione proveniente dalla superficie terrestre nel visibile (20 bande tra 0,441 e 0,819 μm), nel vicino infrarosso (8 bande tra 1,145 e 1,54 μm), nell'infrarosso medio (64 bande tra 1,992 e 2,474 μm) e nell'infrarosso termico (10 bande tra 8,34 e 12,42 μm) per un totale di 102 canali. Dall'applicazione della calibrazione radiometrica nei canali 1 – 92, a ciascun pixel è associato il valore di radianza espressa in $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$ mentre per le bande nell'infrarosso termico (canali 93-102) i valori nei pixel sono convertiti in temperatura di brillantezza al sensore espressa in $^{\circ}\text{C}$. Il sensore è dotato di una buona risoluzione radiometrica (12 bits) e spaziale. Essendo, infatti, un sensore aviotrasportato ad una quota di volo di 1.5 Km, possiede un pixel di dimensione 3 m x 3 m al nadir.

L'immagine in radianza MIVIS è stata convertita in riflettanza al TOA per rendere anche tale dato indipendente dalla geometria di acquisizione.

Il confronto dei profili spettrali derivati dall'immagine MIVIS con quelli relativi all'immagine Worldview-2 è da considerarsi esclusivamente qualitativo in quanto non è nota la qualità con cui il dato iperspettrale sia stato calibrato durante la fase di pre-processamento. Inoltre, poiché non è stato applicato alcun algoritmo di sottrazione del contributo atmosferico su entrambe le immagini, quest'ultimo contribuirà in maniera differente ai valori di riflettanza sulle due immagini a causa della differente data in cui le immagini sono acquisite e della differente quota di volo a cui hanno acquisito i due sensori. Si è scelto di non applicare sulle immagini alcun algoritmo di rimozione degli effetti atmosferici poiché l'applicazione di una procedura di correzione sull'immagine necessita della conoscenza di informazioni ancillari che raramente sono disponibili se non con un bias temporale e spaziale rispetto all'immagine telerilevata; inoltre, per l'applicazione di una procedura di classificazione supervisionata su un frame spazialmente ridotto, come quello disponibile, non è necessario rimuovere questo contributo, ipotizzando in prima approssimazione, in condizioni di cielo sereno, la presenza di una atmosfera pressoché uniforme su tutto il frame (Baraldi, 2009).

L'analisi spettrale delle classi è stata eseguita selezionando alcune regioni rappresentative per le 18 classi che non presentassero significativi cambiamenti nelle due immagini dovute all'intervallo temporale di un anno intercorso tra esse. Nonostante tale gap temporale poiché le due immagini sono state acquisite entrambe in primavera è possibile ritenere valida, con buona approssimazione, che la gran parte delle classi di vegetazione sia caratterizzata dallo stesso stato fenologico.

In Figura 2 è riportato il subset dell'acquisizione MIVIS corrispondente all'immagine Worldview-2.



Figura 2 – Immagine MIVIS acquisita il 25 Maggio 2009 alle 06:18 UTC.

In Figura 3 sono riportati i profili spettrali per le classi di ACQUA relativi alle immagini Worldview-2 (a) e MIVIS (b).

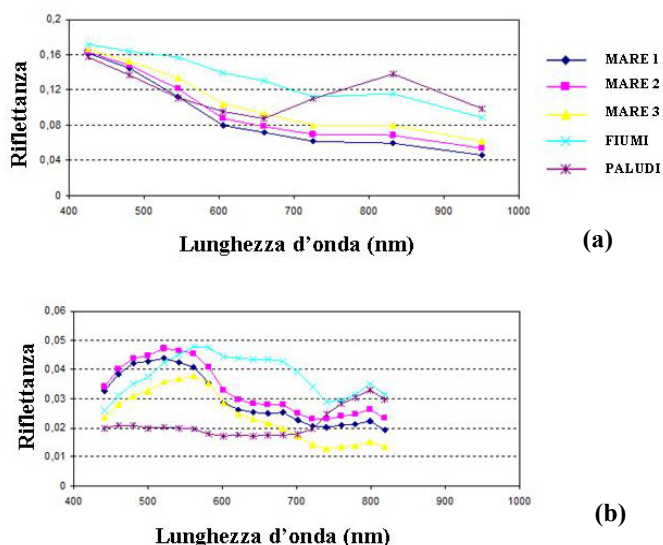


Figura 3 – Spettri Worldview-2 (a) e MIVIS (b) per le classi di ACQUA.

I profili spettrali acquisiti dal sensore Worldview-2 presentano un contributo dell'atmosfera, nel range delle lunghezze d'onda più corte, dovuto allo scattering di Rayleigh mentre prevale l'assorbimento dei gas nel range delle lunghezze d'onda più lunghe (in particolare nella banda del NIR2). Quest'ultimo contributo influisce significativamente anche sui profili MIVIS.

Le classi MARE 1, MARE 2 e MARE 3 sono relative a 3 zone marine corrispondenti, rispettivamente, a tre livelli decrescenti di profondità di fondale e di vicinanza alla costa.

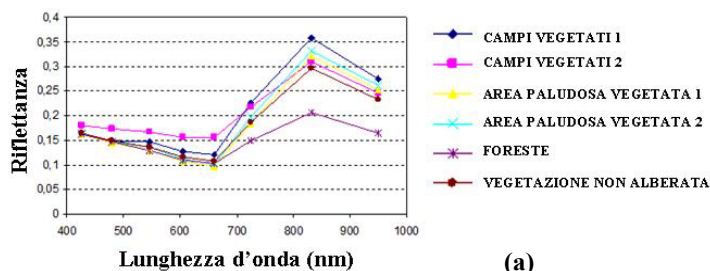
Gli spettri delle tre differenti classi tendono a convergere in corrispondenza della banda COASTAL. Questo comportamento è giustificato dalla presenza predominante del contributo atmosferico rispetto a quello proveniente dalla superficie. Si può inoltre osservare un incremento nei livelli di riflettanza per regioni sempre più prossime alla linea di costa a causa del contributo crescente dei sedimenti sospesi (Stramski et al., 2004).

Il trend degli spettri MIVIS non è indicativo in quanto fortemente dominato dal *sun glint* che in maniera crescente, in direzione ovest-est, interessa la porzione di mare sull'immagine.

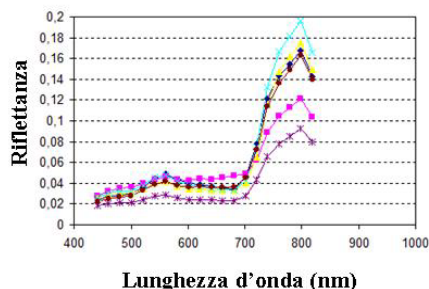
Le classi MARE 3 e FIUMI presentano un profilo spettrale simile, evidenziato dalla maggiore risoluzione spettrale del MIVIS, e caratteristico di corpi d'acqua in prossimità di apporti fluviali e di zone costiere.

Le regioni etichettate come PALUDI sono relative ad una serie di corpi d'acqua appartenenti alle zone umide dell'Oasi Naturale del Lago Salso. Sotto lo strato d'acqua superficiale, di profondità variabile a seconda della stagione, vi è uno strato di vegetazione, le cui estremità possono affiorare sulla superficie, influenzando la risposta spettrale della classe.

In Figura 4 sono rappresentati i profili spettrali relativi alle immagini Worldview-2 (a) e MIVIS (b) per le classi di VEGETAZIONE.



(a)



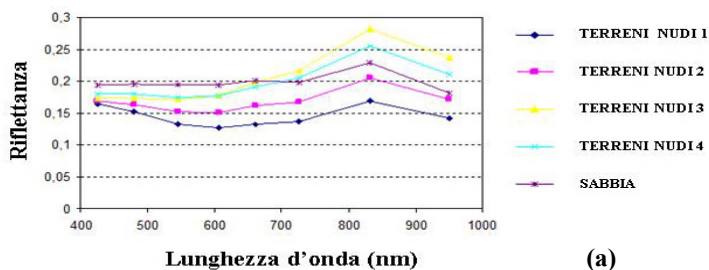
(b)

Figura 4 – Spettri Worldview-2 (a) e MIVIS (b) per le classi di VEGETAZIONE.

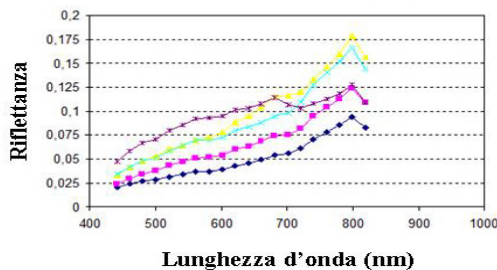
Gli spettri MIVIS per le sei classi presentano il trend tipico della vegetazione con variazioni tra le classi prevalentemente in termini di slope del profilo spettrale tra il RED e il NIR dovuto alla specie presente a terra e allo stato di salute della pianta (Govender e al., 2007).

I profili Worldview-2, per effetto del contributo atmosferico, non presentano nel range del visibile il tipico trend caratterizzante la vegetazione che invece diventa riconoscibile per le lunghezze d'onda appartenenti al range tra la banda del RED e del NIR1. Escludendo alcuni casi che possono essere giustificati considerando la differenza temporale tra le due acquisizioni, vi è un buon accordo tra i profili spettrali acquisiti dai due sensori.

In Figura 5 sono riportati i profili spettrali Worldview-2 (a) e MIVIS (b) per le classi di SUOLO.



(a)



(b)

Figura 5 – Spettri Worldview-2 (a) e MIVIS (b) per le classi di SUOLO.

Le classi TERRENI NUDI 1, TERRENI NUDI 2, TERRENI NUDI 3 e TERRENI NUDI 4 sono caratterizzate da una firma spettrale simile nella forma, ma avente un livello medio di riflettanza crescente. Questo comportamento può essere probabilmente attribuito ad un differente contenuto di umidità dei suoli (Bowers et al., 1965).

Classificazione del dato Worldview-2: analisi del contributo delle 8 bande spettrali

Per la classificazione supervisionata del dato Worldview-2 è stato utilizzato l'algoritmo statistico *Maximum Likelihood* (ML).

Per ciascuna delle 18 classi (Tabella 1) riconosciute sulla scena attraverso l'applicazione dell'algoritmo di segmentazione, la mappa di verità a terra e caratterizzate spettralmente con il dato iperspettrale MIVIS, è stata effettuata una selezione random di aree campione sull'immagine per il training (TR) e il test (TE) dell'algoritmo.

Per valutare l'accuratezza dell'algoritmo sull'insieme delle classi selezionate è stato utilizzato il parametro di *Overall Accuracy* espresso in percentuale (OA%) con la stima del relativo intervallo di confidenza (δ) con una significatività al 95% (Baraldi et al., 2006).

Per la valutazione dell'accuratezza della classificazione di ciascuna classe è stato considerato il parametro di *Mapping Accuracy* espresso in percentuale (MA%) (Congalton et al., 1999). Quest'ultimo è definito come:

$$MA\% = \frac{pixels_{correctlyclassified}}{pixels_{correctlyclassified} + pixels_{omission} + pixels_{commission}} * 100 \quad [1]$$

dove:

$pixels_{omission}$ è il numero dei pixel assegnati alle altre classi presenti lungo la riga, relativa alla classe considerata, della matrice di confusione;

$pixels_{commission}$ è il numero di pixel assegnati alle altre classi presenti lungo la colonna, relativa alla classe considerata, della matrice di confusione.

L'algoritmo di ML è stato applicato considerando in input le 4 bande spettrali standard (R, G, B, NIR) dell'immagine Worldview-2 e successivamente aggiungendo come 5^a banda ciascuna delle restanti. Infine l'algoritmo è stato applicato alla totalità delle 8 bande acquisite dal sensore.

La Tabella 2 riporta i valori di OA% e relativo δ , in training e test, per le diverse configurazioni in input al classificatore.

Input	OA_TR%	$\pm\delta$ _TR%	OA_TE%	$\pm\delta$ _TE%
4 BANDE	98.63	0.15	75.31	0.52
4 BANDE + COASTAL	99.60	0.08	78.09	0.50
4 BANDE + YELLOW	98.62	0.15	77.96	0.50
4 BANDE + RED EDGE	98.87	0.14	79.00	0.49
4 BANDE + NIR2	98.94	0.13	78.92	0.49
8 BANDE	99.71*	0.07	85.50*	0.42

Tabella 2 – OA% risultante dalla classificazione con ML per le diverse configurazioni in input.

L'incremento del numero di bande utilizzate ha l'effetto, sia per il TR che per il TE, di aumentare l'OA% per l'aumento di informazione fornita in input al classificatore. Si osserva un miglioramento del 10% nell'OA% sui dati di test con l'utilizzo delle 8 bande rispetto alla configurazione a 4 bande.

Ciò si traduce in una migliore propensione alla generalizzazione da parte dell'algoritmo quando siano utilizzate anche le informazioni provenienti dalle bande addizionali.

Il simbolo dell'asterisco denota nella tabella il miglior risultato ottenuto sia per i dati di training che di test.

L'analisi è stata ripetuta per ciascuna classe al fine di valutare il contributo che ognuna delle 4 bande aggiuntive può offrire per la caratterizzazione della specifica macro-classe.

In Tabella 3 sono schematizzati i risultati in termini di MA% ottenuti per le classi appartenenti alla macro-classe ACQUA.

Input	MARE 1 (massima profondità)	MARE 2 (media profondità)	MARE 3 (costiero)	FIUMI	PALUDI
4 BANDE	83.33	66.84	70.27	55.81	81.86
4 BANDE + COASTAL	80.41	66.39	72.48	65.53*	83.92
4 BANDE + YELLOW	86.68	84.97*	90.11*	59.01	81.81
4 BANDE + RED EDGE	96.28	77.83	76.87	62.80	84.13
4 BANDE + NIR2	99.52*	72.47	63.35	59.00	93.51*
8 BANDE	100**	91.70**	90.63**	82.88**	99.04**

Tabella 3 – MA% in test per le classi appartenenti alla macro-classe ACQUA.

Il valore migliore di MA% è stato ottenuto utilizzando l'intero set di 8 bande disponibili (indicato con due asterischi nelle Tabelle 3-4-5) con un miglioramento, in media, del 20% rispetto all'utilizzo delle 4 bande standard.

In particolare, analizzando il contributo di ciascuna banda per ogni singola classe si può osservare che (le configurazioni di input con le migliori performance sono contrassegnate con un asterisco nelle Tabelle 3-4-5):

- tranne nel caso della banda COASTAL, la discriminazione della classe MARE 1 migliora con l'utilizzo della configurazione a 5 bande. In particolare, l'utilizzo della banda del NIR2 innalza di circa il 16% il valore di MA%;
- per la classe PALUDI si ottiene il miglior risultato con l'utilizzo della banda NIR2. Ciò può essere spiegato considerando che, come altrove detto, questa classe presenta un profilo spettrale in parte dominato dalla vegetazione;
- la discriminazione delle classe MARE 2 e MARE 3 migliora notevolmente (del 20% circa) utilizzando la banda YELLOW che sembra quindi adatta al riconoscimento delle classi caratterizzate da un maggiore contributo delle sostanze otticamente attive presenti nel corpo d'acqua.

Nella Tabella 4 sono schematizzati i risultati ottenuti per le classi appartenenti alla macro-classe VEGETAZIONE.

Input	CAMPI VEGETATI 1	CAMPI VEGETATI 2	AREA PALUDOSA VEGETATA 1	AREA PALUDOSA VEGETATA 2	VEGETAZIONE NON ARBOREA	FORESTE
4 BANDE	70.91	55.20	93.69	90.42	60.50	93.50
4 BANDE + COASTAL	75.89	86.48*	95.89*	92.90*	74.88*	95.80*
4 BANDE + YELLOW	74.07	53.30	95.20	92.49	60.97	94.69
4 BANDE + RED EDGE	85.25*	56.90	95.20	92.96	68.27	95.64*
4 BANDE + NIR2	75.02	60.96	92.86	90.79	69.68	94.88
8 BANDE	92.08**	89.83**	96.93**	95.38**	90.84**	97.02**

Tabella 4 – MA% in test per le classi appartenenti alla macro-classe VEGETAZIONE.

Il miglior valore di MA% è stato ottenuto con la configurazione a 8 bande con un incremento variabile a seconda della classe nel range 3-35%.

Nella Tab. 5 sono schematizzati i risultati ottenuti per le classi appartenenti alla macro-classe SUOLI.

Input	TERRENI NUDI 1	TERRENI NUDI 2	TERRENI NUDI 3	TERRENI NUDI 4	SABBIA
4 BANDE	80.84	38.62	48.72	55.20	39.10
4 BANDE + COASTAL	75.05	38.08	49.48	58.74	41.40*
4 BANDE + YELLOW	81.31*	50.53*	48.51	56.31	39.07
4 BANDE + RED EDGE	78.71	49.78	55.96*	60.28	40.71
4 BANDE + NIR2	80.55	50.17	55.99*	65.01**	39.16
8 BANDE	86.15**	57.67**	61.17**	64.10	44.24**

Tabella 5 – MA% in test per le classi appartenenti alla macro-classe SUOLI.

Anche in questo caso la configurazione a 8 bande è quella che produce i migliori risultati in termini di MA% mostrando un miglioramento in media pari a circa il 10% rispetto alla configurazione a 4 bande. In generale le classi appartenenti a questa macro-classe presentano i più bassi valori di MA%.

Conclusioni

Il lavoro descrive l'attività sperimentale svolta per analizzare il contributo fornito dalle bande spettrali aggiuntive (COASTAL, YELLOW, RED EDGE e NIR2) del nuovo sensore ad altissima risoluzione spaziale Worldview-2 per la produzione di mappe di copertura del suolo. Innanzitutto è stata eseguita un'analisi non supervisionata dell'immagine per individuare le differenti firme spettrali (classi) presenti nella scena, in seguito mediante un algoritmo statistico di classificazione

supervisionata è stata prodotta una mappa di copertura del suolo considerando in input al classificatore differenti combinazioni delle bande spettrali disponibili in modo da stimare il contributo di ognuna. L'analisi ha mostrato che le 8 bande spettrali, sebbene correlate tra loro, risultano estremamente utili per migliorare la discriminazione tra sotto-classi corrispondenti alla stessa macro-classe di copertura del suolo. Ciò attesta la capacità del nuovo sensore nell'investigare la diversità presente nei suoli nonostante l'apparente omogeneità nelle convenzionali mappe di copertura del suolo. Dalla classificazione supervisionata è possibile rilevare cambiamenti nella batimetria utilizzando la banda COASTAL; inoltre le bande nelle lunghezze d'onda più corte sembrano essere significative per il riconoscimento di pattern misti di acqua e terreno. La banda YELLOW sembra rilevare la presenza di detriti o la composizione del terreno caratterizzata da un certo grado di "giallosità". Infine le bande RED EDGE e NIR2 appaiono utili per la discriminazione di siti caratterizzati da un mix di acqua e vegetazione. Nel complesso l'accuratezza tematica cresce di circa il 10% con l'uso delle 8 bande rispetto alle 4 bande tradizionali comuni ad altri sensori ad altissima risoluzione spaziale in commercio.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto RIVONA (Flight Risks Mitigation and Nowcasting at Airport) finanziato dalla Regione Puglia, POFESR 2007-2013.

Si ringrazia la DigitalGlobe per aver messo a disposizione l'immagine Worldview-2 utilizzata.

Si ringrazia Planetek Italia s.r.l. per aver fornito i dati del sensore iperspettrale MIVIS.

Bibliografia

- Baraldi A., Puzzolo V., Blonda P., Bruzzone L., Tarantino C. (2006), "Automatic Spectral Rule-based Preliminary Mapping of Calibrated Landsat TM and ETM+ Images", *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, 44(9)
- Baraldi A. (2009), "Impact of radiometric calibration and specifications of spaceborne optical imaging sensors on the development of operational automatic remote sensing image understanding systems", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2(2)
- Borel C. C. (2010), "Vegetative canopy parameter retrieval using 8-band data", In: *DigitalGlobe 8-Band Research Challenge 2010*, www.digitalglobe.com/downloads/8bc/borel_8band_paper_12_14_10.pdf
- Bowers S.A. & Hanks A.J. (1965), "Reflection of radiant energy from soil", *Soil Science*, 100-130
- Bramante J. F., Raju D. K. & Tsai Min S. (2010), "Derivation of bathymetry from multispectral imagery in the highly turbid waters of Singapore's south islands: A comparative study", In: *DigitalGlobe 8-Band Research Challenge 2010*, www.digitalglobe.com/downloads/8bc/8band_Challenge_TMSI.pdf
- Congalton R. & Green K. (1999), *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, CRC/Lewis Press, Boca Raton
- Govender M., Chetty K. & Bulcock H. (2007), "A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies", *Water SA*, 33(2): 1-8
- Ozdemir I., Karnieli A. (2011), "Predicting forest structural parameters using the image texture derived from WorldView-2 multispectral imagery in a dryland forest, Israel", *Int. Journal of Appl. Earth Observation and Geoinformation*, 13(5): 701-710
- Peroni G., Gachelin J.P., Saint-Pol M., Legoff V., Fontanot F. & Sannier C. (2010). "New spectral data available for the controls in agriculture (CWRS) and for vegetation monitoring", *Proc. Of the 16th GeoCAP Annual Conference*
- Stramski D., Wozniak S. B. & Flatau P. J. (2004), "Optical properties of Asian mineral dust suspended in seawater", *Limnol. Oceanogr*

Sentieristica digitale: metodi e tecnologie in uso

David Adriani, Paolino Di Felice

Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione, Università di L'Aquila,
Via G. Gronchi 18, campo di Pile, L'Aquila, Tel. 0862.434418, Fax 0862.434404,
adrianidavid@libero.it, paolino.difelice@univaq.it

Riassunto

La crescente comunità di escursionisti si trova ciclicamente a dover affrontare il dilemma di quale percorso scegliere per la “prossima” escursione. Offrire loro adeguato supporto da parte degli enti che operano sul territorio è una maniera diretta e concreta di valorizzare le enormi bellezze paesaggistiche dell'Italia. La valorizzazione del paesaggio nazionale è, altresì, un obbligo per le Regioni introdotto dal D.L. n. 42 del 2004. Obiettivo di questo articolo è dare un quadro d'insieme sullo stato dell'arte circa il fermento che esiste nel nostro Paese attorno alla problematica della sentieristica digitale, ovvero sulla realizzazione di strumenti GIS da offrire tanto agli escursionisti che ai responsabili della gestione del territorio.

Abstract

The increasing community of excursionists cyclically has to face the dilemma of which route to select for the “next” excursion. To offer them support from local authorities is a direct and practical way to enhance the enormous beauties of the Italian landscape. Increasing the value of the national landscape is, in addition, a commitment for the Regions introduced by the D.L. n. 42 del 2004. The goal of the present article is to summarize the state of the art about the ferment that exists in our Country regarding the issue of the digital path-finding, that is about the realization of GIS tools to be offered to the excursionists and to the people in charge to manage the territory, as well.

Contesto di riferimento e motivazioni

Offrire adeguato supporto agli escursionisti da parte degli enti (pubblici e privati) che operano sul territorio è una maniera semplice, diretta e concreta di valorizzare le enormi bellezze paesaggistiche dell'Italia. Tema, questo, molto sentito e già trattato in precedenti edizioni di ASITA. (alcuni esempi: (Addario et al., 2008), (Alessio et al., 2008), (Barricelli et al., 2008), (Iacobellis et al., 2008)).

Come correttamente rimarcato in (Scanu e Podda, 2009), la valorizzazione del paesaggio nazionale è, altresì, un obbligo per le Regioni introdotto dal D.L. n. 42 del 22 gennaio 2004 (il cosiddetto *Codice dei beni culturali e del paesaggio*) successivamente modificato nel marzo del 2006 (D.L. n. 156 e 157) e in aprile 2008 (D.L. n. 62 e 63) (<http://www.beniculturali.it/>). Ci si limita qui a richiamare per i fini del presente contributo l'Articolo 135 (*Pianificazione paesaggistica* - comma 1) come appare nel D.L. n.63 che recita: “Lo Stato e le regioni assicurano che *tutto* il territorio sia adeguatamente conosciuto, salvaguardato, pianificato e gestito in ragione dei differenti valori espressi dai diversi contesti che lo costituiscono. A tale fine le regioni sottopongono a specifica normativa d'uso il territorio mediante *piani paesaggistici*, ...”

Facendo ancora riferimento all'articolo (Scanu e Podda, 2009), è assolutamente condivisibile e, nei fatti largamente condiviso, il convincimento che la migliore soluzione al problema della gestione

efficiente del territorio per far fronte agli obblighi di legge e, di riflesso, per offrire adeguato supporto alla crescente comunità degli escursionisti, sia costituita dalla tecnologia software dei GIS. Obiettivo di questo articolo è dare un sintetico quadro d'insieme dello stato dell'arte (prevalentemente a partire da memorie apparse negli atti della Conferenza Nazionale ASITA) circa il fermento che esiste nel nostro Paese attorno alla problematica della sentieristica digitale, ovvero sulla realizzazione di strumenti software evoluti da offrire tanto agli escursionisti che ai responsabili della gestione del territorio.

Concettualmente, una tale soluzione si compone dei seguenti tre elementi architeturali: la base di dati dei sentieri, il sistema di gestione, dotato di estensione spaziale, che la governa ed uno strato software “esterno” in grado di agevolare le operazioni di interazione con i dati (Fig.1). A questo livello della discussione è sufficiente fare riferimento a due categorie di utenti del sistema: il *gestore* e l'*escursionista*. Il primo facente parte della struttura che offre il servizio (regione, provincia, comune, comunità montana, azienda autonoma, ...), il secondo costituito da un qualsiasi fruitore (attraverso interfaccia web) del servizio, previa registrazione al sito.

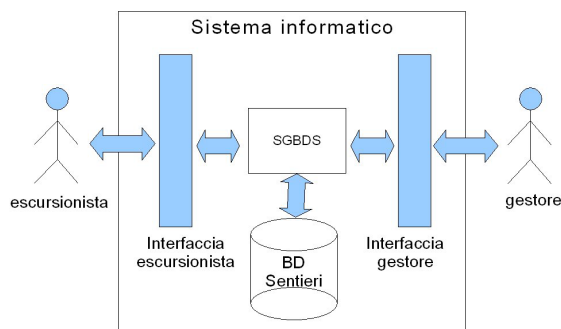


Figura 1 – Architettura software “minimale” per la gestione di sentieri.

Fattori peculiari del dominio escursionistico

Di seguito si usa ripetutamente il termine *percorso* inteso come una sequenza di “sentieri” tra loro contigui. A sua volta, per *sentiero* s'intende una strada a fondo naturale formatasi per effetto del passaggio di pedoni e di animali (Codice della strada, Art. 3, Comma 1, n.48).

L'escursionismo è una forma di attività motoria basata sul camminare nel territorio lungo percorsi “riconoscibili” ma anche liberamente, ovvero al di fuori di tracciati facilmente “identificabili” sul terreno. Normalmente un'escursione si svolge in un ambiente naturale ed è accompagnata da attività naturalistiche quali l'osservazione di specie botaniche o faunistiche oppure la visita di monumenti o siti d'interesse situati lungo il percorso.

La crescente comunità di escursionisti si trova ciclicamente a dover affrontare il dilemma di quale percorso scegliere per la “prossima” escursione. L'obiettivo che una qualunque soluzione software si deve prefiggere è offrire supporto agli amanti delle escursioni in ambienti aperti nel decidere il percorso da intraprendere.

Per poter sperare di andare incontro alle esigenze degli escursionisti, nonché per offrire loro percorsi fisicamente affrontabili, occorre che il sistema tenga adeguatamente in conto i tre fattori peculiari del contesto escursionistico illustrati di seguito, ovvero: *umano*, *motivazionale* e *stagionale*.

Fattore umano

Perché un itinerario da proporre all'escursionista possa essere considerato a lui idoneo occorre che nel ricercarlo si sia tenuto in conto delle sue caratteristiche fisiche (quali età, altezza, peso, sesso e preparazione fisica). Ad esempio, è corretto osservare che i due percorsi evidenziati nella Fig.2 non sono da considerarsi alternativi, bensì da proporre a due "profili" di escursionisti molto distanti tra loro.



Figura 2 – Due percorsi con medesimo inizio e destinazione, idonei ad escursionisti con profilo molto differente.

Fattore motivazionale

L'interesse verso un percorso è, altresì, influenzato dal profilo culturale, psicologico ed esperienziali (numero di anni di pratica dell'escursionismo) dell'escursionista. Non sempre, infatti, l'escursionista intraprende un percorso perché intende raggiungere una qualche precisa destinazione. Egli potrebbe voler semplicemente passeggiare lungo uno specifico percorso per il paesaggio mozzafiato che esso offre, oppure per osservare la flora che lo circonda o la fauna che ci vive o ancora per "rivivere" vicende storiche del passato.

Fattore stagionale

Esso consente di tener conto di due aspetti complementari entrambi connessi con le stagioni. Il primo concerne gli eventuali cambiamenti di configurazione della rete sentieristica (ad esempio, d'inverno alcuni sentieri possono essere impraticabili per la presenza della neve - Fig.3); il secondo aspetto consente di variare la difficoltà dei percorsi con il periodo dell'anno (ad esempio, è frequente che un sentiero "facile" nel periodo estivo possa diventare per soli "esperti" nel periodo invernale). In questo secondo caso è evidente che nel ricercare un percorso da proporre all'escursionista occorrerà tener conto della "difficoltà" che quest'ultimo dovrà superare nell'effettuare l'itinerario oltre a dipendere dalle sue caratteristiche fisiche (fattore umano), risente anche del periodo dell'anno nel quale lo si effettua.



Figura 3 – Un esempio di percorso impraticabile in presenza di neve.

Tecnologie e metodi in uso: un cenno allo stato dell'arte

Le tecnologie e le tecniche di pianificazione di un'escursione disponibili vanno dall'uso della carta topografica (il metodo classico, di seguito richiamato per comodità di presentazione oltre che per completezza), all'impiego delle nuove tecnologie e strumenti, quali le carte digitali e i portali web di consultazione delle reti sentieristiche.

Il metodo classico: la carta topografica

Il metodo classico, basato sull'uso della carta topografica, è senz'altro quello che offre la massima autonomia e flessibilità all'escursionista. Il prezzo da pagare è, però, alto e si quantifica in esperienza e capacità tecniche richieste per adottarlo sia in fase di pianificazione a tavolino del percorso (ovvero, determinazione della lunghezza e del profilo altimetrico, nonché della quota s.l.m. e dislivello massimo da affrontare, oltre ai punti di interesse da raggiungere) che di sua successiva fruizione sul campo limitando il pericolo di perdersi (anche per i più esperti individuare sulla carta topografica la posizione ove ci si trova non sempre è banale). In altre parole, trattasi di una "strada" che non tutti possono percorrere, inoltre essa è lenta e con dei costi fissi iniziali (Tab.1) da sostenere per l'acquisto della carta topografica del territorio che interessa (le carte più utilizzate nell'escursionismo sono quelle a scala 1:25.000 dell'IGM oppure, le carte del CAI basate sulla cartografia IGM sulle quali vengono evidenziati i sentieri da loro gestiti), oltre che una bussola ed un altimetro.

	Numero carte	Costo (€)
Città di Rieti	1	9
Comune di Rieti	5	45
Provincia di Rieti	37	333
Regione Lazio	157	1.413
Italia	2298	20.682

Tabella 1 – Esempi di costi delle carte IGM.

Carta topografica vs. i fattori del dominio escursionistico

La valutazione dei fattori caratteristici del dominio escursionistico ricade sull'escursionista come chiarito nel seguito. Il fattore umano è ricavabile a posteriori, infatti dopo aver pianificato l'itinerario è possibile determinarne lunghezza e dislivello sfruttando il profilo altimetrico che si è costruito. Il fattore motivazionale è intrinseco nella pianificazione dell'itinerario da parte dell'escursionista che nel decidere il percorso sarà guidato dalle sue necessità e desideri. Il fattore stagionale, viceversa, è di difficile valutazione e presuppone una conoscenza diretta del territorio da parte dell'escursionista (oltre che delle informazioni meteo), diversamente egli è destinato ad andare incontro a delle sorprese, non necessariamente piacevoli.

Carte vettoriali dei sentieri

Le carte vettoriali dei sentieri sono una novità degli ultimi anni. Con esse si sta realizzando quanto già fatto con successo in ambito automobilistico. Garmin, ad esempio, commercializza dei navigatori GPS corredati di software gratuito (*BaseCamp*) e mappe territoriali a pagamento (ci si limita a segnalare la carta topografica vettoriale a 25.000 TrekMap Italia).

L'utilizzo di mappe vettoriali permette, in modo automatico e immediato, di:

- ottenere un percorso data la posizione di partenza e la destinazione;
- prendere visione delle informazioni descrittive del percorso (ovvero: lunghezza, dislivello, tempi di percorrenza, difficoltà, profilo altimetrico);
- ricercare luoghi geografici d'interesse tramite la funzionalità di ricerca.

Queste carte possono, inoltre, essere utilizzate sul campo durante l'escursione mediante due modalità principali:

- stampa della porzione di carta ove cade il percorso, per poi utilizzarla come carta topografica "classica";
- caricamento della carta-digitale sul dispositivo GPS compatibile della Garmin.

In sintesi, le mappe vettoriali costituiscono una soluzione che attrae gli escursionisti non esperti nell'utilizzo delle carte topografiche. Esiste al momento una severa limitazione di questa soluzione discendente dalla limitata copertura del territorio nazionale offerta. Ad esempio, le mappe offerte dalla Garmin coprono appena il 26% del territorio italiano, concentrato principalmente nel nord del Paese. Nelle zone non coperte da queste mappe è, ovviamente, impossibile progettare un percorso senza la preventiva raccolta diretta dei dati del terreno e l'utilità sul campo risulta ridotta alle sole potenzialità del dispositivo GPS.

Carte vettoriali vs. i fattori del dominio escursionistico

Anche questa soluzione non prende in considerazione i fattori caratteristici del dominio escursionistico nel costruire il percorso da proporre all'utente. Mediante il software messo a disposizione è possibile, a posteriori, valutare il fattore umano (viene infatti fornito, per ogni percorso, lunghezza e dislivello), mentre è impossibile valutare il fattore motivazionale e quello stagionale. Per gli escursionisti inesperti l'utilizzo di tale prodotto non è, dunque, consigliabile poiché non vi è alcuna certezza che il percorso proposto dal sistema incontri i suoi desiderata ed, inoltre, esso non abbia difficoltà superiore alle sue possibilità.

Portali web

La tendenza più recente consiste nella costruzione/esposizione di portali web dedicati all'escursionismo. Si segnalano i seguenti: Charta Itinerum, Sentieri Web, Rete sentieristica della Regione Piemonte, Millesentieri.

Charta Itinerum (<http://www.chartaitinerum.org/>)

Il portale (Fig.4) nasce dall'omonimo progetto finanziato dal piano d'iniziativa comunitaria Interreg IIIA Italia - Svizzera 2000-2006 e realizzato in collaborazione con il CAI, Regione Lombardia e la Direzione Generale Qualità dell'Ambiente della Regione Lombardia, per la produzione di mappe, guide e analoghi prodotti informatici, adatti all'escursionismo naturale e culturale.



Figura 4 – L'interfaccia grafica del portale Charta Itinerum.

Questo sistema si propone di coprire l'intera rete escursionistica Italiana anche se per il momento l'utilizzo è limitato a una porzione della sola Lombardia (le province di Sondrio, Como e Varese) per la cronica problematica della carenza di dati territoriali. Il cuore del portale è costituito dal

software denominato SIWGREGI (Sistema Informatico Web Gis della Rete Escursionistica Italiana). Il sito è ancora in formato beta nonostante il progetto risalgia al 2006 ed il cuore dello stesso, cioè il sistema SIWGREGI, risalgia addirittura al 2003. (Bonomelli et al., 2009) forniscono ragguagli circa recenti migliorie apportate all'architettura del sistema rispetto alla versione iniziale, in particolare si fa cenno all'adozione di prodotti software open source per la gestione dei dati (ovvero PostgreSQL/postGIS) congiuntamente alla progettazione/realizzazione di una base di dati spaziale, non presente inizialmente.

SIWGREGI vs. i fattori del dominio escursionistico

SIWGREGI consente di valutare il *fattore umano* a posteriori, infatti per ogni percorso esso propone un'efficace visualizzazione della sua lunghezza, quota minima-massima e profilo altimetrico. Analogo discorso si estende alla valutazione del *fattore motivazionale*, nel senso che dall'interfaccia del programma si desume che ai percorsi è abbinata una loro classificazione dal punto di vista: storico, architettonico, paesaggistico, naturalistico ed escursionistico. Va però osservato che la versione attuale del software manca di tali dati. Infatti dall'interfaccia (Fig.5) si desume che il valore di tali attributi è "INDEFINITO", ovvero sconosciuto.

Dati del percorso														
Acqua	Percorribilità	Lunghezza piana[m]	Lunghezza reale[m]	Quota iniziale [ms[m]	Quota finale [ms[m]	Pendenza media[°]	Tempo di andata [min]	Tempo di ritorno [min]	Difficoltà	Interesse storico	Interesse architettonico	Interesse paesaggistico	Interesse naturale	Interesse escursionistico
SI	INDEFINITO	20853	22707	1077	1097	-1,15	218	239	E	INDEFINITO	INDEFINITO	INDEFINITO	INDEFINITO	INDEFINITO

Comune				
Nome	Sito WEB	Tipo	Descrizione	Multimedia
Rifugio Bonacossa				
Rifugio Allievi				
Passo Di Cameraccio				
Bivacco Manzi				
Passo Val Torrone				
Baita Zocca				
Casera Zocca				
Valle Di Mello				
Casina Piana				
Ca' di Carna				
Panscer				
Rifugio Ponti				
Ca' del Rogni				
San Martino				

Strutture ricettive													
Nome	Sito WEB	Tipo	Caratteristica	Stato	Telefono	Multimedia	Gestione	Telefono gestore	Titolare	Telefono titolare	Periodo d'apertura	Posti letto	Cucina
		POSTI TAPPA										0	

TRATTE COMPONENTI					
1280	1207	1281	1504	1208	
[SQ]	[SQ]	[SQ]	[SQ]	[SQ]	

Figura 5 – Dettagli di un percorso.

Il *fattore stagionale* può essere parzialmente valutato, a posteriori, mediante il valore attribuito al parametro *Percorribilità* (Fig.5) che definisce il periodo temporale di percorribilità di un percorso. Sfortunatamente anche tali dati sono al momento mancanti.

Sentieri Web (<http://sentieriweb.regione.emilia-romagna.it/>)

Il portale presenta la rete sentieristica del territorio collinare e montano della regione Emilia Romagna, da Piacenza a Rimini. Sentieri Web nasce dal progetto dell'Emilia Romagna di rendere pubbliche ed usabili le informazioni risultanti da una campagna di rilievi sul territorio effettuati

nell'estate del 2001 al fine di incrementare il turismo escursionistico. Sentieri Web è stato messo in rete il 4 febbraio 2010. In Fig.6 è visibile la sua interfaccia grafica.

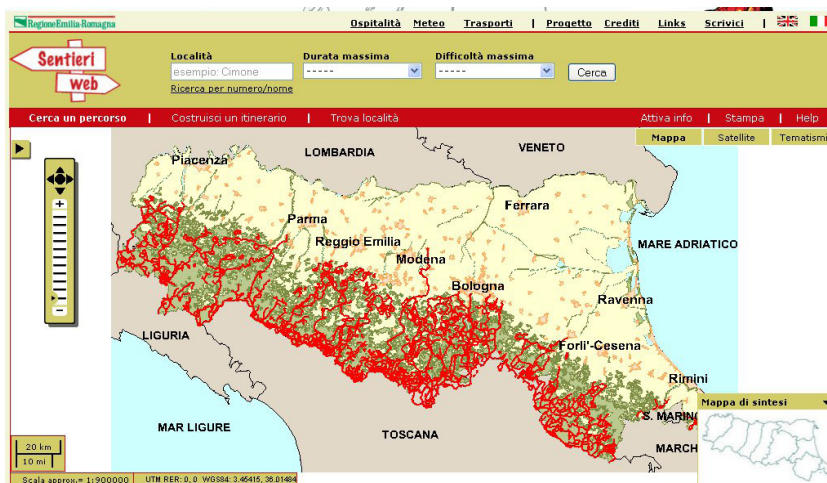


Figura 6 – Sentieri Web.

Gli escursionisti possono consultare gli itinerari disponibili e costruirne di personalizzati. Inserendo il nome della località di partenza e di arrivo, o selezionando i punti direttamente sulla carta, il sistema elaborerà automaticamente una serie di itinerari per ognuno dei quali viene specificata la difficoltà, la lunghezza espressa in metri, il tempo di percorrenza in andata e al ritorno, il dislivello in salita e discesa. Oltre agli itinerari, il sistema fornisce indicazioni pratiche utili per compiere il percorso, come ad esempio la presenza di strutture e rifugi, con informazioni sui recapiti e periodi di apertura, o la vicinanza a fermate di servizio di trasporto pubblico. Non manca l'opportunità di poter stampare estratti di mappa. Deciso l'itinerario è possibile, inoltre, scaricare il percorso in formato digitale da utilizzare su dispositivi portatili o palmari. Tre i formati offerti: GPX (per l'utilizzo con i sistemi di navigazione GPS), KML (per l'utilizzo con Google Maps/Earth) e SHP.

Sentieri Web vs. i fattori del dominio escursionistico

Il *fattore umano* può essere ricavato dalla lettura della lunghezza, del dislivello e della difficoltà tecnica del percorso dettagliati dal sistema per il percorso "proposto". Va segnalato che il sistema seleziona il percorso da proporre all'utente del portale tenendo in conto la durata massima (espressa in ore) e la difficoltà massima (secondo classificazione CAI) da lui segnalate: il fattore umano è quindi valutabile non soltanto a posteriori, ma anche a priori impostando i predetti valori-filtro. Per quanto riguarda i fattori motivazionale e stagionale, essi non sono presi in considerazione nella costruzione del percorso da proporre al richiedente, né valutabili a posteriori.

Rete sentieristica della regione Piemonte

(Giannetti et al., 2009) riferiscono circa un progetto in itinere della regione Piemonte per promuovere il turismo regionale. La finalità del progetto è nella raccolta dei dati dei sentieri (circa 3500, con uno sviluppo lineare complessivo di oltre 15000Km) e loro migrazione in una base di dati spaziale. Nell'articolo si legge anche di un contemporaneo e parallelo progetto di realizzazione di un webGIS nell'ambito di un portale rivolto tanto agli escursionisti che ai tecnici della Regione. Seguono alcuni commenti maturati dopo una sessione di interazione con il portale: <http://www.regione.piemonte.it/retesentieristica>.

Se, dalla homepage, si segue il link: *itinerari escursionistici*, quindi *itinerari in Piemonte*, appare l'elenco dei siti di riferimento (appena cinque) dei principali itinerari escursionistici presenti in Piemonte; appresso ci si sofferma sul "percorso Occitano" in quanto il relativo sito sembra più evoluto degli altri. La homepage che appare (<http://www.percorsioccitani.it/pagina.asp?id=12>) è quella della Fig.7.



Figura 7 – Homepage di percorsi Occitani.

E' sufficiente dedicare poco tempo all'esplorazione del portale per scoprire che esso espone 13 percorsi dei quali fornisce una descrizione testuale e fotografica. E' possibile, inoltre, avere la visualizzazione su mappa di tali percorsi in una visione d'insieme o singola. La Fig.8 mostra la "Prima tappa", ovvero il primo dei tredici.

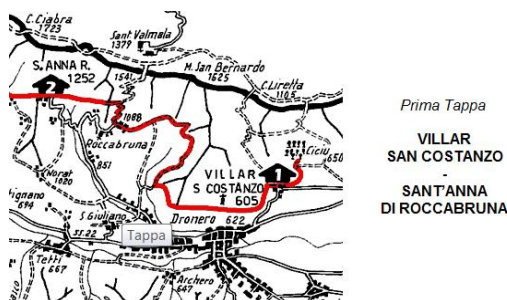


Figura 8 – Il percorso Occitano n.1.

A corredo della visualizzazione del percorso, il sito fornisce anche un breve descrizione verbale dello stesso, oltre a: punto di partenza (Ciciu di Villar - 605 m), arrivo (Sant'Anna di Roccabruna - 1252 m) e stima del tempo di percorrenza (5h).

Limiti della soluzione

Non viene fornita la lunghezza ed il profilo altimetrico dei percorsi. Non è consentito fare il download del percorso in qualcuno dei formati supportati dai comuni palmari per escursionisti. La decisione di quale percorso prendere ricade totalmente sulle spalle dell'escursionista. Assente ogni eventuale indicazione di pericolosità in relazione al periodo dell'anno nel quale si intende affrontare il percorso.

Millesentieri (<http://www.millesentieri.eu/>)

Le informazioni sui sentieri si possono ottenere con una ricerca testuale o con una ricerca su WebGIS. La ricerca testuale consente l'individuazione dei sentieri sulla base di criteri di ricerca quali area geografica, provincia, lunghezza, difficoltà, tempo di percorrenza. Il risultato della ricerca produce un elenco di sentieri caratterizzati da informazioni essenziali (comune, denominazione, lunghezza, difficoltà, tempo di percorrenza) ed il link per accedere alla scheda contenente ulteriori informazioni sul percorso.

Le schede dei percorsi differiscono a seconda del livello abbinato: esistono 3 livelli ai quali corrispondono tre differenti gradi di descrizione.

Il *livello 1* fornisce le informazioni essenziali quali lunghezza, durata, difficoltà, tipologia, partenza, arrivo, quota massima, quota minima e dislivello. Inoltre permette di individuare l'esatta posizione dei punti di partenza ed arrivo fornendo le coordinate geografiche, scaricabili anche mediante file *kml*, visualizzabile mediante GoogleEarth. Utile la cartografia di riferimento che risulta l'unico metodo di orientamento messo a disposizione dell'escursionista durante la passeggiata.

Il *livello 2* fornisce ulteriori informazioni quali fotografie e la cartografia del percorso.

Il *livello 3* fornisce informazioni dettagliate sui percorsi quali il profilo altimetrico, presenza di segnaletica, file in formato pdf di descrizione del percorso e punti di interesse lungo il percorso. E' anche possibile scaricare i file di waypoints concernenti i punti d'interesse.

La ricerca su WebGIS consente la visualizzazione di una mappa interattiva dell'Italia i cui strati di dati sono selezionabili dall'utente mediante il menù *Livelli* (Fig.9). È possibile visualizzare i sentieri ed i punti d'interesse. Selezionando un percorso, un punto d'interesse o un'area della mappa verrà visualizzata la tabella *Result*. Selezionando un percorso viene visualizzato il codice identificativo del percorso (Cod. Sentiero) e la lunghezza espressa in metri.

L'applicativo consente altresì di stampare e scaricare la mappa che però risulta inutilizzabile sul campo in quanto non fornisce punti di riferimento per l'orientamento né cartografia di fondo adeguata. Per l'orientamento sul campo non viene fornito alcun supporto, in quanto non è possibile scaricare il percorso in formato digitale (viene fornito soltanto il punto di arrivo e di partenza).

Mille sentieri vs. fattori del dominio escursionistico

Il *fattore umano* può essere ricavato valutando la lunghezza, il dislivello e la difficoltà tecnica del percorso. Questi parametri possono essere desunti dalla scheda di livello 1. Il portale permette di ricercare un percorso filtrandolo per durata, lunghezza e difficoltà (secondo classificazione CAI): il fattore umano è quindi valutabile non soltanto a posteriori ma anche a priori mediante la ricerca dei percorsi utilizzando i filtri citati. Il *fattore motivazionale* può essere ricavato dalla scheda di livello 1 mediante l'attributo *Tipologia*, che differenzia i percorsi come *Naturalistici*, *Storici*, etc.. Il *fattore stagionale* non viene preso in considerazione durante la pianificazione né valutabile a posteriori.

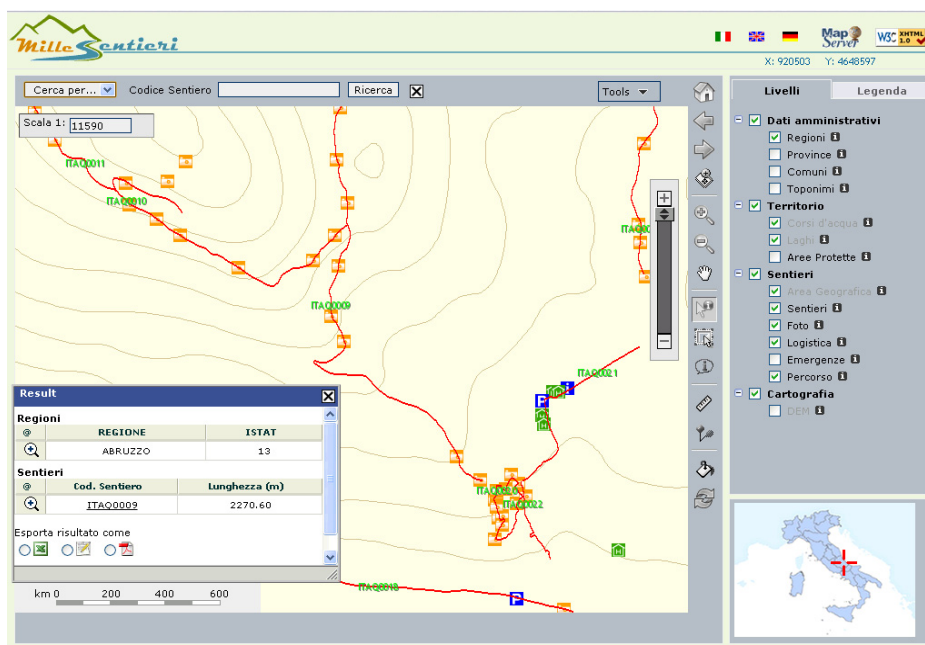


Figura 9 – Ricerca su WebGIS.

Considerazioni riepilogative

Si affida alla Tab.2 un confronto riepilogativo delle soluzioni attualmente in circolazione discusse in questa sezione.

	Metodo classico	Carta vettoriale	Portale web
Esempio	IGM 25DB	Garmin TrekMap Italia	Sentieri Web
Copertura (Italia)	100%	26%	Emilia Romagna
Sintesi itinerario	Complicata	Semplice	Semplice
Materiale sintesi itinerario	Penna, carta, righello	PC, <i>BaseCamp</i>	PC, browser
Utilizzo sul campo	Complicato	Semplice (GPS)	Semplice (GPS)
Materiale sul campo	Bussola, altimetro	GPS compatibile	GPS cartografico
Costo	€9 a carta	€199	Gratuito
Costo materiale aggiuntivo	€9 a carta	€199	Gratuito
Costo	€80 (circa)	€500 (circa)	€40 (circa)
Fattore umano	Valutabile da esperto	Parzialmente valutabile	Valutabile
Fattore motivazionale	Valutabile da esperto	Non valutabile	Non valutabile
Fattore stagionale	Non valutabile	Non valutabile	Non valutabile

Tabella 2 – Sintesi delle soluzioni discusse. Confronto con i fattori del dominio escursionistico.

In chiusura, si desidera ribadire che nessuna delle soluzioni richiamate tiene conto dei tre fattori propri del dominio escursionistico presi in esame nel presente articolo e che sono cruciali per poter pretendere di offrire all'utente del servizio web percorsi ritagliati sul suo "profilo" e alle sue motivazioni.

Lavoro restante

Il presente articolo ha presentato una sintetica rassegna critica circa le soluzioni software oggi disponibili a supporto degli amanti delle escursioni libere. Trattasi di un argomento rilevante stante che le soluzioni per esso auspicabili andrebbero collocate all'interno del contesto più ampio concernente l'assolvimento dell'obbligo da parte degli enti che operino sul territorio (in primis le Regioni) di dotarsi di strumenti di tipo GIS per la valorizzazione e, quindi, per il governo delle tante risorse paesaggistiche del nostro Paese. Non sorprende che le Regioni italiane si stiano mobilitando per attrezzarsi con soluzioni idonee in tal senso.

A conclusione di quanto sopra riassunto, si osserva che la realizzazione di portali web a supporto degli escursionisti va sostenuta da una contemporanea azione di reperimento di dati territoriali di qualità da archiviare in moderni e sicuri repository, senza i quali i primi non hanno ragion d'essere, né adeguata efficacia. Anche in questa direzione si registra grande fermento (si veda, ad esempio: (Pinto et al., 2009), (Plini et al., 2008)). Urge, altresì, dotarsi di un metodo cui affidare la costruzione di percorsi personalizzati, ovvero idonei all'utenza che è ampia e diversificata per cultura, età, sesso, ecc. L'articolo che accompagna e completa questo ("Sentieristica digitale: una proposta metodologica per confezionare percorsi su misura" – Adriani, Di Felice, reperibile su questi stessi Atti) avanza una proposta in tal senso pensata per colmare tale gap metodologico. Essa ha le sue basi nei tre fattori specifici del dominio escursionistico.

Bibliografia

Iacobellis F, Iovinelli R., Miraglia C., Napolitano P., "Millesentieri: il portale/webgis opensource dei sentieri per la promozione delle risorse naturalistiche, architettoniche e storico-archeologiche", *Atti ASITA*, L'Aquila 21-24 ottobre 2008, pp.1267-1273.

Addario S., "Un sistema WebGIS per la promozione del turismo", *Atti ASITA*, L'Aquila 21-24 ottobre 2008, pp.29-32.

Alessio G., Nappi R., Augusti V., "L'uso della cartografia digitale come base per la realizzazione di un SIT dedicato alle reti sentieristiche in Campania: esempi ed applicazioni", *Atti ASITA*, L'Aquila 21-24 ottobre 2008, pp.89-94.

Barricelli B.R., Maiellaro N., Padula M., Scala P. L., "Strumenti Open Source per la Pubblicazione in Rete di Informazioni Turistiche Personalizzate", *Atti ASITA*, L'Aquila 21-24 ottobre 2008, pp.287-292.

Scanu G., Podda C., "GIS, politiche territoriali, cartografia, paesaggi", *Atti ASITA*, Bari 1-4 dicembre 2009, pp. 1721-1730.

Giannetti et al., "La rete dei percorsi escursionistici della regione Piemonte", *Atti ASITA*, Bari 1-4 dicembre 2009, pp. 1139-141.

Pinto G., Fatta V., Comai G., "La cartografia tematica a servizio dello sviluppo e della valorizzazione del territorio: l'esempio di Arenzano e la sua rete sentieristica", *Atti ASITA*, Bari 1-4 dicembre 2009, pp. 1607-1614.

Plini P., De Santis V., Di Franco S., Salvatori R., Tondi G., "Integrazione tramite GIS e webGIS di dati ambientali e risorse naturali nel Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga", *Atti ASITA*, L'Aquila 21-24 ottobre 2008, pp.1663-1668.

Sentieristica digitale: una proposta metodologica per confezionare percorsi su misura

David Adriani, Paolino Di Felice

Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione, Università di L'Aquila,
Via G. Gronchi 18, campo di Pile, L'Aquila, Tel. 0862.434418, Fax 0862.434404,
adrianidavid@libero.it, paolino.difelice@univaq.it

Riassunto

L'articolo si concentra sulla sintesi "automatica" di itinerari da effettuare tenendo conto di tre fattori caratteristici del dominio escursionistico (ovvero: *umano*, *motivazionale* e *stagionale*). In esso si propone una soluzione innovativa del problema di individuare, per un generico escursionista un "pacchetto" di percorsi che meglio aderiscono al suo profilo e alle sue motivazioni. Questo articolo costituisce il completamento dell'articolo "Sentieristica digitale: metodi e tecnologie in uso" - Adriani, Di Felice, reperibile su questi stessi Atti.

Abstract

The article focuses on the automatic synthesis of routes taking into account the three characteristic factors of the excursionistic domain (i.e., *human*, *motivational*, and *seasonal*). An original solution is proposed of the problem to find out, for a generic excursionist, a set of routes that fits his profile and is motivation. This article complements "Sentieristica digitale: metodi e tecnologie in uso" - Adriani, Di Felice included in the same proceedings.

Contesto di riferimento e motivazioni

L'escursionismo è una forma di attività motoria basata sul camminare nel territorio lungo percorsi "riconoscibili" ma anche liberamente, ovvero al di fuori di tracciati facilmente "identificabili" sul terreno. Normalmente un'escursione si svolge in montagna o comunque in un ambiente naturale, e può essere accompagnata da attività naturalistiche quali l'osservazione di specie botaniche o faunistiche, la visita di monumenti o fenomeni naturali posti lungo il percorso.

Questo lavoro è rivolto alla crescente comunità di escursionisti che spinti dall'amore per la natura si trovano ciclicamente a dover affrontare il dilemma di quale percorso scegliere per la "prossima" escursione. L'obiettivo che ci si è prefisso è offrire supporto agli amanti delle escursioni in ambienti aperti nel decidere il percorso da intraprendere.

La proposta enucleata nel seguito prende le mosse dalla constatazione dell'assoluta inadeguatezza del paradigma dei navigatori satellitari per spostamenti sulla rete stradale. In tale contesto, infatti, la necessità prevalente del conducente/automobilista (implicitamente assunta dai prodotti in circolazione) è giungere a destinazione nel minor tempo possibile. Coerentemente, il navigatore stradale propone al conducente (senza concedergli alcun margine di negoziazione) il percorso più breve/rapido, scartando eventuali soluzioni alternative anche se esse potrebbero avere il pregio di far attraversare paesaggi più affascinanti oppure località di grande valore storico (Fig.1).



Figura 1– Due percorsi per andare a destinazione. Il navigatore sceglie sempre il più corto.

E' nostra convinzione che offrire adeguato supporto agli escursionisti da parte degli enti che operano sul territorio è una maniera diretta e concreta di valorizzare le enormi bellezze paesaggistiche dell'Italia. Tema, questo, molto sentito e già trattato in precedenti edizioni di ASITA (alcuni esempi: (Addario et al., 2008), (Alessio et al., 2008), (Barricelli et al., 2008), (Iacobellis et al., 2008)).

Di seguito si fa riferimento ad una soluzione architetturale software costituita da una base di dati dei sentieri, un sistema di gestione dotato di estensione spaziale che la governa ed uno strato software in grado di agevolare le operazioni di interazione con i dati (Fig.2). A questo livello della discussione è sufficiente fare riferimento a due categorie di utenti del sistema: il *gestore* e l'*escursionista*. Il primo facente parte della struttura che offre il servizio (comunità montana, comune, provincia, azienda autonoma, ...), il secondo un qualsiasi fruitore (attraverso interfaccia web) del servizio, previa registrazione al sito.

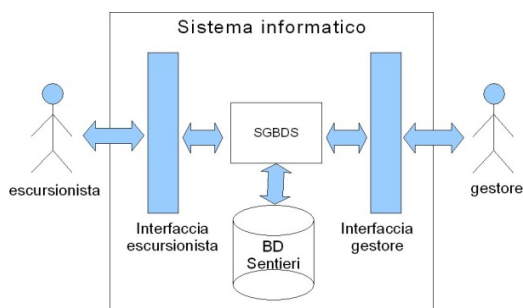


Figura 2 – Architettura della soluzione software.

Useremo ripetutamente il termine *percorso* inteso come una sequenza di “sentieri” tra loro contigui. A sua volta, per *sentiero* s'intende una strada a fondo naturale formatasi per effetto del passaggio di pedoni e di animali (Codice della strada, Art. 3, Comma 1, n.48).

Per gli escursionisti costituisce un arricchimento dei percorsi la presenza, lungo il medesimo, di *punti d'interesse*, ovvero di manufatti (struttura ricettiva, punto di ristoro, ...) o bellezze naturali (vetta montana, punto panoramico, ...).

Nell'articolo denoteremo con N ed M il numero totale dei percorsi (P) presenti nella base di dati (Fig.2) e degli escursionisti (E) registrati al servizio; mentre sarà arbitrario il numero dei punti d'interesse che pure fanno parte della base di dati. In sintesi, si ha che:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\} \text{ e } E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}.$$

Fattori peculiari del dominio escursionistico

Come accennato in precedenza, nel contesto escursionistico è impensabile riproporre l'approccio del dominio automobilistico nel ricercare la soluzione del problema di "matching" di cui sopra. La ragione è che la soluzione attuata per tale contesto non è soddisfacente perché non consente di tener conto dei tre fattori peculiari del contesto escursionistico illustrati di seguito, ovvero: *umano*, *motivazionale* e *stagionale*.

Fattore umano

Perché un itinerario da proporre all'escursionista possa essere considerato a lui idoneo occorre che nel ricercarlo si sia tenuto in conto delle sue caratteristiche fisiche (quali età, altezza, peso, sesso e preparazione fisica).

Fattore motivazionale

L'interesse verso un percorso è, altresì, influenzato dal profilo culturale, psicologico ed esperienziale (numero di anni di pratica dell'escursionismo) dell'escursionista. Non sempre, infatti, l'escursionista intraprende un percorso perché intende raggiungere una qualche precisa destinazione. Egli potrebbe voler semplicemente passeggiare lungo uno specifico percorso per il paesaggio mozzafiato che esso offre, oppure per osservare la flora che lo circonda o la fauna che ci vive o ancora per "rivivere" vicende storiche del passato.

Fattore stagionale

Esso consente di tener conto di due aspetti complementari entrambi connessi con le stagioni. Il primo concerne gli eventuali cambiamenti di configurazione della rete sentieristica (ad esempio, d'inverno alcuni sentieri possono essere impraticabili per la presenza della neve); il secondo aspetto consente di variare la difficoltà dei percorsi con il periodo dell'anno (ad esempio, è frequente che un sentiero "facile" nel periodo estivo possa diventare per soli "esperti" nel periodo invernale). In questo secondo caso è evidente che nel ricercare un percorso da proporre all'escursionista occorrerà tener conto della "difficoltà" che quest'ultimo dovrà superare nell'effettuare l'itinerario oltre a dipendere dalle sue caratteristiche fisiche (fattore umano), risente anche del periodo dell'anno nel quale lo si effettua.

Sintesi di itinerari: una proposta metodologica

Questo articolo si concentra sulla fase di sintesi "automatica" di itinerari da effettuare tenendo conto dei tre fattori del dominio escursionistico. In concreto, in esso si propone una soluzione innovativa del problema di individuare, per un generico escursionista $e \in E$, un "pacchetto" di percorsi che meglio aderiscono al suo profilo e alle sue motivazioni.

La difficoltà principale risiede nel dover trasformare le considerazioni *qualitative* raccolte nella Sezione precedente in *parametri quantitativi* da implementare in un sistema informatico cui delegare la sintesi di uno o più percorsi da restituire all'escursionista, cui spetta la scelta finale. E' altresì opportuno sottolineare che i parametri quantitativi da individuare andranno abbinati tanto ai percorsi che agli escursionisti. Ciò equivale a definire due spazi 3D (detti, nell'ordine, lo *spazio dei percorsi* e lo *spazio degli escursionisti*) le cui dimensioni prendono i nomi dai tre fattori del dominio escursionistico. Di seguito ci si concentra su questo aspetto chiarendone i risvolti non necessariamente ovvi a questo punto della trattazione.

Dimensione umana

Aver adottato questa denominazione equivale ad aver posto al centro dell'attenzione l'escursionista che si desidera "servire". Evidentemente si poteva optare per dare nomi distinti a tale dimensione a seconda che ci si muoveva nello spazio degli escursionisti o in quello dei percorsi. Lo si è evitato per non causare inutili appesantimenti.

Utilizzeremo il parametro S (forzo) (espresso in chilometri) per quantificare questa dimensione.

Nello spazio dei percorsi, la quantificazione di S la si ottiene relazionandolo alle caratteristiche di lunghezza e dislivello del percorso. In concreto, ci si basa su di una regola empirica che utilizzano gli escursionisti per calcolare il tempo di percorrenza di un itinerario: occorrono 15 minuti per percorrere, ad andatura sostenuta, 1 chilometro di strada pianeggiante ai quali vanno aggiunti ulteriori 15 minuti ogni 100 metri di dislivello in salita. E' quindi possibile stimare lo sforzo complessivo (S_p) del percorso p come segue:

$$S_p = L_p + D_p/100$$

dove L_p (espresso in chilometri) è la lunghezza piana del percorso e D_p (espresso in metri) è il dislivello in salita.

Per quanto riguarda lo spazio del escursionista, la dimensione umana viene quantificata dallo sforzo massimo sostenibile dal soggetto (S_e) calcolato tenendo conto dei suoi parametri caratteristici (età, altezza, peso, sesso ed allenamento) come segue:

$$S_e \begin{cases} = 0.8 \times \overline{S_i} & N_e = 0 \\ = K_r \times \overline{S_r} + K_i \times \overline{S_i} & N_e > 0 \end{cases}$$

dove N_e è il numero di escursioni effettuate negli ultimi 12 mesi, $\overline{S_r}$ è lo sforzo medio reale sostenuto ad ogni escursione, $\overline{S_i}$ è lo sforzo medio ideale sostenibile ad ogni escursione, K_r e K_i sono delle costanti. $\overline{S_r}$ viene calcolato tramite l'equazione:

$$\overline{S_r} = ST_r / N_e = \sum_{k=1}^{N_e} S_r(k) / N_e$$

dove ST_r è lo sforzo totale sostenuto dall'escursionista, pari alla somma degli sforzi da lui sostenuti nelle singole escursioni delle N_e già effettuate negli ultimi 12 mesi.

$\overline{S_i}$ viene calcolato con l'equazione:

$$\overline{S_i} = (V_s \times V_e \times V_a \times V_b) \times S_i$$

dove V_s , V_e , V_a e V_b sono, nell'ordine, la variabile legata al sesso, all'età, all'allenamento e al benessere fisico; mentre S_i è lo sforzo ideale massimo a escursione che un'escursionista riesce a sostenere in un giorno lungo un ipotetico percorso piano. La finalità di questa formula è quella di adeguare (accrescendolo o riducendolo) il valore di S_i alle caratteristiche dell'escursionista.

Riassumendo, la dimensione umana è quantificata mediante il valore del parametro S : lo spazio degli escursionisti è descritto dal valore di S_e , mentre lo spazio dei percorsi è descritto mediante il valore di S_p . Pertanto, un escursionista con fattore umano pari a $Fu(e) = S_e$ può percorrere itinerari caratterizzati da fattore umano $Fu(p) = S_p$ tali che:

$$S_p \leq S_e$$

Per poter valutare la precedente disequazione, occorre instanziare i fattori (variabili e costanti) che compaiono nelle formule proposte per modellare la dimensione umana. Di seguito si esplicita un'ipotesi basata, prevalentemente, sull'esperienza degli autori nel dominio del problema affrontato.

Le costanti K_r , K_i ed S_i

La Tab.1 propone dei valori per tali costanti.

K_r	K_i	S_i
0.6	0.4	24

Tabella 1– I valori delle costanti della dimensione umana.

Dai valori di K_r e K_i si evince che lo sforzo S_e dipende per il 60% dallo sforzo medio reale ($\overline{S_r}$) e per il 40% dallo sforzo medio ideale ($\overline{S_i}$). Lo sforzo ideale S_i è posto pari a 24km, valore desunto utilizzando una regola empirica secondo la quale ogni 15 minuti si percorre 1km di strada pianeggiante ed ogni ora di passeggiata occorre fare una pausa di 15 minuti. Ipotizzando che un escursionista, in un giorno, possa passeggiare dalle 9:00 alle 17:00 si hanno a disposizione 8 ore alle quali vanno sottratte le pause. Si ha, quindi, un totale di 6 ore utili di passeggiata, nelle quali è possibile percorrere circa 24km.

Variabile V_s

$$V_s \begin{cases} = 1, & \text{per escursionista femmina} \\ = 1.1, & \text{per escursionista maschio} \end{cases}$$

A seconda che l'escursionista sia *femmina* o *maschio*, si assume che egli possa sostenere uno sforzo esattamente pari a S_i ($V_s=1$), oppure possa superare tale valore del 10% ($V_s=1.1$).

Variabile V_e

$$V_e \begin{cases} = 1.1 \times e^{-(età-25)^2/300}, & \text{per età} < 21 \\ = 1.1 \times e^{-(età-25)^2/2500}, & \text{per età} \geq 21 \end{cases}$$

La funzione è articolata in due tronconi a cavallo del valore di età pari a 21 anni, con massimo per età=25 (Fig.3). Prima e dopo di tale picco, V_e decresce.

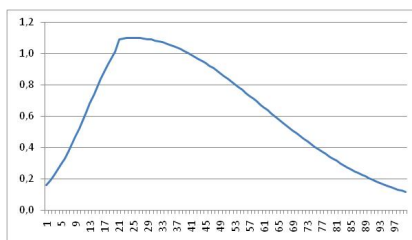
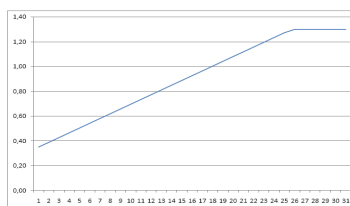


Figura 3 – La variabile V_e .

Variabile V_a

$$V_a \begin{cases} = (N_e/26) + 0.35, & \text{per } N_e < 24 \\ = 1.3, & \text{per } N_e \geq 24 \end{cases}$$

Figura 4 – Andamento della funzione V_a .

La variabile V_a assume valori crescenti con l'aumentare del valore di N_e , per poi saturare sul valore 1.3 (Fig.4). La scelta di questo andamento è basata sulla considerazione che lo stato di forma di un escursionista migliora quanto più escursioni egli effettua. Si è valutato che un escursionista che compie almeno due escursioni al mese sia in grado di sostenere uno sforzo superiore del 30% rispetto a quello ideale.

Variabile V_b

V_b tiene conto di quel che abbiamo chiamato benessere fisico dell'escursionista connesso allo sforzo massimo che egli può affrontare senza che il suo organismo ne soffra. La considerazione di fondo è che lo sforzo massimo sostenibile da un soggetto sovrappeso (o sottopeso) debba essere inferiore a quello affrontabile da uno il cui peso è nella "norma". Per valutare lo stato fisico di un escursionista si è deciso di utilizzare l'Indice di Massa Corporea (IMC) definito come:

$$IMC = \text{peso} / \text{altezza}^2$$

dove il *peso* è espresso in chilogrammi e l'*altezza* in metri, e di mettere poi in relazione il valore di IMC con quanto proposto dall'Organizzazione Mondiale della Sanità e riassunto nella Tab.2 (http://it.wikipedia.org/wiki/Indice_di_massa_corporea).

IMC	Situazione
< 18.5	Sottopeso
tra 18.5 e 24.9	Peso normale
tra 25 e 29.9	Sovrappeso
tra 30 e 34.9	Obesità livello I
tra 35 e 39.9	Obesità livello II
> 40	Obesità livello III

Tabella 2 – Stato nutrizionale di un individuo.

Sulla base di quanto detto, la variabile V_b è definita come segue:

$$V_b = \begin{cases} 1.1 \times e^{-(IMC-22)^2/40}, & \text{per } IMC < 18.5 \\ 1.1 \times e^{-(IMC-22)^2/100}, & \text{per } IMC \geq 18.5 \end{cases}$$

L'andamento di tale funzione è mostrato in Fig.5.

Un esempio

La Tab.3 riporta alcuni valori dello sforzo medio ($\bar{S}_i$) calcolati, a partire dallo sforzo ideale (S_i), applicando quanto proposto sopra. A parziale commento della Tab.3, ci si limita ad osservare la distanza che esiste, rispetto allo sforzo medio sostenibile (41.0 vs. 9.3), tra due soggetti di

medesimo sesso (maschio) ed analogo IMC (22 vs. 19), ma con forte differenza di età (25 vs. 60) ed attitudine allo sforzo (26 vs. 5).

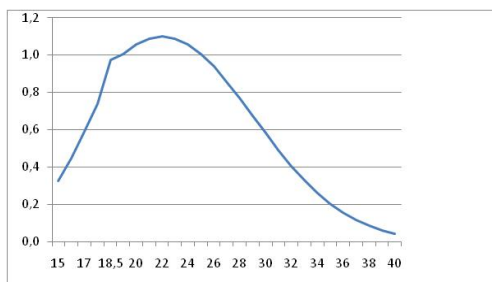


Figura 5 – Andamento della variabile V_b .

Si ipotizza l'insieme dei percorsi

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$$

le cui caratteristiche sono riportate nella Tab.4

Sesso	Età	N_e	IMC	$\bar{S}_i$
Maschio	25	26	22	41.0
Femmina	7	0	13	0.6
Maschio	75	10	24	5.7
Femmina	50	0	27	6.8
Maschio	60	5	19	9.3

Tabella 3 – Esempi di calcolo di $\bar{S}_i$ per soggetti con caratteristiche differenti.

P	L_p	D_p	S_p
p_1	22.0	500	27,0
p_2	3.0	100	4,0
p_3	0.5	0	0.5
p_4	8.0	50	8.5

Tabella 4 – Esempio di caratteristiche dei percorsi.

Si ipotizza, inoltre, un generico escursionista e con le seguenti caratteristiche:

$S_i = 10.5$, $ST_r = 90$ e $N_e = 10$. Utilizzando le formule definite in precedenza si calcola lo sforzo medio reale ($S_r = 9$) ed infine lo sforzo sostenibile dall'escursionista ($S_e = 9.6$).

All'escursionista e verranno proposti i percorsi p_2 , p_3 e p_4 ma non p_1 .

Dimensione motivazionale

Anche al nome dato a questa dimensione si applica la medesima motivazione data per la precedente. Questa dimensione identifica (nello spazio degli escursionisti) le motivazioni del escursionista nel ricercare il “prossimo” percorso, mentre (nello spazio dei percorsi) esso identifica gli attributi descrittivi delle peculiarità di ciascun percorso.

Sia:

$$Fm = \{fm_1, fm_2, \dots, fm_l\}$$

l'insieme di tutte le possibili motivazioni perché un un generico escursionista possa voler percorrere un qualche itinerario.

Ad un generico percorso (p) va abbinato l'insieme $Fm(p)$ di attributi descrittivi, tale che:

$$Fm(p) \subseteq Fm$$

Analogamente, ad un generico escursionista (e) va associato un insieme di valori ($Fm(e)$) che ne specificano le motivazioni nel voler fare l'escursione. Evidentemente le esigenze di e saranno soddisfacenti se accade che:

$$Fm(e) \subseteq Fm$$

Noti gli insiemi $Fm(e)$ ed $Fm(p)$, si ha che il percorso p è idoneo all'escursionista e se e solo se:

$$Fm(e) \subseteq Fm(p)$$

Un esempio

Le ipotesi:

$$Fm = \{\text{vetta, naturalistico, storico, religioso}\}$$

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\},$$

$$Fm(p_1) = \{\text{vetta, naturalistico}\}, \quad Fm(p_2) = \{\text{storico}\},$$

$$Fm(p_3) = \{\text{religioso, storico}\}, \quad Fm(p_4) = \{\text{vetta, religioso}\}.$$

Si ipotizzi, infine, che l'escursionista e sia interessato ad un itinerario *storico*, ovvero $Fm(e) = \{\text{storico}\}$. Ne discende che ad e è corretto proporre gli itinerari p_2 , e p_3 , ma non p_1 né p_4 .

Dimensione stagionale

La dimensione stagionale definisce la difficoltà *intrinseca* (detta anche *tecnica*) di un percorso in relazione al periodo dell'anno. Per raggiungere la finalità di correlare il fattore stagionale all'escursionista e al percorso occorre definire i seguenti insiemi:

- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_J\}$: l'insieme dei periodi in cui si suddivide l'anno solare. Possibili granularità sono le stagioni, i mesi, le settimane;
- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_K\}$: l'insieme delle classi di difficoltà. Ogni classe c definisce una differente scala di valutazione della difficoltà;
- $D(c) = \{d_1, d_2, \dots, d_W\}$: l'insieme dei valori di difficoltà tecnica che caratterizzano la classe di difficoltà $c \in C$. Le difficoltà sono collegate tra loro secondo la relazione d'ordine $d_1 < d_2 < \dots < d_W$.

Il valore che definisce la dimensione stagionale rispetto ad un percorso è costituito dalla tripla $fs_p = \langle t_p, c_p, d_p \rangle$ dove:

- $d_p \in D(c_p)$ definisce la difficoltà tecnica del percorso p rispetto alla classe $c_p \in C$,
- $t_p \in T$ esplicita il periodo in cui l'itinerario è percorribile con difficoltà $d_p \in c_p$.

Ad un itinerario p sono abbinabili al più J triple, una per ogni periodo di tempo. Se esistono periodi di tempo nei quali un itinerario non è percorribile (ad esempio perché nella zona si svolgono delle manifestazioni agonistiche), allora ad esso per quel periodo non andrà abbinata alcuna difficoltà.

All'escursionista e è invece abbinato il valore costituito dalla coppia $fs_e = \langle c_e, d_e \rangle$ che definisce la difficoltà tecnica massima $d_e \in D(c_e)$ affrontabile dall'escursionista per la classe $c_e \in C$. Ad un escursionista sono abbinabili al più W coppie, una per ogni classe di difficoltà.

Per la scelta dei percorsi idonei all'escursionista e è necessario che costui fornisca il periodo t_e nel quale vuole effettuare l'escursione, con il vincolo che t_e debba avere granularità pari a quella dell'insieme T al fine di evitare che il periodo da lui scelto si trovi a "cavallo" tra due periodi contigui aventi, rispetto al percorso, difficoltà tecniche differenti. Dati l'escursionista e ed il periodo

t_e in cui egli vuole affrontare l'escursione, si ha che l'itinerario p è a lui idoneo se e solo se una delle triple fs_p abbinate all'itinerario p è tale che:

$$t_p = t_e; c_p \in C(e); d_p \leq d_e.$$

Un esempio

Le ipotesi:

$$T = \{Gen, Feb, Mar, Apr, Mag, Giu, Lug, Set, Ott, Nov, Dic\},$$

$$C = \{SenzaNeve, ConNeve\},$$

$$D(SenzaNeve) = \{F, M, D, MD\},$$

$$D(ConNeve) = \{PI, CI\}.$$

La classe *SenzaNeve* esprime la difficoltà tecnica del percorso mediante la scala $D(SenzaNeve)$ che suddivide i percorsi in facili (F), medi (M), difficili (D) e molto difficili (MD). La classe *ConNeve* esprime la difficoltà del percorso mediante la scala $D(ConNeve)$ che suddivide i percorsi in parzialmente innevato (PI) e completamente innevato (CI). I valori di difficoltà tecnica sono legati tra di loro dalle seguenti relazioni:

$$F < M < D < MD; \quad PI < CI.$$

Sia $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$, con:

$$Fs(p_1) = \{\dots, \langle Mar, ConNeve, CI \rangle, \dots\},$$

$$Fs(p_2) = \{\dots, \langle Mar, ConNeve, PI \rangle, \dots\},$$

$$Fs(p_3) = \{\dots, \langle Mar, SenzaNeve, M \rangle, \dots\},$$

$$Fs(p_4) = \{\dots, \langle Feb, ConNeve, PI \rangle, \langle Apr, SenzaNeve, M \rangle, \dots\},$$

evidentemente la cardinalità di $Fs(p_1), \dots, Fs(p_4)$ è ≤ 12 .

Si ipotizzi, infine, un escursionista e con fattore stagionale pari a:

$$Fs(e) = \{\langle SenzaNeve, D \rangle, \langle ConNeve, PI \rangle\}$$

che vuole effettuare un'escursione nel periodo di *Marzo*.

Per costui saranno idonei i percorsi attivi nel periodo di *Marzo*, sia di classe *SenzaNeve* che *ConNeve* con difficoltà tecnica al più uguale a D oppure CI , nell'ordine. Si ha, quindi, che soltanto i percorsi p_2 e p_3 sono proponibili ad e . L'itinerario p_1 va scartato avendo esso difficoltà maggiore di quella massima affrontabile dall'escursionista, mentre il percorso p_4 non è percorribile a *Marzo*.

Determinazione della classe dei percorsi idonei per l'escursionista

Calcolati:

$$- (Fu(p), Fm(p) \text{ e } Fs(p)) \quad \forall p \in P \text{ e}$$

$$- Fu(e), Fm(e) \text{ e } Fs(e),$$

l'insieme dei percorsi da proporre all'escursionista e lo si desume valutando le condizioni seguenti:

$$(Fu(p) \leq Fu(e) \wedge Fm(p) \supseteq Fm(e) \wedge Fs(p) \subseteq Fs(e)) \quad (\forall p \in P).$$

Tecnologie e metodi in uso: un cenno allo stato dell'arte

Le tecnologie e le tecniche di pianificazione di un'escursione disponibili vanno dall'uso della carta topografica (il metodo classico), all'impiego delle nuove tecnologie e strumenti, quali le carte digitali e i portali web di consultazione delle reti sentieristiche. Per ragioni di spazio in questa breve sezione ci si limiterà ad esprimere una valutazione di ciascuna di dette "strade" rispetto all'approccio enucleato nel presente articolo, assumendo che il lettore ASITA sia confidente con esse (ipotesi alquanto verosimile).

Carta topografica vs. i fattori del dominio escursionistico

La valutazione dei fattori caratteristici del dominio escursionistico ricade sull'escursionista come chiarito nel seguito. Il fattore umano è ricavabile a posteriori, infatti dopo aver pianificato l'itinerario è possibile determinarne lunghezza e dislivello sfruttando il profilo altimetrico che si è costruito. Il fattore motivazionale è intrinseco nella pianificazione dell'itinerario da parte dell'escursionista che nel decidere il percorso sarà guidato dalle sue necessità e desideri. Il fattore stagionale, viceversa, è di difficile valutazione e presuppone una conoscenza diretta del territorio da parte dell'escursionista (oltre che delle informazioni meteo), diversamente egli è destinato ad andare incontro a delle sorprese, non necessariamente piacevoli.

Carte vettoriali dei sentieri

Con esse si sta realizzando quanto già fatto con successo in ambito automobilistico. Garmin, ad esempio, commercializza da qualche anno dei navigatori GPS corredati di software gratuito (*BaseCamp*) e mappe territoriali a pagamento.

Carte vettoriali vs. i fattori del dominio escursionistico

Anche questa soluzione non prende in considerazione i fattori caratteristici del dominio escursionistico nel costruire il percorso da proporre all'utente. Mediante il software messo a disposizione è possibile, a posteriori, valutare il fattore umano (viene infatti fornito, per ogni percorso, lunghezza e dislivello). Mentre è impossibile valutare il fattore motivazionale e quello stagionale. Per gli escursionisti inesperti l'utilizzo di tale prodotto non è, dunque, consigliabile poiché non vi è alcuna certezza che il percorso proposto dal sistema incontri i suoi desiderata ed, inoltre, esso non abbia difficoltà superiore alle sue possibilità.

Portali web

La tendenza più recente consiste nella costruzione/esposizione di portali web dedicati all'escursionismo. Se ne segnalano tre tra i più rappresentativi: Charta Itinerum (Bonomelli et al., 2009), Sentieri Web, Millesentieri (Iacobellis et al., 2008). Nel seguito ci si concentra su Sentieri Web, assolutamente rappresentativo della categoria.

Sentieri Web (<http://sentieriweb.regione.emilia-romagna.it/>)

Il portale (messo in rete il 4 febbraio 2010) presenta la rete sentieristica del territorio collinare e montano della regione Emilia Romagna, da Piacenza a Rimini. Gli escursionisti possono consultare gli itinerari disponibili e costruirne di personalizzati. Inserendo il nome della località di partenza e di arrivo, o selezionando i punti direttamente sulla carta, il sistema elaborerà automaticamente una serie di itinerari per ognuno dei quali viene specificata la difficoltà, la lunghezza espressa in metri, il tempo di percorrenza in andata e al ritorno, il dislivello in salita e discesa. Oltre agli itinerari, il sistema fornisce indicazioni pratiche utili per compiere il percorso, come ad esempio la presenza di strutture e rifugi, con informazioni sui recapiti e periodi di apertura, o la vicinanza a fermate di servizio di trasporto pubblico. Non manca l'opportunità di poter stampare estratti di mappa. Deciso l'itinerario è possibile, inoltre, scaricare il percorso in formato digitale da utilizzare su dispositivi portatili o palmari. Tre i formati offerti: GPX (per l'utilizzo con i sistemi di navigazione GPS), KML (per l'utilizzo con Google Maps/Earth) e SHP.

Sentieri Web vs. i fattori del dominio escursionistico

Il *fattore umano* può essere ricavato dalla lettura della lunghezza, del dislivello e della difficoltà tecnica del percorso dettagliati dal sistema per il percorso "proposto". Va segnalato che il sistema

seleziona il percorso da proporre all'utente del portale tenendo in conto la durata massima (espressa in ore) e la difficoltà massima (secondo classificazione CAI) da lui segnalate: il fattore umano è quindi valutabile non soltanto a posteriori, ma anche a priori impostando i predetti valori-filtro. Per quanto riguarda i fattori motivazionale e stagionale, essi non sono presi in considerazione nella costruzione del percorso da proporre al richiedente, né valutabili a posteriori.

Considerazioni riepilogative

Si affida alla Tab.5 un confronto riepilogativo delle soluzioni menzionate in questa sezione.

	Metodo classico	Carta vettoriale	Portale web
Esempio	IGM 25DB	Garmin TrekMap Italia	Sentieri Web
Copertura (Italia)	100%	26%	Emilia Romagna
Sintesi itinerario	Complicata	Semplice	Semplice
Materiale sintesi itinerario	Penna, carta, righello	PC, <i>BaseCamp</i>	PC, browser
Utilizzo sul campo	Complicato	Semplice (GPS)	Semplice (GPS)
Materiale sul campo	Bussola, altimetro	GPS compatibile	GPS cartografico
Costo	€9 a carta	€199	Gratuito
Costo materiale aggiuntivo	€9 a carta	€199	Gratuito
Costo	€80 (circa)	€500 (circa)	€40 (circa)
Fattore umano	Valutabile da esperto	Parzialmente valutabile	Valutabile
Fattore motivazionale	Valutabile da esperto	Non valutabile	Non valutabile
Fattore stagionale	Non valutabile	Non valutabile	Non valutabile

Tabella 5 – Sintesi delle soluzioni discusse. Confronto con i fattori del dominio escursionistico.

In chiusura, si desidera ribadire che nessuna delle soluzioni richiamate tiene conto dei tre fattori propri del dominio escursionistico presi in esame nel presente articolo e che secondo noi sono cruciali per poter pretendere di offrire all'utente del servizio web percorsi ritagliati sul suo "profilo" e alle sue motivazioni.

Lavoro restante

Onde completare la ricerca riassunta nel presente lavoro, rimangono da compiere alcuni importantissimi passi richiamati brevemente di seguito. Innanzitutto trattasi di migrare il metodo di calcolo dei percorsi da proporre agli escursionisti registrati al servizio proposto in questo articolo in uno schema Entity-Relationship *minimale* nel quale dovranno trovare posto entità quali *Percorso*, *Escursionista*, *PuntoInteresse*, *FattoreStagionale* e *FattoreMotivazionale*.

Trattasi, poi, di passare dallo schema concettuale alla corrispondente base di dati spaziale da implementare in qualcuno dei SGBD relazionali dotati di estensione spaziale in commercio (Di

Felice e Pomante, 2006). Quindi, occorre procedere al popolamento della stessa. Costituisce un momento complesso e delicato il caricamento della tabella dei percorsi la quale implica una ineludibile fase di acquisizione sul campo, tramite strumentazione GPS adeguata, della loro “geometria” nonché di quella dei punti d’interesse.

Si tratterà, poi, di predisporre un repertorio di queries SQL attraverso le quali avviare la sperimentazione del sistema realizzato e con esso la validazione della sua implementazione, prima, e “messa a punto” del modello proposto, poi.

La verosimiglianza dei risultati derivabili dall’apparato formale proposto consente di esprimere generale soddisfazione circa la plausibilità della modellazione ipotizzata. Evidentemente, una valutazione pienamente consapevole del modello la si potrà dare solo a valle di una sua approfondita validazione costruita su un sufficiente lasso di tempo di utilizzo del servizio da parte di un cospicuo numero di soggetti.

Bibliografia

Bonomelli M., Brescianini M., Vassena G., Vedovelli M., “Chartaltinerum - Il webGIS della rete sentieristica italiana”, *Atti ASITA*, Bari 1-4 dicembre 2009, pp.463-467.

Iacobellis F., Iovinelli R., Miraglia C., Napolitano P., “Millesentieri: il portale/webgis opensource dei sentieri per la promozione delle risorse naturalistiche, architettoniche e storico-archeologiche”, *Atti ASITA*, L’Aquila 21-24 ottobre 2008, pp.1267-1273.

Addario S., “Un sistema WebGIS per la promozione del turismo”, *Atti ASITA*, L’Aquila 21-24 ottobre 2008, pp.29-32.

Alessio G., Nappi R., Augusti V., “L’uso della cartografia digitale come base per la realizzazione di un SIT dedicato alle reti sentieristiche in Campania: esempi ed applicazioni”, *Atti ASITA*, L’Aquila 21-24 ottobre 2008, pp.89-94.

Barricelli B.R., Maiellaro N., Padula M., Scala P. L., “Strumenti Open Source per la Pubblicazione in Rete di Informazioni Turistiche Personalizzate”, *Atti ASITA*, L’Aquila 21-24 ottobre 2008, pp.287-292.

Di Felice P., Pomante L., “Integration of spatial data types and operators into relational DBMSs: a survey”, *In Proc. of the IADIS Inter. Conf. on Applied Computing 2006*, San Sebastian, Spain, 25-28 February 2006, pp.702-705.

Il contributo dell'object-based image analysis nell'estrazione di vigneti a copertura plastica

Antonello Aiello

Politecnico di Bari, Via Orabona 4, 70125 Bari
E-mail: aiello.antonello@gmail.com

Riassunto

In questo lavoro sono state sperimentate un insieme di procedure *object-based* indirizzate all'estrazione di vigneti a copertura plastica, attraverso la classificazione di raggruppamenti di *pixel* omogenei secondo attributi sia spettrali che geometrici e morfologici, quali fattore di scala, colore, forma, compattezza, tessitura. Le elaborazioni sono state effettuate su dati multi temporali ad alta risoluzione geometrica, aerei e provenienti dal sensore GeoEye-1, in un'area di studio in provincia di Taranto, fra i comuni di Ginosa e Palagiano, in prossimità della costa ionica. Infine è stata verificata l'accuratezza delle informazioni ricavate, mettendo in luce le problematiche relative al processo di estrapolazione del dato.

Abstract

In this work we have tested a set of object-based procedures aimed to plastic-covered vineyards extraction, using spectral, spatial and morphological attributes of groups of pixels (such as scale, shape, colour, smoothness, compactness), from both very high spatial resolution airborne and GeoEye-1 data, on a test area located between Ginosa and Palagiano (Taranto, Italy), close to the Ionian sea. Finally, it has been verified the accuracy of the information obtained, highlighting the problems related to the data-extraction process.

Introduzione

L'ampia diffusione di coperture in materiale plastico nella conduzione dei vigneti ha determinato conseguenze negative sul bilancio idrogeologico dei suoli di vaste estensioni di territorio agricolo pugliese, oltre ad un significativo peggioramento della qualità visiva del paesaggio rurale e naturale (Canora et al., 2008; Picuno et al., 2011). Questi fenomeni costituiscono fattori peggiorativi per una regione come la Puglia, fra le più esposte, in Italia, a fenomeni di alterazione dei suoli.

Al fine di affrontare e monitorare questo fenomeno, diviene essenziale una cartografia di dettaglio. L'estrazione di vigneti coperti con teli plastici da immagini ad alta risoluzione spaziale rappresenta un'ottima soluzione, che richiede lo sviluppo di nuove procedure di analisi e di interpretazione dei dati.

Esistono due principali approcci alla classificazione di immagini telerilevate: la classificazione *pixel-oriented* e la classificazione *object-oriented* (Blaschke et al., 2004). Nel più diffuso approccio alla classificazione, il cosiddetto *pixel-based approach*, l'unità base di classificazione è costituita dal singolo *pixel*. Dato che oggetti differenti sulla superficie terrestre riflettono o emettono radiazione elettromagnetica in maniera differente a causa delle diverse proprietà chimico-fisiche, questi oggetti possono essere riconosciuti sull'immagine telerilevata attraverso la classificazione del comportamento spettrale di ogni singolo *pixel* (Crocetto & Tarantino, 2009).

Questo approccio diventa inefficiente quando *pixel* appartenenti ad oggetti differenti hanno risposte spettrali simili (Tarantino, 2004). Questo inconveniente può essere superato attraverso l'approccio *object-oriented*. In questo caso l'immagine viene segmentata in gruppi di *pixel* omogenei per

caratteristiche spettrali e di forma, colore, compattezza, tessitura, etc. Questi gruppi omogenei di *pixel* (denominati oggetti o segmenti), e non più i singoli *pixel*, costituiscono gli elementi base per la classificazione, assegnando ad ogni oggetto un valore di appartenenza ad una classe compreso fra 0 ed 1, attraverso tecniche *fuzzy* (Benz et al., 2004; Caprioli & Tarantino, 2006; Blaschke, 2010).

Nel presente lavoro, che costituisce il primo tassello di un più ampio studio, è stato sperimentato l'approccio *object-oriented* e tutte le elaborazioni sono state effettuate utilizzando il software Trimble eCognition 8.64.1.

Dati e metodi

La Figura 1 mostra l'area di studio in provincia di Taranto, fra i comuni di Ginosa e Palagiano, in prossimità della costa ionica. Trattasi di una zona caratterizzata da forte vocazione agricola, con ampia diffusione di vigneti coltivati con la tradizionale tecnica a *tendone*, un sistema di coltivazione della vite che ne prevede la copertura integrale con teli in plastica. Altre colture ortofrutticole (ad esempio kiwi, olive, etc.) sono ampiamente diffuse (Picuno et al., 2011). All'interno della più ampia area di studio, è stata considerata un'area test più piccola di circa 3 km², di dimensioni 2400 x 1200 m circa.

Le elaborazioni sono state effettuate su dati multi temporali ad alta risoluzione geometrica: una ortofoto ed un'immagine provenienti dal sensore GeoEye-1. L'ortofoto è stata acquisita nel 2006, utilizzando la camera fotogrammetrica digitale Z/I Imaging DMC della Intergraph, a colori e con fotogrammi con risoluzione a terra di circa 20 cm. E' stata inquadrata nel sistema di riferimento UTM WGS84 - ETRS89 fuso 33N e ricampionata per una risoluzione di 50 cm dal Sistema Informativo Territoriale della Regione Puglia (Regione Puglia, 2011). Per l'estrazione dei tendoni da immagine satellitare è stato utilizzato un dato acquisito il 7 aprile 2010 dalla piattaforma GeoEye-1, con risoluzione di 2 m (GeoEye, 2010).

Dati sul campo (*ground truth*) sono stati raccolti durante il sopralluogo realizzato in data 3 aprile 2011, utilizzati sia per l'individuazione di *training samples* sia per la valutazione dell'accuratezza delle procedure di estrazione dei tendoni.

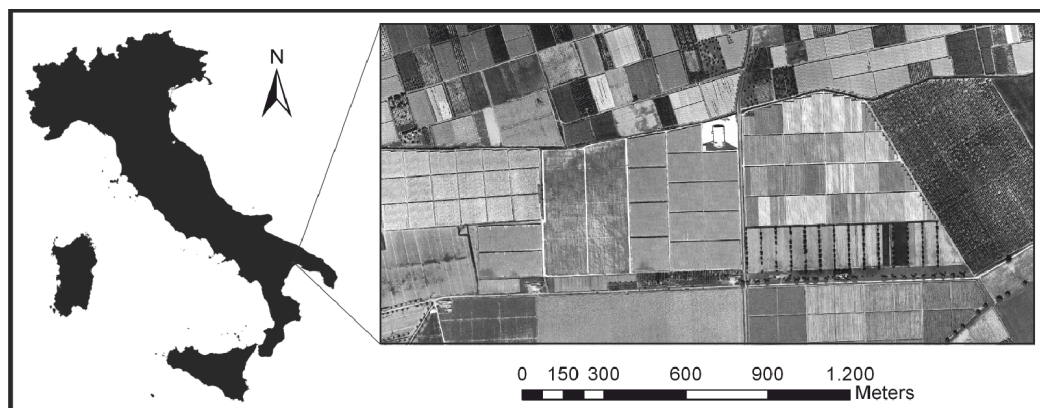


Figura 1 – Area di studio.

Sono 3 le fasi che contraddistinguono l'analisi *object-based*: 1) la segmentazione dell'immagine; 2) la classificazione dell'immagine; 3) la verifica dell'accuratezza della classificazione.

La tecnica denominata *multi-resolution segmentation* è stata impiegata per la suddivisione dell'immagine in oggetti. Si tratta di un algoritmo di tipo *bottom-up* che, partendo da un singolo *pixel*, raggruppa quelli adiacenti in maniera iterativa, secondo il duplice criterio di minimizzazione dell'eterogeneità e massimizzazione dell'omogeneità dei *pixel*. L'algoritmo parte da un singolo *pixel*, quindi crea raggruppamenti sempre più grandi, fino ad un limite superiore di omogeneità.

Questo criterio di omogeneità è definito come una combinazione di omogeneità spettrale e di forma, ed è influenzato dal parametro di scala. Valori più elevati del parametro di scala determinano segmenti di dimensioni maggiori e viceversa. Data l'elevata regolarità dei lotti agricoli che caratterizzano l'area di studio, sono stati individuati per comparazione visiva i parametri di segmentazione ottimali al fine di ottenere oggetti quanto più rappresentativi della realtà a terra. Sia per l'ortofoto che per il dato satellitare, i parametri impiegati sono stati i seguenti:

$$\psi = 100; w_{colour} = 0.5; w_{shape} = 0.5; w_{smoothness} = 0.5; w_{compactness} = 0.5$$

dove ψ è il parametro di scala e w_{colour} , w_{shape} , $w_{smoothness}$, $w_{compactness}$ sono i pesi rispettivamente per i fattori di colore, forma, regolarità e compattezza nel processo di raggruppamento dei *pixel*. Con questi parametri sono stati ben identificati i confini dei tendoni.

Per quanto riguarda l'analisi sull'ortofoto del 2006, l'estrazione dei vigneti a copertura plastica è avvenuta mediante l'uso del *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI), con *membership function* mostrata in Figura 2 (Gitelson et al., 2002). I valori di soglia della *membership function* sono stati ricavati sperimentalmente da una preventiva analisi dei valori dei *pixel* dell'immagine.

$$VARI = (Green - Red) / (Green + Red - Blue) \quad [1]$$

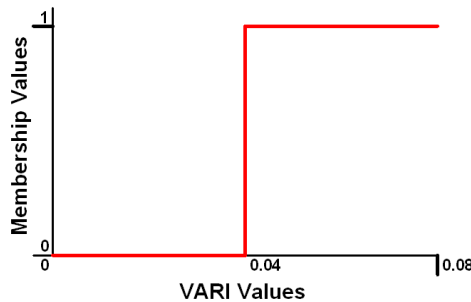


Figura 2 – VARI membership function.

Una seconda procedura è stata adottata per realizzare l'estrazione dei tendoni dal dato aereo, attraverso l'utilizzo dello strumento *Feature Space Optimization* (FSO) implementato nel software eCognition. Il FSO permette di identificare la migliore combinazione di *features*, fra quelle implementate nel software e che caratterizzano i vari aspetti morfologici, geometrici, spettrali, tessiturali, etc. dei gruppi di *pixel*, sulla base di *training samples* preventivamente selezionati sull'immagine segmentata e per ciascuna classe definita (Trimble, 2011). Nel caso in esame sono state definite le classi *vineyards*, *bare soils*, *vegetation and trees*. Queste *features*, attraverso il *nearest neighbour algorithm*, ed in congiunzione con il VARI, hanno permesso la classificazione dell'immagine.

La stessa procedura, ma senza l'utilizzo del VARI, è stata applicata anche al dato satellitare GeoEye-1. In Figura 3, Figura 4 e Figura 5 sono mostrati i risultati delle 3 procedure sperimentate.



Figura 3 – Estrazione dei tendoni su ortofoto con l'utilizzo del solo VARI.

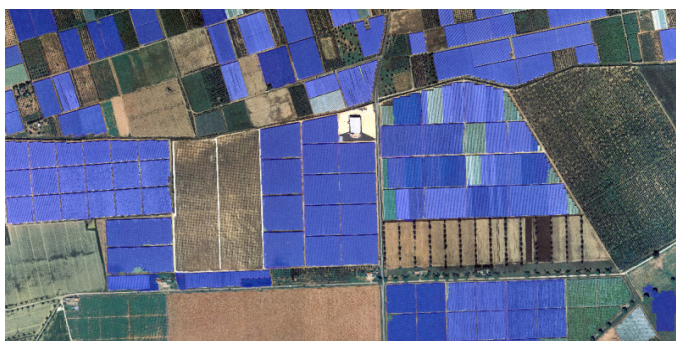


Figura 4 – Estrazione dei tendoni su ortofoto con l'utilizzo del FSO in combinazione con il VARI.



Figura 5 – Estrazione dei tendoni su dato GeoEye-1 con l'utilizzo del FSO.

Risultati e conclusioni

La Tabella 1 mostra l'accuratezza delle tre procedure, misurata mediante lo strumento TTA Mask (*Test and Training Area Mask*) che compara il risultato della classificazione con *ground truth test areas*. L'utilizzo del VARI nell'analisi del dato aereo ha permesso l'estrazione speditiva di un notevole numero di vigneti a copertura plastica, peraltro senza la selezione di *training sample* e senza la necessità di informazione multi spettrale, dato che l'indice VARI è definito unicamente tramite i canali RGB dell'immagine aerea. Un altro vantaggio significativo è rappresentato dalla possibilità di utilizzare set di dati in gran parte disponibili. L'utilizzo del FSO, all'interno del software eCognition, ha permesso l'individuazione della migliore combinazione di *features* per

l'estrazione dei tendoni, applicando il *nearest neighbour algorithm*, senza l'introduzione di ulteriori *thresholds*.

	Orthophoto with only the VARI membership function without training sample selection	Orthophoto classified with the VARI membership function and the nearest neighbour algorithm	GeoEye-1 classified with nearest neighbour algorithm
Producer's Accuracy Vineyard Class	0.89	0.90	0.91
User's Accuracy Vineyard Class	0.64	0.99	0.90
Overall Accuracy	0.78	0.96	0.91
KIA	0.56	0.91	0.82

Tabella 1 – Accuracy assessment: prospetto riassuntivo.

Grazie all'approccio *object-based* e ad una buona segmentazione iniziale, i tendoni sono direttamente disponibili in forma poligonale, quindi aree potenzialmente vulnerabili a causa di una ampia diffusione di coperture plastiche a scopi agricoli potrebbero immediatamente essere analizzate mediante l'ausilio di strumenti GIS.

Per soddisfare varie esigenze agricole, sono diversi i materiali utilizzati per la copertura dei vigneti. Al fine di valutare gli effetti delle coperture artificiali sull'infiltrazione delle precipitazioni meteoriche, ulteriori studi saranno necessari per la differenziazione dei vari materiali tramite immagine telerilevate.

Ringraziamenti

L'autore è grato alla Prof.ssa Eufemia Tarantino per la preziosa collaborazione.

Riferimenti bibliografici

- Benz U. C., Hofmann P., Willhauck G., Lingenfelder I., Heynen M. (2004), "Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58: 239-258.
- Blaschke T., Burnett C., Pekkarinen A. (2004), "Image Segmentation Methods for Object-Based Analysis and Classification", in de Jong S. M., van der Meer F. D. (Eds.), *Remote Sensing Image Analysis. Including the Spatial Domain*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, the Netherlands, 211-236.
- Blaschke T. (2010), "Object-based image analysis for remote sensing", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65: 2-16.
- Canora F., Fidelibus, M. D., Sciortino A., Spilotro G. (2008), "Variation of infiltration rate through karstic surfaces due to land use changes: A case study in Murgia (SE-Italy)", *Engineering Geology*, 99: 210-227.
- Caprioli M., Tarantino E. (2006), "Identification of land cover alterations in the Alta Murgia National Park (Italy) with VHR satellite imagery", *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 1, (without pagination).
- Crocetto N., Tarantino E. (2009), "A class-oriented strategy for features extraction from multitemporal satellite imagery", *Remote Sensing*, 1 (4): 1171-1189.
- GeoEye (2010), *GeoEye-1 Fact Sheet*, <http://www.geoeye.com>, accessed on March 21st, 2011.
- Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Stark R., Rundquist D. (2002), "Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction", *Remote Sensing of Environment*, 80: 76-87.

Picuno P., Tortora A., Capobianco R. L. (2011), "Analysis of plasticulture landscapes in Southern Italy through remote sensing and solid modelling techniques", *Landscape and Urban Planning*, 100: 45-56.

Regione Puglia, *Sistema Informativo Territoriale*, <http://www.sit.puglia.it/>, accessed on March 21st, 2011.

Tarantino E. (2004), "Land cover classification of Quickbird multispectral data with an object-oriented approach", *Management Information Systems*, 125-34.

Trimble (2011), *eCognition Developer 8.64.1. Reference Book*, Trimble Documentation, Munich, Germany.

Un sistema integrato per la mappatura automatica di immagini IR su scansioni laser di edifici

Mario Ivan Alba, Luigi Barazzetti, Elke Di Flumeri,
Mattia Previtali, Elisabetta Rosina, Marco Scaioni

Politecnico di Milano, Dip. B.E.S.T., P.za Leonardo da Vinci 32, Milano
<mario.alba, luigi.barazzetti, diflumeri, elisabetta.rosina, marco.scaioni>@polimi.it
mattia.previtali@mail.polimi.it

Riassunto

L'articolo illustra una procedura per la mappatura di immagini IR su facciate di edifici rilevate con tecnologia laser scanning terrestre. A differenza delle metodologie normalmente impiegate in questa tipologia di applicazioni, che si basano in genere sulla stima di una trasformazione omografica oppure utilizzano un orientamento indipendente tramite *space resection*, l'approccio proposto è basato su un sistema "bi-camera" che consiste in una termocamera IR associata ad una camera digitale RGB. Le immagini RGB sono poi utilizzate per la stima dei parametri di orientamento del sistema stereo mediante una compensazione del blocco a stelle proiettive, da cui si ricava l'orientamento esterno delle immagini termiche. Il sistema è stato testato per l'analisi di alcuni edifici del Politecnico di Milano a supporto dei lavori di restauro delle facciate.

Abstract

This paper presents a methodology able to map a block of thermal images on 3D models created with terrestrial laser scanning. The method stands out from other approaches (mainly based on homography or space resection techniques) for the acquisition device adopted. Indeed, data acquisition is accomplished by a "bi-camera" system incorporating an IR thermal camera and a RGB camera. The processing pipeline is based on a bundle adjustment with the RGB images only. Then the RGB exterior orientation parameters are transferred to the IR images according to the relative calibration of the "bi-camera" system. The method was tested on different buildings of Politecnico di Milano, where a restoration project of facades is currently in progress.

1. Analisi di edifici con immagini IR

Le immagini termografiche IR sono oggi ampiamente utilizzate per l'analisi dello stato di conservazione degli edifici in quanto capaci di evidenziare, tramite lo studio delle anomalie termiche presenti sugli oggetti, eventuali difetti strutturali. In Maldague (2001) e Lagüela et al. (2011) sono riportati numerosi casi pratici che non si limitano al solo settore delle costruzioni (con esempi che includono anche la diagnostica degli strati di isolamento termico ed il monitoraggio delle tubazioni), ma anche applicazioni mediche o sportive, di pubblica sicurezza, gli studi sugli animali, ecc. In questo articolo sono riportati anche alcuni risultati preliminari ottenuti con immagini all'infrarosso vicino (NIR) che, a differenza delle immagini riprese nell'infrarosso termico, vengono acquisite con camere operanti su lunghezza d'onda più corte (comprese generalmente tra $0,75\div 1,4\text{ }\mu\text{m}$) e sono principalmente utilizzate per l'identificazione della vegetazione e del suo stato di salute (Alba et al., 2011).

Lo scopo di questo lavoro è lo sviluppo di una procedura per la mappatura di immagini termografiche su modelli 3D di edifici che consenta di valutare, a livello globale, lo stato di

conservazione della struttura. Il metodo può essere considerato come una ispezione dell'oggetto che non richiede il contatto fisico con lo stesso, finalizzata all'estrazione delle principali caratteristiche relative, oltre alle proprietà geometriche, anche ai materiali che lo compongono e il loro stato attuale di conservazione. E' sin da subito importante ribadire come, al fine di soddisfare i requisiti necessari per una corretta analisi termica a cui va associata una ricostruzione geometrica accurata, la fase di acquisizione dei dati (immagini IR, RGB, NIR e scansioni laser) deve essere correttamente pianificata.

L'ispezione termografica di edifici tramite tecnologia IRT (*Infrared Thermography*) si basa sullo studio del flusso di calore che attraversa l'edificio. La temperatura risulta funzione del flusso e può fornire informazioni di rilievo riguardanti i vari strati che compongono l'oggetto. Il calore si trasferisce rapidamente attraverso gli strati con una elevata coesione e/o con maggiore diffusività termica. Differenze e discontinuità nei valori di temperatura causate dalle proprietà termiche intrinseche di oggetti quali mattoni, legname, rocce, malte, ecc., possono essere visualizzate tramite l'ispezione degli strati più esterni, che sono generalmente intonacati sia per la protezione degli stessi che per fattori estetici. Qualsiasi delaminazione dello strato protettivo modifica il trasferimento di calore aggiungendo una propria componente a quella del segnale dovuto all'involucro dell'edificio.

Il grande vantaggio di una analisi IRT riguarda la possibilità di eseguire analisi non distruttive, senza richiedere il contatto diretto con l'oggetto ed evitando quindi il posizionamento di ponteggi o altre piattaforme (ad esempio cestelli elevatori o trabattelli) che permetterebbero all'utente di raggiungere le zone di interesse. Il campo di temperatura rilevato varia generalmente tra $-20 \div 100$ °C, che corrisponde a lunghezze d'onda (calcolabili tramite la legge di Wien $\lambda = 2897,8/T$) comprese tra $7,7 \div 11,4$ μm . Ciò implica che il sensore della termocamera deve essere in grado di rilevare dati nello spettro *Long Wave IR*. Tale intervallo di valori, unitamente ai parametri dell'ottica utilizzata (focale f e diametro di apertura D), causa un diametro del *disco di diffrazione* (calcolabile come $d = 2,44 \lambda k$, dove $k = f/D$) che, se nel caso di una comune camera RGB permette di avere una dimensione del pixel di pochi micrometri di lato, corrisponde ad almeno $30\text{-}50$ μm nel caso di camere termiche.

Le termocamere utilizzate oggi si basano su due tecnologie differenti che impiegano *thermal* oppure *quantum detectors*. Nel primo caso i sensori commerciali hanno una sensitività di circa $\pm 0,1$ K e sensori a bassa risoluzione geometrica da 320×240 pixel (dal costo di poche migliaia di euro) sino a un massimo di 1280×960 pixel (con costi nettamente superiori). Nel secondo caso risultano invece estremamente efficaci qualora sia necessario acquisire dati caratterizzati da una maggiore sensitività oppure con frequenze di acquisizione molto elevate. Il principale svantaggio della seconda tipologia di sensori è legato alle ingombranti dimensioni dello strumento con un impiego pratico non sempre semplice.

Al fine di rendere una camera termica utilizzabile per scopi fotogrammetrici è necessaria una preliminare *calibrazione* (Remondino e Fraser, 2006) per la stima dei parametri di orientamento interno e dei coefficienti di distorsione (Gianinetto et al., 2005). Siccome queste camere non sono sviluppate per applicazioni di tipo metrico, essendo l'attenzione soprattutto posta su problematiche relative alla sola calibrazione radiometrica, spesso la distorsione geometrica dell'immagine raggiunge valori notevoli. Le camere termiche impiegate in questo lavoro seguono il modello geometrico a prospettiva centrale, e possono pertanto essere calibrate tramite le normali procedure fotogrammetriche. Il modello di correzione della distorsione impiegato è quello di "Brown" con 8 parametri (distanza principale, posizione del punto principale, 3 coefficienti di distorsione radiale e 2 di distorsione tangenziale), stimabili utilizzando una serie di immagini di un opportuno poligono di calibrazione. L'oggetto deve avere una tessitura tale da consentire la collimazione dei punti di controllo (ad esempio dei chiodi fissati ad un pannello di legno che ripresi durante la fase di irraggiamento solare diventano chiaramente visibili, come proposto in Gianinetto et al., 2005). La stima delle incognite viene condotta tramite una compensazione del blocco che può includere anche punti di appoggio oppure può basarsi su un *free-network adjustment* (Granshaw, 1980). Il blocco

deve comprendere immagini convergenti con rotazioni della camera attorno al proprio asse ottico in modo tale da ridurre le correlazioni tra i valori incogniti. In Figura 1 sono proposti alcuni poligoni utilizzati per la calibrazione di differenti camere termiche, dove è evidente l'effetto di distorsione che se non correttamente rimosso potrebbe deteriorare la qualità del modello *texturizzato*. L'immagine 3D (d) che riporta la posizione dei punti oggetto e della camera durante la ripresa evidenzia come non sia semplice l'acquisizione di immagini molto convergenti, essendo lo strumento sicuramente meno maneggevole di una tradizionale camera RGB.

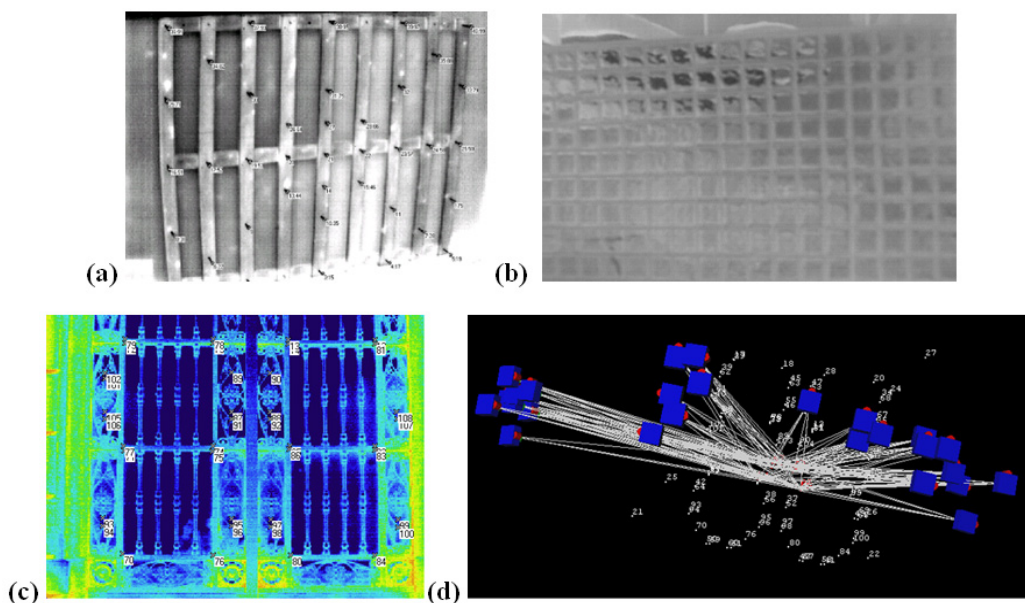


Figura 1 – Alcune immagini di poligoni di calibrazione utilizzati nel caso di immagini IR.

2. Integrazione di immagini IR e modelli 3D di edifici

La maggior parte delle termocamere IR ha una risoluzione geometrica modesta (es. 640×480 pixel) se comparata con quella delle moderne camere RGB, anche se risulta tuttavia sufficiente per l'analisi termografica delle facciate di edifici. Un passaggio fondamentale al fine di semplificare l'interpretazione dei risultati (che in genere si basa sull'analisi dei gradienti di temperatura da parte dell'operatore) riguarda l'equalizzazione preliminare dei dati, che può essere intesa come l'individuazione dell'intervallo di temperatura tale da evidenziare al meglio le anomalie. Siccome questa operazione è relativamente semplice, la tecnica IRT sta diventando sempre più popolare tra i professionisti del settore, sebbene un certo livello di competenza tecnica sia sempre necessario nell'interpretazione dei risultati.

Nel caso di strutture complesse con dimensioni notevoli l'uso delle singole immagini IR (in alcuni casi svariate decine o centinaia) potrebbe non essere sufficiente e l'analisi va dunque estesa in modo tale da considerare l'oggetto nel suo insieme. Una possibile soluzione è data dalla texturizzazione di un modello 3D ottenuto da rilievi o disegni esistenti, oppure generato ex novo con metodi fotogrammetrici o tramite scansione laser.

Se l'oggetto può essere scomposto in porzioni aventi una geometria prevalentemente bidimensionale, la mappatura si riduce alla semplice stima di una serie di *omografie* (Liebowitz e Zisserman, 1998) e alla successiva *mosaicatura* delle immagini raddrizzate. In tal caso, una

possibile soluzione si basa sull'uso di punti doppi (almeno 4) tra le immagini IR e il modello dell'oggetto. E' bene notare come spesso non sia immediato individuare gli stessi particolari tra immagini RGB (o scansioni laser) ed immagini termiche, con problematiche che assumono una importanza fondamentale quando sono impiegate termocamere con teleobiettivi (spesso necessarie per raggiungere elementi lontani dal piano calpestabile). L'angolo di vista potrebbe essere così stretto da non fornire il numero minimo di punti per la stima dei coefficienti dell'omografia.

Un approccio generale, quindi in grado di gestire anche situazioni 3D, si basa invece sull'uso di tecniche fotogrammetriche. Come è noto, le *equazioni di collinearità* (Luhmann et al., 2006) esprimono una relazione matematica tra i punti immagine ed i corrispondenti punti oggetto. L'elaborazione indipendente di ciascuna immagine può essere condotta tramite *space resection*, che fornisce i parametri di orientamento esterno senza tuttavia considerare eventuali punti di legame tra le diverse immagini. In alternativa, l'uso della DLT (Abdel-Aziz e Karara, 1971) semplifica queste operazioni offrendo un modello di tipo lineare tramite una trasformazione proiettiva che dipende da 11 parametri. In entrambi i casi è essenziale la conoscenza di alcuni punti doppi immagine-oggetto. Tuttavia, come già citato, l'analisi indipendente di ogni singola immagine presenta numerosi svantaggi. Il metodo innanzitutto risulta piuttosto laborioso, in quanto necessita della collimazione manuale di tutti i punti. Inoltre, la tessitura delle immagini termiche potrebbe risultare insufficiente e non fornire il numero minimo di punti per la stima dei coefficienti della trasformazione. Infine, un'analisi indipendente delle immagini porta ad una serie di discontinuità nelle aree di sovrapposizione.

In questo lavoro viene descritta una procedura in grado di risolvere alcune delle problematiche prima introdotte. Per quanto riguarda la generazione del modello 3D, essa viene eseguita, come già spiegato, tramite rilievi fotogrammetrici o laser scanning. In entrambi i casi il risultato finale è un modello poligonale che potrà poi essere *texturizzato* con le immagini IR, oltre che con quelle RGB o NIR. L'orientamento delle immagini acquisite con la termocamera non viene condotto tramite *space resection* o DLT, ma si basa sull'uso di un sistema "bi-camera" dove la camera termica è resa solidale ad una tradizionale camera digitale RGB mediante una barra metallica. Tale sistema deve essere preventivamente calibrato in modo tale da determinare l'assetto reciproco delle due camere. Inoltre, i singoli sensori devono essere individualmente calibrati per la determinazione dei parametri di orientamento interno e di distorsione. La ripresa dei dati avviene poi tramite coppie di immagini di cui vengono elaborate esclusivamente le RGB con una tradizionale compensazione a stelle proiettive del blocco, partendo da una serie di punti di legame e di appoggio. L'angolo di vista della camera RGB è nettamente superiore a quello della termocamera ed offre quindi ricoprimenti sufficienti all'orientamento del blocco. I parametri di orientamento esterno stimati per la sola camera RGB saranno poi trasferiti alla camera termica conoscendo la calibrazione del sistema. Il vantaggio fondamentale riguarda l'uso delle sole immagini RGB che presentano una migliore tessitura, un abbracciamento dell'oggetto maggiore e la possibilità di eseguire misure più precise dei punti immagine.

In aggiunta, in questo lavoro viene anche proposta una *texturizzazione* dell'edificio basata su immagini NIR riprese con una comune reflex digitale adattata in modo da acquisire anche immagini all'infrarosso vicino (per maggiori dettagli si veda Alba et al., 2011). La camera impiegata è una Nikon D100 a cui è stato rimosso il filtro NIR, poi sostituito da uno trasparente. Tale camera può essere montata sul laser scanner impiegato (Riegl LMS-Z420i) e quindi rende più semplice l'operazione di *texture mapping*, essendo nota la posizione relativa tra i due sensori. E' inoltre possibile acquisire anche immagini NIR indipendenti dallo strumento *laser scanner*, sebbene l'integrazione con il rilievo laser richiederà il calcolo dell'orientamento di ciascuna immagine RGB a partire dai punti di appoggio e di legame.

In questo lavoro verranno mostrati due casi studio ove è in corso un progetto di ristrutturazione. Gli edifici sono il Rettorato e l'edificio denominato "Trifoglio" del Politecnico di Milano.

3. Acquisizione ed elaborazione delle immagini

Alcuni dei sistemi bi-camera utilizzati sono visibili nelle Figure 2a e 2b. In Figura 2c si riporta il laser scanner impiegato su cui, come già detto, può essere installata una camera Nikon D100 RGB o NIR.

La barra di appoggio utilizzata nel sistema “bi-camera” ha una lunghezza di circa 45 cm e viene in genere posta su treppiede fotografico con testa rotante a 360°. La camera RGB impiegata è una Nikon D80 con obiettivi grandangolari (in genere con focale da 20 mm). L’orientamento delle immagini RGB può essere condotto secondo differenti modalità, che includono le tradizionali collimazioni manuali dei punti di legame, oppure mediante metodi automatici quali quelli basati su target codificati (Fraser et al., 2005) oppure su algoritmi *feature-based matching* (FBM) tramite il modulo di orientamento automatico ATiPE (Barazzetti et al., 2010). In queste applicazioni spesso alcune porzioni della facciata non possono essere raggiunte facilmente ed i target possono essere raramente utilizzati. Nel caso delle misure basate sulle tecniche FBM invece va considerata una particolare geometria del blocco, con basi di presa più corte e angoli tra immagini consecutive abbastanza contenuti.

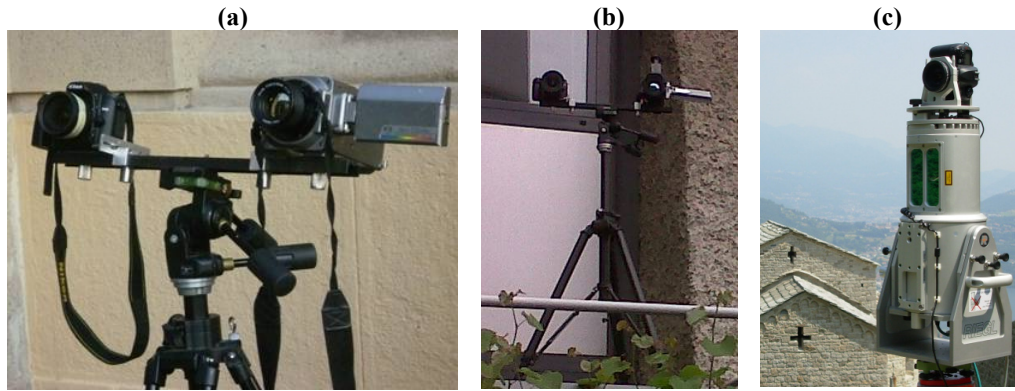


Figura 2 – Due tipologie di sistemi “bi-camera” (a-b) ed il laser scanner Riegl LMS-Z420i usato.

I parametri di orientamento esterno delle camere sulla barra possono essere espressi tramite le rispettive matrici di rotazione ($\mathbf{R}_{RGB}$, $\mathbf{R}_{IR}$) ed i vettori con i centri di presa ($\mathbf{X}_{0RGB}$, $\mathbf{X}_{0IR}$) riferiti a un sistema di riferimento solidale con l’oggetto ripreso. Lo scopo della barra è ovviamente quello di fornire una posizione relativa stabile nel tempo tra i due sensori. In particolare, la matrice di rotazione relativa tra questi due può essere scritta come:

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{R}_{RGB}^T \mathbf{R}_{IR} \quad (1)$$

$\mathbf{R}^*$ rimane costante quando il sistema stereo viene traslato o ruotato e può essere determinata tramite una calibrazione del sistema. La stima è basata sulla ripresa di una serie di immagini in cui vi siano punti facilmente riconoscibili sia nel visibile che nell’infrarosso. Inoltre, se la barra ha un sistema di smontaggio e riposizionamento stabile nel tempo tramite perni che vincolano la rotazione attorno alla vite di attacco, la procedura di calibrazione potrà essere condotta solo una volta e ripetuta nel caso risultasse necessario verificarne la stabilità nel tempo.

Il secondo vincolo imposto dalla barra riguarda i centri di presa. Sebbene la lunghezza della base $\|\mathbf{X}_{0RGB} - \mathbf{X}_{0IR}\|$ tra le due camere rimanga costante, la differenza vettoriale $\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X}_{0IR} - \mathbf{X}_{0RGB}$ dipende anche dall’assetto del sistema. Questo problema può essere risolto considerando la posizione

reciproca delle due camere (ad esempio il centro di presa della seconda camera nel sistema di riferimento solidale alla prima) tramite un vettore $t = \mathbf{R}_{RGB}^T \Delta X$ che, al pari di $\mathbf{R}^*$, potrà essere stimato durante la calibrazione e assunto poi come costante.

Avendo quindi orientato tutte le immagini RGB, gli orientamenti della camera IR, noti che siano $\mathbf{R}^*$ e t , potranno essere stimati come:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{IR} &= \mathbf{R}_{RGB} \mathbf{R}^* \\ X_{0IR} &= \mathbf{R}_{RGB} t + X_{0RGB} \end{aligned} \quad (2)$$

In Figura 3 è riportato lo schema generale di acquisizione. Un tipico progetto comprende, oltre alle scansioni laser e le immagini RGB o NIR riprese con il sistema stereo, anche immagini aggiuntive singole di tipo RGB o NIR. Queste ultime hanno un duplice scopo: innanzitutto possono irrobustire il blocco di immagini, ad esempio tramite riprese di inquadramento generale del rilievo, ed in secondo luogo offrono immagini con una geometria più favorevole per la texturizzazione dell'oggetto.

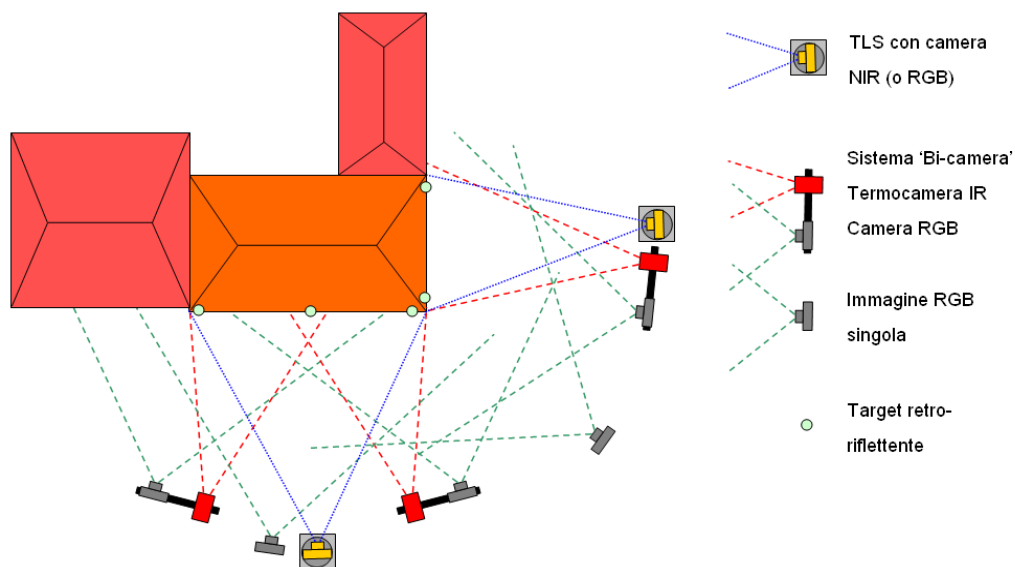


Figura 3 – Schema di presa per la mappatura di immagini RGB, NIR e IR.

Nel caso in cui l'edificio da rilevare richieda una sequenza di acquisizioni laser, sarà necessario registrare i dati in unico sistema di riferimento. L'uso di target retro-riflettenti risulta una scelta ottimale in quanto la stima delle roto-traslazioni 3D tra le varie scansioni avrà una precisione millimetrica (sufficiente per questo tipo di applicazioni data la modesta precisione ottenibile dalle immagini IR) e contemporaneamente saranno disponibili una serie di punti di appoggio utili per inquadrare il progetto fotogrammetrico in un sistema di riferimento comune.

Va infine segnalato come sia necessario pianificare la fase di acquisizione dei dati, considerando sia fattori geometrici tipici delle applicazioni fotogrammetriche, ma anche i parametri che influenzano la qualità di una termografia, dettati dalle condizioni ambientali (temperatura ed umidità) e dal tempo necessario per completare l'acquisizione (in condizioni di transitorio termico, per esempio durante la fase di irraggiamento solare oppure appena dopo il tramonto).

In Figura 4 sono riportate alcune immagini di due particolari dell'edificio "Trifoglio" ripresi ad epoche differenti (a distanza di circa un'ora). Le immagini hanno un contenuto radiometrico completamente differente a causa dalla rapida variazione delle condizioni ambientali. E' semplice verificare come queste immagini genererebbero un modello texturizzato con evidenti discontinuità radiometriche. Va altresì ricordato come lo scopo di tale rilievo non sia un modello per scopi di visualizzazione ove, nel caso di immagini RGB, è spesso necessaria un'equalizzazione con operazioni di fusione nelle zone di ricoprimento in modo da ridurre gli effetti legati ad esposizioni differenti, bensì quello di fornire un supporto all'analisi in cui l'informazione radiometrica originale deve essere, per quanto possibile, preservata.

Infine, siccome le termocamere IR sono spesso equipaggiate con teleobiettivi, diviene complesso acquisire un oggetto nella sua totalità, specialmente se la geometria dello stesso risulta molto irregolare, con numerose sporgenze e rientranze. I dati potrebbero essere integrati con nuove immagini riprese dopo la parziale texturizzazione del modello, avendo quindi ben presente quali siano le zone che presentano vuoti, anche se sarebbe opportuno attendere giornate con condizioni meteo comparabili.

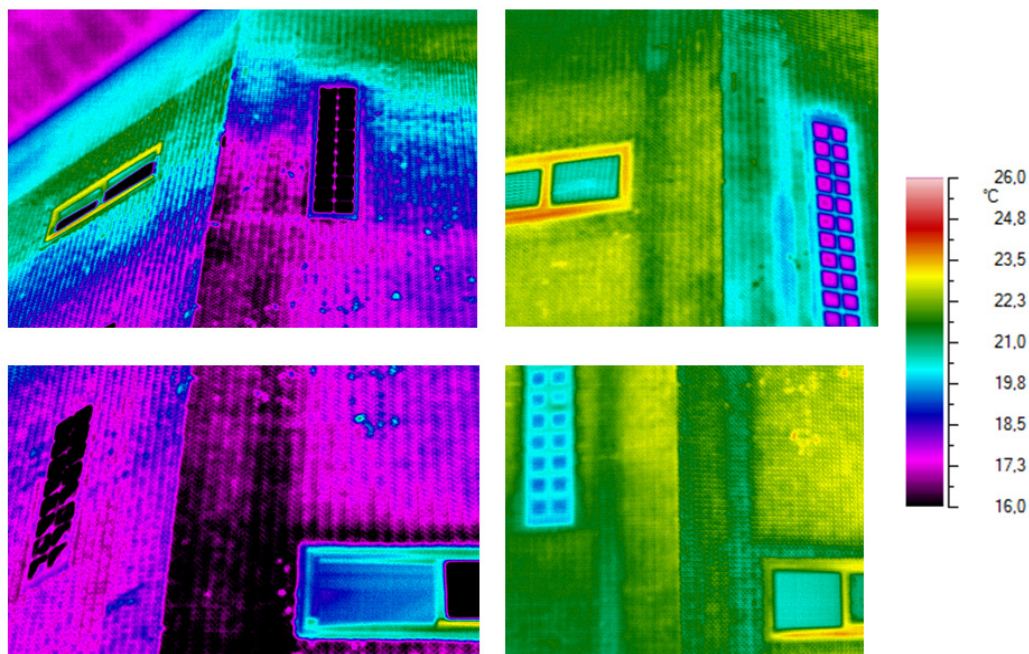


Figura 4 – Immagini riprese ad epoche differenti presentano un contenuto radiometrico variabile in funzione delle condizioni ambientali, rendendo necessaria una accurata pianificazione della fase di ripresa dei dati.

4. Alcuni casi di studio

4.1 L'edificio "Trifoglio" del Politecnico di Milano

Progettato da Gio Ponti e completato nel 1961, l'edificio del "Trifoglio" contiene tre grandi aule didattiche ed una serie di locali di dimensioni inferiori. Il rivestimento della struttura è stato realizzato con piastrelle in clinker, che presentano una notevole durabilità nel tempo non

richiedendo grandi interventi di manutenzione. Tale materiale è infatti piuttosto resistente agli effetti atmosferici e ha un costo contenuto. Oggigiorno, dopo oltre 50 anni di utilizzo, molte di esse presentano danni imputabili a distacchi di malta causati anche dall'inquinamento atmosferico e che provocano, in alcuni casi, fenomeni di distacco delle piastrelle.

Oltre alle tecniche termografiche sono disponibili altre soluzioni di tipo non distruttivo per lo studio di una facciata, che spesso però includono il contatto con l'oggetto, come nel caso di una battitura a mano o tramite martello. La tecnica IRT ha il vantaggio fondamentale di non richiedere la disposizione di ponteggi o di cestelli elevatori, con un conseguente contenimento dei costi e una rapida esecuzione a distanza.

Il rilievo laser scanning dell'edificio è stato eseguito da due punti di stazione, registrando poi le scansioni tramite target retro-riflettenti. La scansione termica è stata condotta con una termocamera NEC H2640, con focale 50 mm e risoluzione geometrica pari a 640×420 pixel (un pixel proiettato sull'oggetto copre mediamente un'area di circa 6×6 mm²). La fase di ripresa dei dati è durata circa un'ora ed è stata eseguita durante la fase di riscaldamento delle facciate sia per l'irraggiamento solare diretto che per convezione a causa della più elevata temperatura dell'aria rispetto a quella della superficie oggetto dell'indagine (gradiente termico di circa 5°C).

Le immagini RGB riprese (in tutto 77) sono state orientate manualmente ed i corrispondenti parametri di orientamento per le immagini termiche di interesse (33) sono stati trasferiti conoscendo la calibrazione della "bi-camera". La precisione dell'orientamento è risultata pari a $\sigma_{fac} = \pm 5$ mm nel piano della facciata e $\sigma_{ori} = \pm 13$ mm nella direzione normale. In Figura 5 sono riportate alcune immagini del modello texturizzato. Gli elementi nei riquadri 1-8 indicano alcune zone di interesse: nei riquadri 1-2 è evidente la dispersione termica dovuta alla presenza di un pilastro non adeguatamente coibentato, le zone 3-4-7-8 mostrano effetti di delaminazione, mentre in 5-6 si evidenzia la presenza della trave della soletta, anch'essa non adeguatamente coibentata.

Il modello è stato inoltre mappato con le immagini NIR (Figura 6) per evidenziare alcuni gruppi di piastrelle non visibili sia nei dati RGB che IR. Queste ultime sono state sostituite nel recente intervento di restauro, ed il loro differente comportamento non corrisponde a quello delle piastrelle circostanti. Ciò potrebbe essere dovuto da una differente composizione chimica oppure a variabili livelli di rugosità o opacità. Da questa analisi è comunque chiaro come anche i dati NIR possano fornire informazioni rilevanti sulle caratteristiche della struttura.

Infine, è opportuno mostrare come la procedura proposta sia in grado di risolvere alcune problematiche che non potrebbero essere affrontate tramite un approccio classico basato sulla *space resection*. In Figura 7 è riportata una immagine del rilievo ove non sono visibili punti doppi mentre la corrispondente immagine RGB, essendo acquisita con un grandangolo, evidenzia numerosi possibili punti di legame e rende semplice l'orientamento della coppia.

4.2 Il rettorato del Politecnico di Milano

L'edificio è stato costruito nel 1927 e presenta numerose decorazioni aggettanti sulla facciata principale (statue, ornamenti, ecc.). Il ricoprimento esterno è composto da cemento decorativo ed appare piuttosto danneggiato, come evidenziato dalle numerose macchie, incrostazioni, fessure e distacchi. Alcuni di questi problemi sono dovuti ad interventi di recupero tramite materiali non compatibili con quelli preesistenti. Nel 2010 lo stato conservativo dell'edificio è divenuto oggetto di analisi nell'ambito di un vasto programma di recupero attuato dal Politecnico di Milano.

La scansione termica è stata eseguita durante la fase di raffreddamento della facciata, a termine giornata appena dopo la fase di irraggiamento solare. La termocamera utilizzata è una AVIO con focale pari a 74 mm ed un sensore da 320×240 pixel. In totale, sono state riprese ed utilizzate 35 coppie RGB-IR, poi integrate con 21 immagini RGB per irrobustire la geometria del blocco. Per la generazione del modello 3D sono invece state riprese 3 stazioni laser scanning registrate mediante dei target.

In Figura 8 sono riportate alcune immagini del modello texturizzato con evidenziate (riquadri neri) le zone con una anomala distribuzione della temperatura, causata sia dalla forma irregolare dell'oggetto che da alcuni danni strutturali.

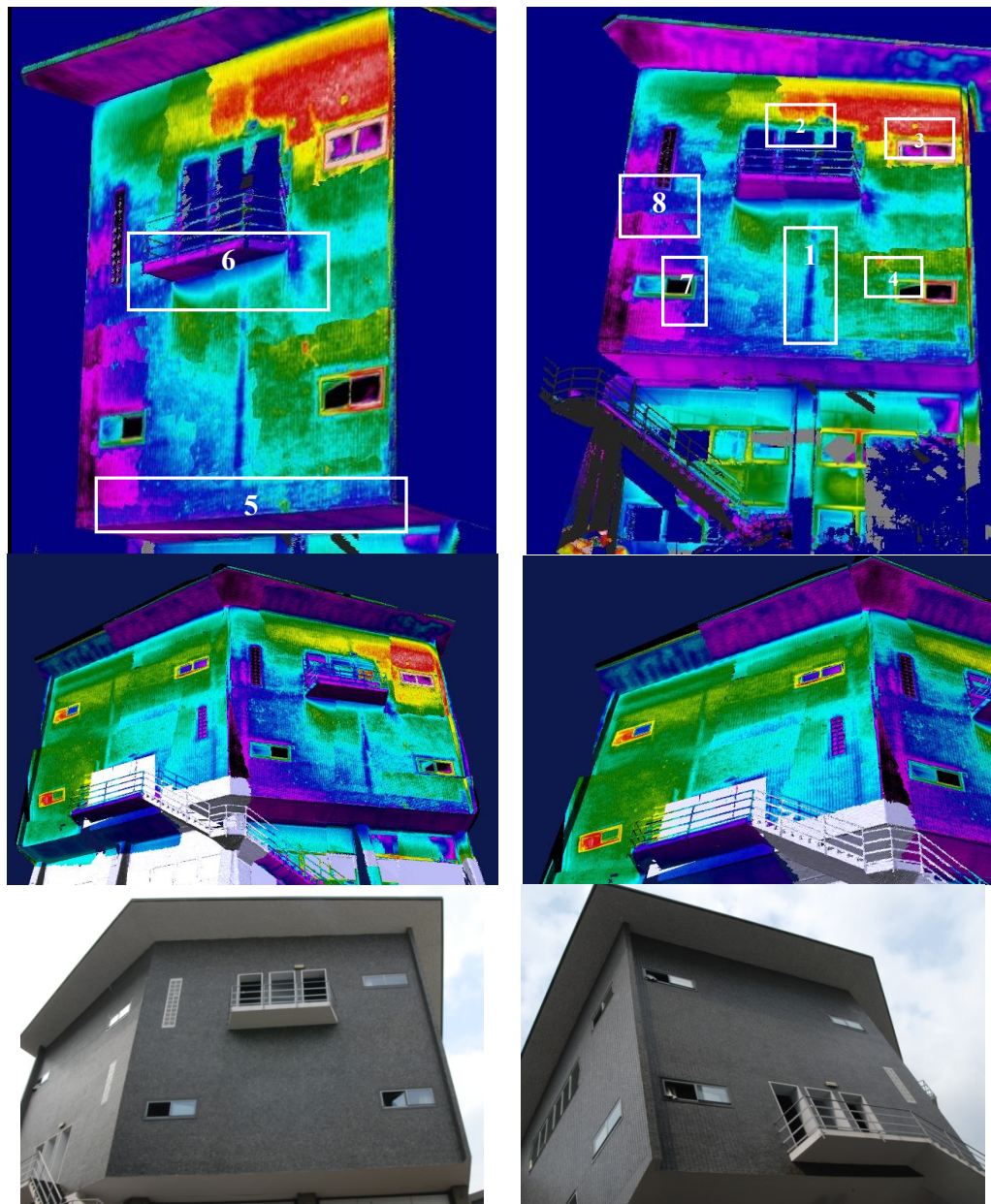


Figura 5 – Alcune immagini con evidenziati i difetti riscontrati (in alto), una visione generale del modello 3D ottenuto (medio), ed alcune immagini RGB usate per l'orientamento.

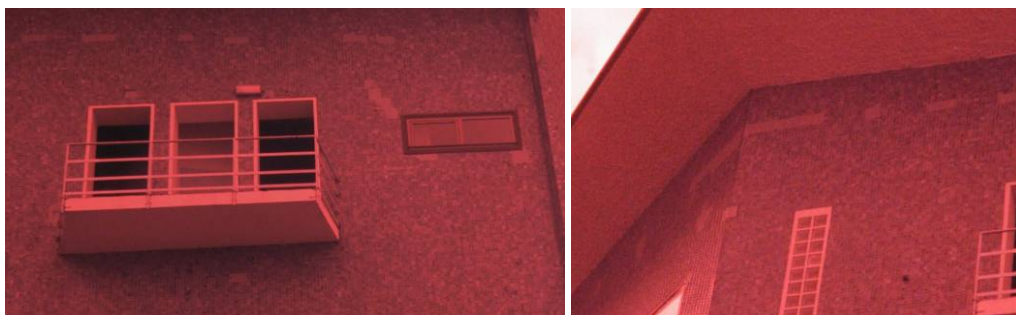


Figura 6 – Le immagini NIR evidenziano alcune piastrelle con un comportamento differente, non ugualmente identificabili a vista.

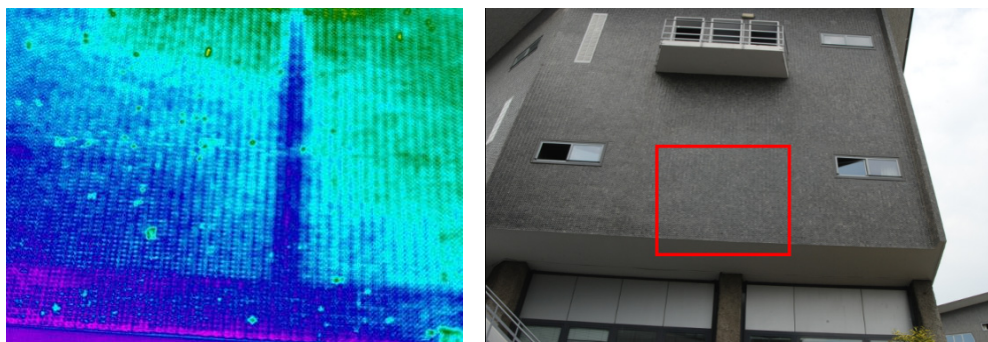


Figura 7 – L'uso del sistema bi-camera consente di orientare immagini termiche anche nelle zone prive di tessitura radiometrica.

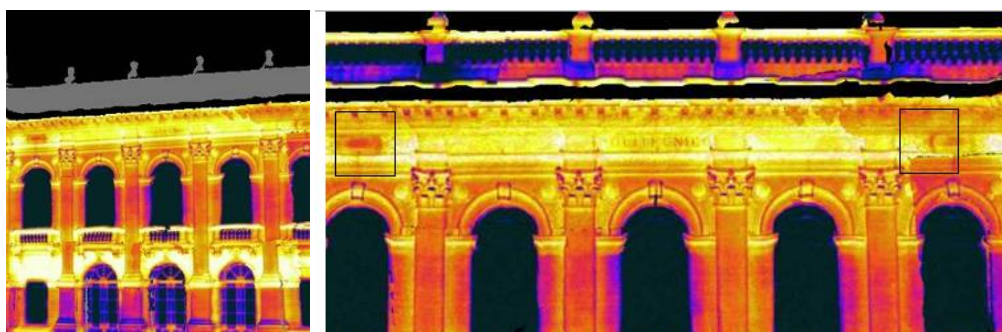


Figura 8 – Alcune immagini del modello texturizzato della facciata del rettorato. L'analisi non ha portato alla ricostruzione dell'intera facciata a causa di occlusioni dovute alla presenza di vegetazione adiacente l'edificio.

Conclusioni

L'uso del sistema "bi-camera" proposto ha permesso di semplificare la texturizzazione con immagini all'infrarosso termico di modelli 3D di edifici generati tramite tecnologia laser scanning terrestre. La procedura proposta ha lo scopo di semplificare la fase di mappatura evitando i classici approcci basati sulla misura di punti doppi tra le immagini e l'oggetto che, nel caso di dati IR, spesso non consentono di eseguire misure precise. Inoltre, in alcuni casi ove non vi sia una sufficiente tessitura radiometrica, l'impiego della "bi-camera" rappresenta l'unica soluzione al problema. La compensazione del blocco RGB a fasci proiettivi e il trasferimento dei parametri di orientamento stimati tramite la calibrazione del sistema costituiscono un'alternativa efficace rispetto alle tradizionali procedure quali la stima di trasformazioni omografiche oppure *space resection*. Resta ancora da valutare, nei casi in cui siano impiegabili entrambi le metodologie ("bi-camera" e *space resection*), quale tra esse sia più vantaggiosa dal punto di vista operativo. In particolare, questo confronto deve essere condotto in quelle situazioni ove non sia possibile eseguire un orientamento di tipo automatico delle immagini RGB.

Il prodotto finale è un modello texturizzato dal quale possono essere facilmente generati altri prodotti, ad esempio ortofoto digitali che possono poi essere stampate o distribuite tramite programmi GIS o sistemi CAD per un semplice utilizzo pratico del risultato. E' inoltre importante ribadire come la fase di ripresa dei dati debba essere pianificata in modo tale da ottenere un compromesso tra le classiche esigenze che portano alla creazione di un'analisi termografica e quelle di carattere prettamente metrico tipiche del settore fotogrammetrico.

Sono stati presentati anche alcuni risultati preliminari ottenuti con una camera NIR, che da un certo punto di vista sono da ritenersi piuttosto innovativi perché hanno consentito l'individuazione di diverse tipologie di piastrelle in clinker posate in momenti differenti.

Bibliografia

Abdel Aziz, Y.I. and Karara, H.M., 1971. Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates. Close-range Photogrammetry. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia. 433 pages: 1-18.

Alba, M.I., Barazzetti, L., Roncoroni, F., Scaioni, M., 2011. Filtering vegetation in terrestrial point clouds with low-cost near infrared cameras. *Italian Journal of Remote Sensing*, 43(2), pp. 55-75.

Barazzetti, L., Remondino, F., Scaioni, M., 2010. Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. *Photogrammetric Record*, 25(132): 356-381.

Fraser, C.S., Hanley, H. and Cronk, S., 2005. Close-range photogrammetry for accident reconstruction. *Optical 3D Measurements VII*, (2): 115-123.

Gianinetto, M., Giussani, A., Roncoroni, F., Scaioni, M., 2005. Integration of Multi-Source Close-Range Data. Proc. CIPA 2005, 26 Sept-1 Oct 2005, Turin, Italy, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36, Part 5/C34, pp. 304-309.

Granshaw, S.I., 1980. Bundle adjustment methods in engineering photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 10(56): 181-207.

- Hartley, R.I. and Zisserman A., 2004. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge, 672 pages.
- Lagüela, S., González-Jorge, H., Armesto, J., Arias, P., 2011. Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements. *Infrared Physics & Technology*, Volume 54, pp. 92-99.
- Liebowitz, D. and Zisserman, A., 1998. Metric rectification for perspective images of planes, Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. and Harley, I., 2006. *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*. John Wiley & Sons. 510 pages.
- Maldague, X., 2001. Non Destructive Testing Handbook, 3rd edition, Vol. 3 - Infrared and Thermal Testing, ASNT Columbus, OH-USA.
- Remondino, F. and Fraser, C., 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5): 266-272.

Procedura semi-automatica per la misura dell'urban sprawl tramite serie multitemporale dei dati MIVIS

Alessia Allegrini, Catia Atturo, Giuliano Fontinovo, Elisabetta Mercuri

CNR - Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, Via Salaria Km 29.300, 00015 Monterotondo (RM)
Tel. 0690672395, atturo@iia.cnr.it

Riassunto

In questo lavoro si illustra la metodologia sperimentata, dal laboratorio di telerilevamento dell'IIA del CNR per il calcolo di indicatori di interesse urbanistico-ambientale per la determinazione dell'urban sprawl, utilizzando dati multitemporali acquisiti con il sensore MIVIS.

Si parte dall'applicazione di tecniche di classificazioni unsupervised su una serie dei dati MIVIS, per determinare la quantità di suolo consumata. In questo contributo la quantità di suolo consumata, corrisponde alla "misurazione" dei territori urbanizzati così come definiti dal primo livello della legenda CLC. Sono stati presi in considerazione tre comuni del Casertano. L'analisi dei dati è stata effettuata attraverso la creazione di una maglia di 2 Km x 2 Km.

Il livello di urbanizzazione di ogni singola area (maglia), è stato determinato per singolo indicatore, per singolo indice e in totale, assegnando a ciascuno di loro dei pesi (valori). Viene illustrata inoltre, la scelta dei criteri utilizzati nel metodo di valutazione, nonché i dettagli del punteggio e la loro aggregazione nei sistemi coinvolti. Ulteriori dettagli vengono forniti per lo sviluppo del metodo in ambiente GIS. Inoltre saranno presentati e discussi nel documento i risultati delle analisi e la possibilità di utilizzare la metodologia in altri campi della valutazione ambientale, ed infine gli ulteriori usi e sviluppi e alcune delle difficoltà incontrate nello sviluppo del metodo.

Abstract

This paper describes the methodology tested from the IIA the CNR laboratory of remote sensing for the calculation of interest in urban-environmental indicators for the determination of urban sprawl using multi-temporal data acquired with the sensor MIVIS. It starts from the application of techniques of unsupervised classifications MIVIS the data series to determine the amount of land consumed. In this contribution, the amount of land consumed, corresponds to the "measurement" of urbanized areas as defined by the first level of the CLC legend. Were taken into account the three municipalities of Caserta. Data analysis was performed by creating a mesh of 2 km x 2 km. The level of urbanization of each area (mesh), was determined for each indicator, single index and in total, giving each of them of the weights (values). Discusses also the choice of criteria used in the method of evaluation, as well as details of the scoring and aggregation of systems involved. Further details are provided for the development of the method in GIS environment. They will also be presented and discussed in the paper the results of the analysis and the possibility of using the methodology in other fields of environmental assessment. Finally, additional uses and developments will be discussed and some of the difficulties encountered in developing the method.

Introduzione

I processi di urbanizzazione che sono avvenuti negli ultimi anni comportano sempre più un maggiore consumo di uso di suolo. La crescita disorganizzata delle città (urban sprawl), sottrae parti di territorio utilizzabili ad altri scopi quali quelli agricoli o naturali, modificando gli ecosistemi naturali. Non solo l'urbanizzazione ma anche l'agricoltura e le attività estrattive determinano un

consumo di suolo. La prima dal punto di vista qualitativo modificando le caratteristiche chimico fisiche del terreno, la seconda sottraendo suolo al territorio naturale.

Lo scopo di quantificare l'occupazione (riduzione quantitativa e qualitativa) del territorio da parte del processo di antropizzazione è dato da un indicatore "consumo di suolo". Questo è dato dal rapporto tra la somma delle aree destinate ad usi urbani (residenziali, produttivi, commerciali, infrastrutturali) e l'area totale del territorio preso in considerazione. Scopo dell'indicatore è la valutazione delle pressioni a cui è sottoposta la risorsa suolo al fine di attuare politiche mirate ad uno sviluppo antropico compatibile.

Sia in Italia (SPTU) che all'estero vi è un'insufficiente valutazione del fenomeno "consumo di suolo" e il risultato è la mancanza di dati (aggiornati ed affidabili) e sulla disponibilità di suoli liberi. Inoltre, anche laddove regioni ed enti locali provvedano autonomamente, il rilevamento e l'interpretazione dei dati di uso del suolo, anche con strumenti avanzati di foto-interpretazione aerea o satellitare, pone enormi problemi dovuti ai tempi lunghi per l'acquisizione di immagini e la loro elaborazione e per la mancanza di una codifica che consenta l'effettuazione di confronti coerenti.

Fonti

La metodologia proposta, implica l'utilizzo di dati provenienti da fonti eterogenee. Per cercare di superare queste difficoltà, si è deciso di impiegare metodologie GIS (*Geographic Information System*) (Bernhardsen, 1999). In particolare si è normalizzata tutta la documentazione nel sistema di riferimento UTM WGS84 33N.

Le immagini MIVIS considerate e gli strati informativi realizzati sono relativi a due momenti temporali:

1. acquisite nel 2004 ad una quota di circa 2500 m.; ne è risultata una risoluzione spaziale di 5x5m.. Per queste immagini si è effettuato un pretrattamento di georeferenziazione.
2. acquisite nel 2009 ad una quota di circa 1500 m.; ne è risultata una risoluzione spaziale di 3x3m.. Per queste immagini si è effettuato un pretrattamento di ortorettifica.

Attraverso i dati telerilevati con tecniche di classificazione si è sviluppata una metodologia per il popolamento e la valutazione dell'indicatore "Consumo di suolo".

Per la selezione degli indicatori ambientali, determinati in base ai dati disponibili, si è avuto come primo obiettivo, in questa sperimentazione, la valutazione degli impatti negativi causati dai processi di urbanizzazione.

Il risultato di questa selezione è mostrato in tabella 1, che illustra la collocazione degli indicatori nel sistema di riferimento suggerito dall'OCDE (2003) noto come PSR (Pressione = impatti sull'ambiente, Stato = condizioni delle componenti eco-sistemiche e Risposta = politiche di intervento).

<i>Tema e/o macro-indicatore</i>	Indicatore di pressione (P)	Indicatore di stato/impatto (S/I)
SUOLO	• diffusione insediativa	• componente naturale

Tabella 1 – Set di indicatori selezionati.

Metodologia

La metodologia utilizzata in questo studio è partita da un'analisi preliminare degli studi già effettuati sia in territorio nazionale (Romano et al. 2006, Peccol et al. 2009) che internazionale (Jaeger 2000, Jaeger et al. 2009, Jat et al. 2008, Bhatta et al. 2010), dei dati disponibili ed in particolare della possibilità di suddividere le categorie di dati.

Il primo passo è stata l'individuazione di aree campione ove applicare la metodologia. Successivamente sono stati individuati gli indicatori che permettessero di identificare il livello di qualità urbana del paesaggio preso in esame e i relativi impatti sul paesaggio. La quantificazione di

questi indicatori è stata inizialmente di tipo qualitativo, così definita: alto, medio, basso e successivamente di tipo quantitativo espressa in m² di superficie utilizzata.

In questa prima fase di sperimentazione sono stati utilizzati solo due indicatori, la diffusione insediativa e la componente naturale (tabella 2) entrambi gli indicatori determinano la natura dell'integrità e la frammentazione dell'ecosistema.

Indicatore: Diffusione insediativa
Presenza di superfici artificiali che hanno occupato più dal 40% al 50% della cella
Presenza di superfici artificiali che hanno occupato più dal 20% al 40% della cella
Presenza di superfici artificiali che hanno occupato meno del 20% della cella
Indicatore: Componente naturale
Aree dominate da superfici agricole e naturali (meno del 40%)
Aree miste: Aree agricole e superfici naturali (dal 40% al 20%)
Aree dominate da superfici naturali (+ del 40%)

Tabella 2 – Indicatori utilizzati.

Ogni area è stata, poi suddivisa con una griglia principale di 2 x 2 Km per una valutazione di tipo qualitativo. Successivamente nelle aree con alti livelli di criticità, questa griglia è stata ulteriormente suddivisa con una sotto-griglia di 250x250 metri questo per analizzare in dettaglio, le variazioni di una piccola porzione di territorio pari a 0.0625 kmq.

I dati MIVIS sono stati classificati ed esportati in formati vettoriale per poterli quantificare e creare nuovi layer all'interno del sistema GIS. Questi hanno permesso di definire il valore totale di ogni quadrante e i valori dei diversi sotto-indicatori scelti nei diversi anni. Le unità di misura utilizzate sono state l'estensione (mq).

I risultati così ottenuti determinano il consumo di suolo, preso nella sua totalità o nelle sue componenti, ma non ci indicano il livello di criticità di questo indicatore. Per questo successivamente si è passati alla "pesatura" di tali indicatori. Per compiere questa operazione, si è utilizzata la tecnica del confronto a coppie. Una volta stabilito i pesi agli indicatori, determinati dal confronto a coppie, l'integrazione dei dati e la conseguente valutazione, all'interno dell'ambiente GIS è stata utilizzata la Map Algebra. Per l'applicazione di questa è necessario che tutte le variabili siano in formato raster. Per questo tutte le variabili sono state convertite in formato raster tramite e all'interno del progetto GIS (Conversion Tool). Dopo tale conversione, tutti i raster sono stati riclassificati, nel senso che sono stati attribuiti ai pixel i valori corrispondenti ai punteggi definiti secondo i criteri. In tal modo si sono ottenuti raster con valori che variano lungo la stessa scala, da 0 a 1. Tutte le variabili considerate assumono valori diversi per ogni singola cella di territorio. Nella costruzione della mappa finale di criticità bisogna considerare per ogni cella un solo valore che deriva dai diversi raster, ovvero si deve utilizzare un modello che sintetizzi in un unico valore i valori delle corrispondenti celle di ogni variabile.

L'integrazione dei raster può avvenire tramite varie tecniche, ma la più utilizzata in questi casi è la combinazione lineare pesata o WLC (Weighted Linear Combination)

Caso di studio

La scelta delle aree è caduta su tre comuni del casertano, a causa dell'elevata presenza di abusivismo edilizio principalmente lungo la fascia costiera. Le tre zone sono state scelte in funzione della loro eterogeneità, in modo da avere ambiti territoriali rappresentativi e differenziati per mettere a punto una metodologia applicabile su altre aree.

Le tre aree sono state così identificate: Zona C1 - Comune di Castel Volturno; Zona C2 - Comune di Cancellò ed Arnone e Zona C3 - Comune di Villa Literno (fig. 1).



Figura 1 – Aree di studio: tre comuni.

All'interno del software ArcGIS 9.3 sono state create features poligonali ed estratti i valori in Km², relativamente: alle aree di studio totale (C1= 72,23 Km²; C2=49,00 Km²; C3=61,65 Km²).

I dati MIVIS delle tre aree sono stati classificati tramite il software Envi 4.5. I dati, geometricamente corretti sono stati classificati utilizzando una classificazione unsupervised. La scelta è caduta sul metodo *Isodata* in quanto non è necessaria la conoscenza della realtà a terra. Inoltre si basa su algoritmi che analizzano tutti i pixel e li raggruppano in un certo numero di classi (cluster) in base ai soli valori di radianza. Sono stati impostati solo alcuni variabili quali il numero massimo di cluster nel nostro caso 15 (fig. 2) e il numero minimo di pixel necessari (102) per formare un cluster. Successivamente le classi sono state accorpate nelle seguenti 5 classi (1° livello Corinne Land Cover - CLC): Superfici artificiali, superfici agricole utilizzate, territori boscati e ambienti semi-naturali, zone umide e corpi idrici.

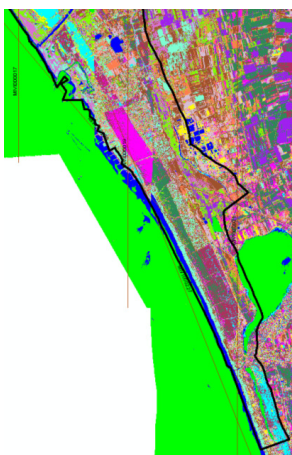


Figura 2 – Risultati della classificazione Isodata 15 classi.

Le classi estrapolate all'interno del software Envi sono state trasformate in formato vettoriale e raster. I dati vettoriali e raster così ottenuti sono stati inseriti in ambiente GIS. Le classificazioni in formato vettoriale ottenute (5 classi) sono state ritagliate e quantificate all'interno di ogni cella con una procedura semi-automatica utilizzando le SML (Simple Macro Language) di Arc INFO (moduli Arc e ArcEdit). Stabilito così le quantificazioni dei singoli indicatori per ogni cella, si sono visualizzati, attraverso un gradiente di colore (rosso=alto, medio=arancione, basso=giallo) (fig. 3).

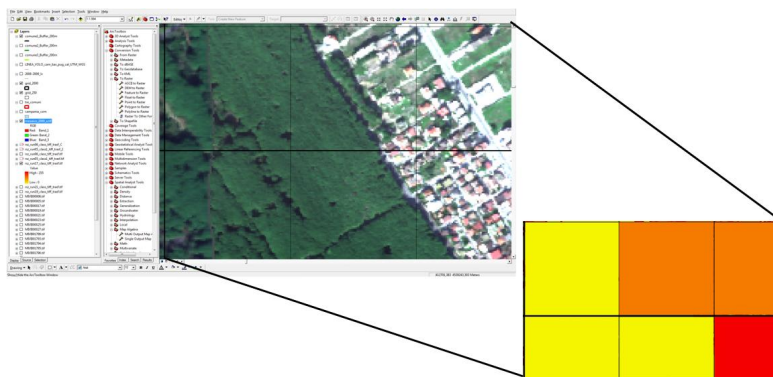


Figura 3 – Risultato indicatore “componente naturale” attraverso il gradiente di colore.

La mappa così ottenuta per singolo indicatore è stata poi trasformata in formato raster (Conversion Tool di ArcMap) e sono state attribuite ad ogni cella i valori corrispondenti al peso definito tramite il “confronto a coppie” (tab. 3).

Indicatore A: Diffusione insediativa (peso=0,65)		Livelli di criticità
A1	Presenza di superfici artificiali che hanno occupato più dal 40% al 50% della cella	Alto (peso = 0,6)
A2	Presenza di superfici artificiali che hanno occupato più dal 20% al 40% della cella	Medio (peso = 0,3)
A3	Presenza di superfici artificiali che hanno occupato meno del 20% della cella	Basso (peso = 0,1)
Indicatore B: Componente naturale (peso=0,35)		Livelli di criticità
B1	Aree dominate da superfici agricole e naturali (meno del 40%)	Alto (peso = 0,51)
B2	Aree miste: Aree agricole e superfici naturali (dal 40% al 20%)	Medio (peso = 0,32)
B3	Aree dominate da superfici naturali (+ del 40%)	Basso (peso = 0,18)

Tabella 3 – Pesi degli indicatori.

Successivamente, per semplificare le procedure, l'implementazione del modello di valutazione è avvenuto attraverso il modulo “Model Builder” di ArcGIS. Questo ha permesso di velocizzare e automatizzare l'esecuzione delle funzioni del processo, di visualizzare e risolvere il problema e di avere alla fine una documentazione grafica del lavoro svolto.

Dall'analisi effettuata nelle aree prese in esame risulta che in questi ultimi anni (2004-2009) la percentuale di suolo naturale è rimasta invariata, mentre in due delle aree (C1 e C2) c'è stata una crescita di consumo di suolo principalmente di tipo edilizio (privato) a scapito di quello agricolo, principalmente lungo le direttrici viarie e a saturazione dei lotti. Mentre la terza area (C3) è rimasta pressoché invariata. Si è inoltre notato che negli anni presi in esame nelle aree agricole sono aumentate le superfici destinate alle serre.

Conclusioni

La metodologia proposta, va ad oggi considerata di tipo sperimentale in quanto necessita di ulteriori affinamenti che saranno oggetto di studi successivi. In particolare, l'attenzione sarà rivolta maggiormente alla valutazione degli indicatori; alla ricerca di più accurati parametri che fissano

limiti di consumo d'uso di suolo e alla raccolta ed elaborazione di dati di confronto ottenuti con differenti metodologie e/o su aree simili.

L'elaborazione automatica dei dati telerilevati, attraverso le classificazioni (*isodata*) rende più immediata e meno soggettiva la determinazione degli indicatori di interesse, a scapito però dell'accuratezza e precisione delle classi identificate. Mentre l'utilizzo di comandi e moduli di ArcGIS permette di stabilire le differenze di una valutazione modificando semplicemente un parametro senza compromettere il modello. Consente, inoltre di velocizzare l'elaborazione e la visualizzazione cartografica del modello di valutazione

Tale procedura, una volta messa a punto, non richiederebbe risorse o esperienza di tipo specialistico e porterebbe a risultati numerici facilmente confrontabili con dati di riferimento o da letteratura.

Bibliografia

AA.VV. (1996), Gruppo di esperti sull'Ambiente Urbano, Città Europee Sostenibili, Bruxelles, Commissione Europea,

AA.VV. (1992), *CorineLand Cover: a European Community project*. Presented in the framework of the International Space Year, Proceedings of 1992 European Conference of the International Space Year, Commission of the European Communities, Brussels.

Bhatta, B., Saraswati, S., and Bandyopadhyay, D. (2010), "*Quantifying the degree-of-freedom, degree-of-sprawl, and degree-of-goodness of urban growth from remote sensing data*", Appl. Geogr., 30, 1, 96–111.

Bernhardsen T. (1999), *Geographic Information System an introduction*, Canada, John Wiley & Sons, Inc.

Di Zio S. (2009), "*Un modello GIS multi criterio per la costruzione di mappe di plausibilità per la localizzazione di siti archeologico: il caso della costa teramana*", Archeologia e Calcolatori, 309-329.

Romano, S. e Cozzi, M. (2006), "*Modelli multicriteriali geografici per la valutazione delle trasformazioni di uso del suolo e impatti della politica agricola nei territori rurali*", L'Italia Forestale e Montana, fasc. n. 5: 423-471.

SPTU (Servizio Programmazione Territoriale e Urbanistica), *L'indice del consumo di suolo nella pianificazione urbanistica comunale piacentina*, Amministrazione Provinciale di Piacenza – Area Programmazione Territoriale Infrastrutture e Ambiente

OECD 1993. OECD core set of indicators for environmental performance reviews: a synthesis report by the group on the state of the environment. Environment Monographs, 83, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

Peccol E., Bonfanti P., (2009), "*Indicatori per l'analisi della diffusione insediativa nel territorio rurale: un'applicazione ai sistemi territoriali udinese e pordenonese*", IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Ischia Porto, 12-16 settembre 2009, memoria n. 6-6

Jaeger J.A.G. (2000), "*Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation*", Landscape Ecology **15** (2), 115–130.

Jaeger, J.A.G., Bertiller, R., Schwick, C. & Kienast, F. (2009), "*Suitability criteria for measures of urban sprawl*", Ecological Indicators, 10, 397-406.

Jat, M.K.; Garg, P.K.; Khare, D. (2008), "*Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques*", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 10(1), 26-43.

Modellazione numerica degli alvei fluviali mediante l'uso di DSM

Riccardo Amela (*), Mattia De Agostino (**), Claudia Soffia (***)

(*) Laureando in Ingegneria Civile, Politecnico di Torino, Sede di Vercelli, Piazza Sant'Eusebio 5
13100 Vercelli, riccardo.amela@studenti.polito.it

(**) Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Geotecnologie (DITAG),
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Tel. 011 0907661, Fax 011 0907699, mattia.deagostino@polito.it

(***) Politecnico di Torino, Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Infrastrutture Civili (DITIC),
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Tel. 011 0905647, Fax 011 0905698, claudia.soffia@polito.it

Riassunto

Il presente lavoro mostra un metodo alternativo per la generazione delle mappe di rischio fluviale, basato sull'impiego congiunto di un codice di modellazione fluviale molto diffuso in campo professionale (HEC-RAS) e dei modelli digitali del terreno (DTM) e delle superfici (DSM). In particolare, l'utilizzo di specifici applicativi del software di calcolo consente di estrarre dal DTM i dati geometrici delle sezioni necessarie per la modellazione idraulica dell'alveo fluviale e, successivamente, di importare i risultati di tali simulazioni in un ambiente GIS per la creazione di mappe di inondazione e per la definizione delle aree a rischio basate sugli ostacoli riportati nel DSM.

Abstract

This work is aimed at investigating an alternative method for the generation of river risk maps, based on the joint use of a numerical code widespread in the professional field (HEC-RAS) and of digital terrain and surface models (DTM/DSM). The use of specific applications, in particular, allows the geometric data needed for hydraulic modeling of the riverbed to be directly extracted from the DTM and after that the results of the simulations to be imported in a GIS environment to create flood maps and define the risk areas using the obstacles detected by the DSM.

Introduzione

Il progressivo aumento degli eventi alluvionali estremi, ad esempio quelli che hanno colpito il Nord-Ovest dell'Italia (2000, Figura 1) e le città di Cagliari (2008) e Vicenza (2010), hanno riportato l'interesse verso la possibilità di disporre di mappe delle fasce di rischio definite non solamente attraverso un approccio statistico, ma anche mediante l'integrazione con il maggior numero di informazioni possibili deducibili dai dati spaziali a disposizione delle Pubbliche Amministrazioni.



Figura 1 – Immagini dell'alluvione del Fiume Po nell'ottobre del 2000.

La mappatura, da parte delle Autorità di Bacino, delle zone a rischio di inondazione mediante piani stralcio di difesa dalle alluvioni si inserisce tra i cosiddetti interventi “non strutturali”, ossia tra gli interventi di carattere amministrativo finalizzati alla riduzione dei danni conseguenti ad una piena, senza tuttavia che si intervenga direttamente sulla causa.

Il concetto di “rischio” normalmente adottato è conforme con quanto proposto dalle commissioni tecnico-scientifiche dell'UNESCO. In esso sono contenute le seguenti definizioni funzionali:

- Pericolosità o *Hazard* (H): la probabilità che un evento dannoso di una certa intensità si verifichi in un dato periodo di tempo, in una data area e per determinate cause di innesco;
- Elementi a rischio (E): popolazione, proprietà, attività economiche a rischio in una data area;
- Vulnerabilità (V): grado di perdita atteso su un dato elemento o gruppi di elementi a rischio derivante da un potenziale fenomeno distruttivo di una data intensità. La vulnerabilità viene espressa in una scala da 0 a 1 (rispettivamente, nessuna perdita e perdita totale);
- Rischio specifico (R_s): grado di perdita atteso a causa di un determinato fenomeno naturale di data intensità; è funzione della pericolosità e della vulnerabilità: $R_s = H \times V$;
- Rischio totale (R): si intende il grado di perdite attese in termini di vite umane, feriti, danni alla proprietà ed alle infrastrutture, danni diretti ed indiretti all'economia a causa di una determinata pericolosità geologica.

Quindi il rischio totale R si esprime applicando il rischio specifico R_s agli elementi a rischio (E):

$$R = H \times V \times E = R_s \times E \quad [1]$$

I criteri per la perimetrazione degli ambiti di pericolosità trovano le loro basi su due specifici ambiti: il primo di carattere idraulico e il secondo, invece, di carattere geomorfologico (Covelli, 2006). In particolare, con riferimento agli ambiti di pericolosità idraulica, la perimetrazione delle aree di inondazione avviene in funzione del periodo di ritorno del fenomeno di piena, dei livelli idrici attesi e della velocità raggiunta dalla corrente. In quest'ambito è pertanto possibile riconoscere un *iter* operativo, comune a tutte le Autorità di Bacino nazionali, per la perimetrazione delle aree inondabili, basato sulla definizione di pericolosità in funzione della probabilità di inondazione e delle caratteristiche dell'onda di sommersione.

La procedura di perimetrazione degli ambiti di pericolosità idraulica può essere riassunta in quattro passaggi:

1. individuazione e caratterizzazione dell'ambito fisico oggetto di studio, al fine di definire i tratti di alveo ritenuti idrologicamente confrontabili per dimensionamento geometrico, e attribuzione dei coefficienti di scabrezza;
2. analisi idrologica, mediante lo sviluppo di un modello idrologico finalizzato a determinare gli eventi di piena di progetto per differenti periodi di ritorno;

3. modellazione idraulica, per la determinazione dei livelli idrici associati agli eventi di piena, anche nel caso di sormonto o di rottura arginale o di presenza di infrastrutture esistenti o di progetto che interagiscono con l'evoluzione del processo di piena;
4. delimitazione delle aree inondabili mediante il confronto dei risultati della simulazione idraulica con un modello morfologico del terreno.

Se la procedura sopra descritta è pressoché univoca per le diverse Autorità di Bacino, differenti sono le tecnologie impiegate e le ipotesi formulate per giungere alla stesura di un piano. Inoltre, ogni Autorità di Bacino incrocia in maniera differente i tre fattori “tempo di ritorno”, “livelli idrici attesi” e “velocità della corrente dell'onda di piena” per definire o delle specifiche categorie o aree di pericolosità (criterio adottato dalle Autorità di Bacino dell'Arno e del Tevere) oppure tre fasce fluviali (Figura 2) a diverso grado di pericolosità (metodologia seguita, per esempio, dalle Autorità di Bacino del Po e del Liri-Garigliano-Volturno).

Queste ultime sono:

- Fascia A o di deflusso della piena: costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente (80%) del deflusso della corrente per la piena di riferimento;
- Fascia B o di esondazione: esterna alla Fascia A, costituita dalla porzione di territorio interessata da inondazione al verificarsi della piena di riferimento. Il limite di tale fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena di riferimento, ovvero sino alle opere idrauliche di controllo delle inondazioni esistenti o programmate;
- Fascia C o di inondazione per piena catastrofica: costituita dalla porzione di territorio esterna alla Fascia B, che può essere interessata da inondazione assumendo come riferimento la massima piena storica registrata o in assenza di essa, la piena di ritorno a 500 anni per l'Autorità di bacino del Po e la piena di ritorno a 300 anni per l'Autorità di Bacino del Liri-Garigliano-Volturno.

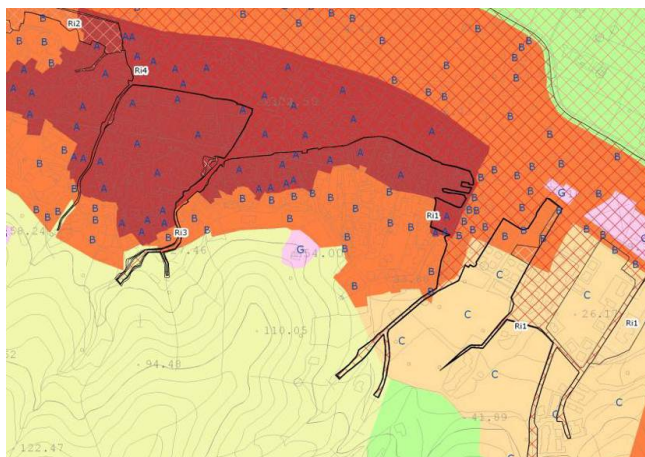


Figura 2 – Definizione delle fasce fluviali - comune di Muravera (CA).

Quanto sinora esposto evidenzia ancora di più la necessità di disporre di uno strumento, il più uniformabile possibile, in grado di generare ed aggiornare rapidamente tali mappe in funzione delle modifiche, di natura antropica e non, cui possono essere soggetti gli alvei stessi. Attualmente, infatti, le fasce di rischio idraulico vengono definite facendo uso di *software* di modellazione numerica che utilizzano geometrie ricavate partendo da rilievi topografici di dettaglio, realizzati spesso *ad hoc*. Sebbene tali rilievi siano spesso caratterizzati da precisioni molto elevate, essi

coinvolgono una porzione limitata dell'alveo fluviale, estendendosi al più alle aree golenali. A giudizio degli Autori, la scarsa conoscenza delle caratteristiche morfologiche e urbanistiche al di fuori delle estensioni del rilievo rappresenta un aspetto critico della procedura di stima, che può essere risolto attraverso l'integrazione con tutte le informazioni geografiche disponibili per l'area di interesse.

Il rilievo topografico degli alvei fluviali

Il rilievo topografico di un alveo fluviale ha la finalità di valutare, oltre alla geometria del corso d'acqua, anche i parametri morfologici dello stesso e la loro evoluzione indotta dal regime idrologico, permettendo così di quantificare l'entità dell'erosione e del deposito (AA.VV., 1996).

Generalmente, tale operazione include sia un rilievo planimetrico del fiume sia un numero di sezioni trasversali con una distribuzione ed un'interdistanza da stabilirsi in funzione dell'andamento planimetrico e della sinuosità del corso d'acqua.

Per quanto concerne i parametri che descrivono la morfologia di un alveo fluviale, questi sono, ad esempio la lunghezza, la larghezza, l'indice di intrecciamento, l'indice di sinuosità, il raggio di curvatura e la lunghezza del meandro (tutti estratti dal rilievo planimetrico, Figura 3.a), la larghezza, la profondità, la quota del fondo, l'area della sezione ed il perimetro bagnato, il raggio idraulico, il rapporto di forma, l'altezza e inclinazione delle sponde (partendo dalle sezioni trasversali, Figura 3.b).

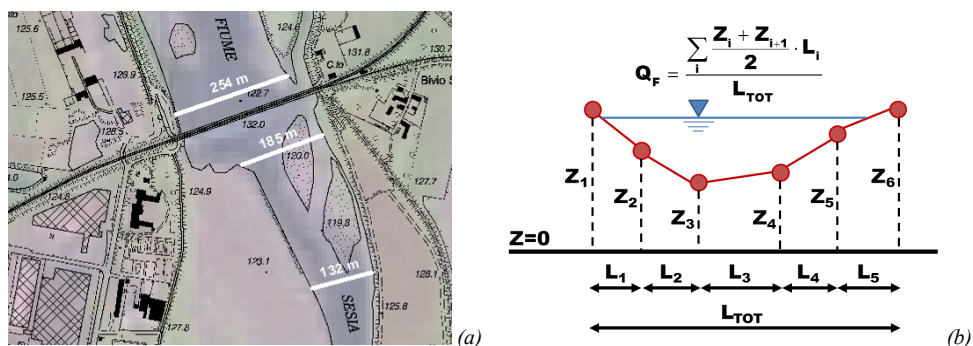


Figura 3 – Misura dei parametri morfologici di un alveo fluviale: larghezza dell'alveo (a) e quota di fondo (b).

Generalmente, le zone emerse in prossimità del corso d'acqua vengono rilevate utilizzando la strumentazione e le tecniche usuali dei rilievi topografici, servendosi di stazioni totali e, laddove la copertura arborea lo consenta, di strumenti GNSS. Per quanto concerne invece il rilievo della sezione bagnata, occorre applicare tecniche diversificate in relazione alle condizioni operative dei siti di misura. Infatti, se nelle sezioni agibili a guado è sempre possibile ricorrere, oltre che ad una asta centimetrata, agli strumenti sopra citati, laddove invece le sezioni siano accessibili solamente attraverso l'ausilio di una imbarcazione occorre munirsi di strumenti specifici, ad esempio un ecoscandaglio digitale. Le misure batimetriche eseguite con l'ecoscandaglio devono poi essere georeferenziate attraverso gli strumenti topografici di cui sopra (Figura 4).

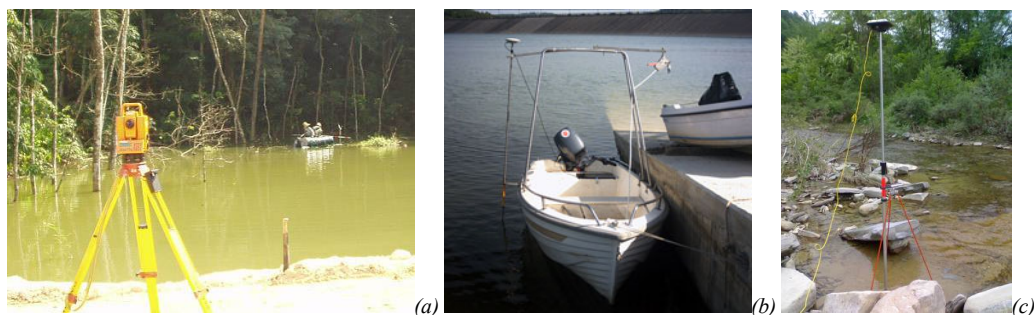


Figura 4 – Strumenti per il rilievo topografico degli alvei fluviali: stazione totale (a), GNSS su barca (b) e GNSS su una sezione accessibile a guado (c).

Oltre all'aspetto strumentale, occorre considerare che il personale da adibire alle operazioni di rilievo deve possedere una preparazione tecnica e una esperienza specifici in merito ai seguenti aspetti (Surian et al., 2009):

- capacità di distribuire i punti di misura in modo rispondente alla morfologia della sezione, evidenziando i punti più significativi per la descrizione della dinamica fluviale;
- capacità operative a guado e da imbarcazione tali da garantire condizioni di sicurezza nell'esecuzione dei rilievi batimetrici;
- capacità di osservazione e annotazione delle caratteristiche del tratto di alveo influente sulla sezione di rilievo, con riferimento ai processi evolutivi di erosione e di deposito e di assetto planimetrico.

Quanto sopra esposto rappresenta lo stato dell'arte relativamente al rilievo degli alvei fluviali, ad oggi eseguiti per la maggior parte secondo le linee guida sopra sintetizzate. Occorre però evidenziare come le suddette modalità di rilievo topografico richiedano un numero considerevole di ore/squadra, con un conseguente aumento dei costi di realizzazione che si sommano a quelli di ammortamento delle strumentazioni e al costo relativo all'affitto (o all'ammortamento) del mezzo natante necessario nelle sezioni più profonde.

Con la premessa, doverosa, che un rilievo topografico di dettaglio è sempre preferibile laddove sia necessario conoscere nella maniera più accurata possibile l'alveo fluviale e le sue caratteristiche morfologiche (salti di fondo, cambi di pendenze, accentuata sinuosità dell'alveo...), occorre tuttavia considerare che, per un insieme sempre più vasto di applicazioni, un livello di dettaglio centimetrico risulta essere persino eccessivo. Un altro aspetto da considerare è relativo all'estensione del rilievo topografico tradizionale: per i problemi già citati di velocità del rilievo e di costo di realizzazione, rilievi di questo tipo hanno un'estensione che raramente supera qualche decina di chilometri in lunghezza (lungo l'asta fluviale), e poche centinaia di metri di larghezza oltre al livello dell'argine (trasversalmente alla direzione dell'asta).

La scansione laser da piattaforma aerea (LiDAR - *Light Detection And Ranging*) rappresenta una metodologia di acquisizione dati ad elevata precisione, particolarmente adatta al rilievo di bassi fondali in fascia costiera (Cicciodemarco, 2003; Ciavola et al., 2004; AA.VV. 2009) e di alvei fluviali non troppo profondi (Casella, 2002), che consente di abbracciare aree sempre più vaste e con un livello di errore al più decimetrico (± 4 cm sistematici e ± 6 cm accidentali, Brovelli et al., 2004).

Il prodotto finale di un rilievo LiDAR è rappresentato da una nuvola di punti, dei quali si conoscono le coordinate planimetriche, la quota ed il valore dell'intensità riflessa. Dall'analisi dei punti riflessi è poi possibile individuare un ritorno multiplo del segnale e, in presenza di vegetazione non

eccessivamente densa, è possibile ottenere l'informazione altimetrica sottostante, generando un segnale riflesso a vari livelli della fronda e del suolo (Figura 5).

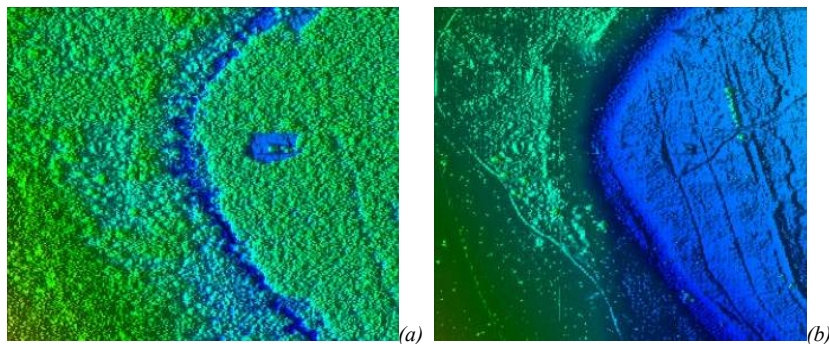


Figura 5 – DSM di un alveo fluviale ottenuto tramite rilievo LiDAR: primo impulso (a) ed ultimo impulso (b) del segnale. Si noti come il segnale laser penetri, con l'ultimo impulso, oltre la vegetazione dell'area golenale.

Dalla nuvola di punti così ottenuta è poi possibile ottenere, per elaborazioni successive, un modello digitale della superficie (DSM, *Digital Surface Model*) e un modello digitale del terreno (DTM, *Digital Terrain Model*), con una risoluzione planimetrica dell'ordine del metro, funzione dalla densità dei punti a terra (e quindi dalla risoluzione angolare dello strumento laser a scansione e dalla quota di volo).

La modellazione numerica degli alvei fluviali

Nel passato, i più importanti problemi di dinamica fluviale sono stati affrontati attraverso un approccio di tipo sperimentale, grazie anche allo sviluppo di grandi laboratori. Le possibilità messe a disposizione oggi dal calcolo elettronico e gli sviluppi più recenti dell'analisi numerica hanno permesso di affrontare gli stessi problemi in termini numerici. In particolare, i modelli idraulici mono- e bi-dimensionali utilizzati per la definizione della propagazione dell'onda di piena e delle aree potenzialmente allagabili sono ormai numerosi: HEC-RAS, FLOW2D, MIKE11, oltre a modelli elaborati *ad hoc* dalle singole Autorità di Bacino, sono solo alcuni dei *software* nati a tale scopo.

In questo lavoro, per lo studio sulla propagazione dell'onda di piena nei corsi d'acqua e dei fenomeni di esondazione la scelta è ricaduta sul software HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Centers River Analysis System*) sviluppato dall'*United States Army Corps of Engineering* (USACE). In particolare, è stata utilizzata la versione 4.1 rilasciata a gennaio 2010. Tale scelta è stata dettata dall'ampia diffusione del codice nell'ambito dei tecnici operanti nel settore dell'ingegneria idraulica, principalmente legata alla sua natura *freeware*, e dalle numerose sue applicazioni effettuate in tutto il mondo.

Per studiare il comportamento e l'evoluzione delle portate dei corsi d'acqua, l'ingegneria civile idraulica si basa su modelli governati da due equazioni fondamentali, l'equazione del moto (ovvero, teorema di Bernoulli applicato alle correnti di moto vario, ossia dipendente dal tempo) e l'equazione di continuità applicata alle correnti. L'insieme delle due equazioni prende anche il nome di equazioni di De Saint Venant. Il modello idrodinamico qui adottato (Figura 6) descrive invece il moto mono-dimensionale e stazionario (la velocità del fluido in un punto dipende solo dalle coordinate del punto stesso e non dal tempo) di una corrente tale che, in ogni sezione, la distribuzione delle pressioni possa essere considerata di tipo idrostatico.

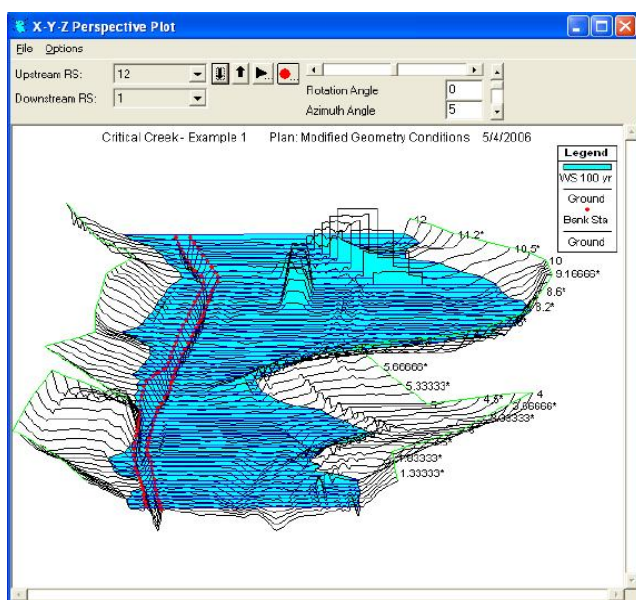


Figura 6 – Schematizzazione del corso d'acqua con il modello monodimensionale di HEC-RAS.

Il modello inoltre è *a fondo fisso*, cioè sono state trascurate le variazioni nel tempo delle quote del fondo dovute al trasporto solido, e può essere adottato per la descrizione di alvei fluviali con pendenze di fondo non troppo elevate (non superiori al 10%).

Tali ipotesi, benché semplificative, risultano tuttavia, accettabili, poiché, sebbene un'onda di piena si manifesti in moto vario, la portata al colmo persiste solo per durate dell'ordine di qualche minuto, in relazione alla superficie del bacino sotteso.

Le principali caratteristiche della corrente (livello idrico e velocità media) sono calcolate a partire da una sezione alla successiva risolvendo l'equazione che esprime il bilancio di energia della corrente tra le medesime sezioni (equazione di Bernoulli) attraverso una procedura iterativa nota come *standard step method*. In corrispondenza di particolari situazioni localizzate (ponti, tombini, stramazzi, risalti idraulici, etc.) per le quali il moto non può essere considerato gradualmente variato vengono utilizzate le equazioni di bilancio della quantità di moto o relazioni di tipo empirico. Per i dettagli relativi alle tecniche numeriche su cui il codice è basato si rimanda al manuale di utilizzo di HEC-RAS (Brunner, 2010).

La generazione semi-automatica delle mappe di rischio

Come anticipato in precedenza, il presente lavoro si propone di mostrare un metodo alternativo per la generazione delle mappe di rischio fluviale, basato sull'impiego congiunto di un codice di modellazione fluviale molto diffuso in campo professionale (HEC-RAS, presentato nel paragrafo precedente) e della sua estensione per ambienti GIS (HEC-GeoRAS, funzionante in ambiente ESRI ArcGIS, Ackermann 2009). Quest'ultima estensione, in particolare, consente di estrarre da un DSM/DTM (preferibilmente ottenuto tramite tecnica LiDAR) le informazioni geometriche (planimetriche ed altimetriche) necessarie per la modellazione numerica tramite HEC-RAS, e di importare in un secondo tempo i risultati di tali simulazioni per la creazione di mappe di inondazione e per la definizione delle aree a rischio.

Tale procedura, sintetizzata in Figura 7, è costituita per la maggior parte da operazioni automatiche, che non richiedono vere e proprie misure *in situ* (eccezion fatta per un sopralluogo di carattere idraulico, per la taratura delle scabrezze delle aree golenali).

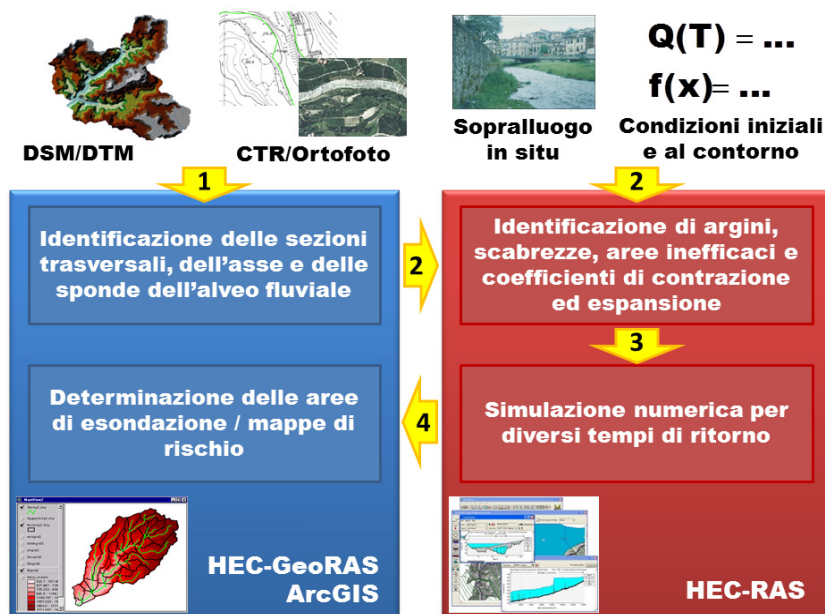


Figura 7 – Schematizzazione della procedura per il calcolo delle mappe di esondazione.

Come riportato in Figura 7, la procedura può essere suddivisa in quattro diverse fasi:

- 1) il DTM utilizzato per discretizzare l'alveo fluviale viene importato in HEC-GeoRAS/ArcGIS. Tale modello digitale deve essere caratterizzato da una risoluzione spaziale sufficientemente elevata (con interdistanza tra i punti non superiore ai 10 m, soprattutto nel caso in cui si tratti di modelli a maglia regolare) e deve contenere le informazioni relative alla batimetria dell'alveo (per questo motivo, si parla più correttamente di DTM e non di DSM). In aggiunta al modello digitale del terreno, è possibile importare in ArcGIS tutte le informazioni geografiche (CTR, ortofoto, etc.) che possono aiutare l'utente ad identificare i parametri morfologici del corso d'acqua, ovvero l'asse del fiume e le sponde laterali, oltre che un certo numero di sezioni trasversali da decidersi in funzione dell'andamento idrografico e della larghezza dell'alveo stesso;
- 2) i layer dall'ambiente GIS vengono importati nel software di modellazione numerica HEC-RAS, in cui è possibile introdurre, oltre alle condizioni iniziali (portata iniziale, dato un certo tempo di ritorno) ed al contorno (vincoli, tipo di moto) dell'analisi, gli ulteriori parametri necessari per la simulazione idraulica ovvero, per ciascuna sezione trasversale, la posizione degli argini, delle scabrezze, delle aree inefficaci e dei coefficienti di contrazione ed espansione. A proposito di questi parametri, a meno che non si vogliano utilizzare dei parametri approssimati ottenuti dall'esperienza o da un'analisi approssimativa tramite ortofoto aeree, è necessario condurre un'analisi *in situ* al fine di verificare, ad esempio, l'effettiva situazione delle aree golenali. Questa operazione, l'unica da compiersi non in ufficio, rappresenta anche il "collo di bottiglia" dell'intera procedura. Occorre comunque considerare come tale operazione abbia dei tempi di esecuzione ridotti (stimabili in mezza giornata lavorativa per lunghezze dell'asta

fluviale di 15-20 km, oltre al tempo di raggiungimento dell'area di interesse), per nulla confrontabili con quelli necessari per l'esecuzione di un rilievo topografico di dettaglio;

- 3) dopo la definizione dei parametri morfologici e morfometrici dell'alveo fluviale, viene eseguita la modellazione numerica vera e propria, tramite il codice di calcolo HEC-RAS. In questo modo è possibile simulare la risposta del corso d'acqua a portate differenti, ciascuna delle quali è caratterizzata da uno specifico tempo di ritorno;
- 4) i risultati della modellazione numerica vengono importati nuovamente in ambiente GIS, attraverso l'applicativo HEC-GeoRAS. In questo ambiente è quindi possibile generare le mappe di esondazione per ciascun tempo di ritorno considerato, incrociando i dati ottenuti dalle simulazioni idrauliche con quelli altimetrici estraibili da un DTM o da un DSM. Tale modello digitale, anche diverso da quello utilizzato nella prima fase, potrà essere caratterizzato da una risoluzione spaziale inferiore (punti comunque non più distanti di 20-25 m, onde evitare di discretizzare troppo il terreno), e dovrà avere un'estensione sufficiente da coprire tutte le aree potenzialmente esondabili. In questa fase risulta particolarmente utile ricorrere all'uso di un DSM, che contiene oltre alle informazioni relative all'andamento del terreno, anche quelle altimetriche dei possibili ostacoli che potrebbero interagire con l'evento alluvionale (edifici, rilevati stradali, etc.).

Nel seguito si riporta un'applicazione della procedura sopra descritta, applicata alla fascia fluviale del Fiume Sesia a Vercelli.

Il caso studio del Fiume Sesia

La procedura per la determinazione delle mappe di esondazione è stata applicata al tratto del Fiume Sesia compreso tra la confluenza con il Torrente Cervo, nei pressi di Vercelli, e la chiusa idraulica posta nei pressi di Prarolo (VC), al confine tra Piemonte e Lombardia, per una lunghezza complessiva dell'asta fluviale di circa 16 km (Figura 8).

Preliminarmente alla procedura è stato effettuato un sopralluogo dell'area interessata, in maniera da valutare le scabrezze delle aree golenali (Figura 9). Si è provveduto inoltre a raccogliere i dati geografici disponibili per l'area di interesse.

In particolare, è stato possibile reperire i seguenti dati:

- DTM GRID Piemonte Est (precisione 1 m, passo 10 m) della Regione Piemonte;
- DTM GRID Lombardia (precisione 2 m, passo 2 m) della Regione Lombardia;
- DSM PST-A (precisione 1 m, passo 1 m) del Ministero dell'Ambiente;
- CTR in scala 1:10000 della Regione Piemonte e della Regione Lombardia;
- Ortofoto del Portale Cartografico Nazionale (PCN).



Figura 8 – Il tratto del Fiume Sesia considerato, e i punti in cui è stato effettuato il sopralluogo per le scabrezze dell'alveo e delle aree golenali.



(a)



(b)

Figura 9 – Immagini del sopralluogo per le scabrezze: sezione di chiusura (a) e sezione intermedia (b).

A seguito della verifica sulla coerenza tra i modelli digitali del terreno di Regione Piemonte e Regione Lombardia, questi sono stati uniti in maniera da coprire l'intera area di interesse. Il risultato di tale operazione è stato un unico DTM, grigliato in una maglia regolare a passo 10 m e proiettato nel sistema di riferimento UTM-WGS84 (ETRF89 - IGM95). Tale DTM è stato poi importato in ambiente ArcGIS, insieme alle CTR regionali e alle ortofoto disponibili *on-line* sul PCN. Attraverso l'applicativo HEC-GeoRAS (Figura 10) è stato quindi possibile identificare l'asta fluviale, le sponde del corso d'acqua, oltre ad una trentina di sezioni trasversali necessarie per discretizzare numericamente l'alveo fluviale in HEC-RAS.

In particolare, i livelli idrici del fiume sono stati stimati per le portate di piena corrispondenti a tempi di ritorno di 20, 50, 100, 200 e 500 anni, attraverso una procedura di stima locale sulla serie dei massimi annui di portata di piena basata sulla distribuzione di Gumbel.

La condizione al contorno richiesta per la simulazione idraulica è stata il passaggio per l'altezza critica in corrispondenza della sezione a valle (chiusa di Prarolo). Tale condizione è verificata nella realtà dalla presenza di un salto di fondo, visibile anche in Figura 9, ed è giustificata dalla debole pendenza dell'asta fluviale, che induce un moto di corrente lenta.

A valle della simulazione idraulica, i risultati ottenuti sono stati importati nuovamente nell'ambiente GIS attraverso l'applicativo HEC-GeoRAS. La Figura 12 riporta la mappa di esondazione ottenuta partendo dai livelli idrici stimati ed incrociandoli con il DSM sopra citato, in maniera da ottenere l'interazione tra l'area esondata e gli eventuali ostacoli (fabbricati, rilevati stradali, etc.) presenti. Dalla sovrapposizione della mappa di esondazione così ottenuta con le CTR regionali è stato altresì possibile individuare i fabbricati a rischio idraulico (Figura 12) in funzione dei diversi tempi di ritorno considerati.

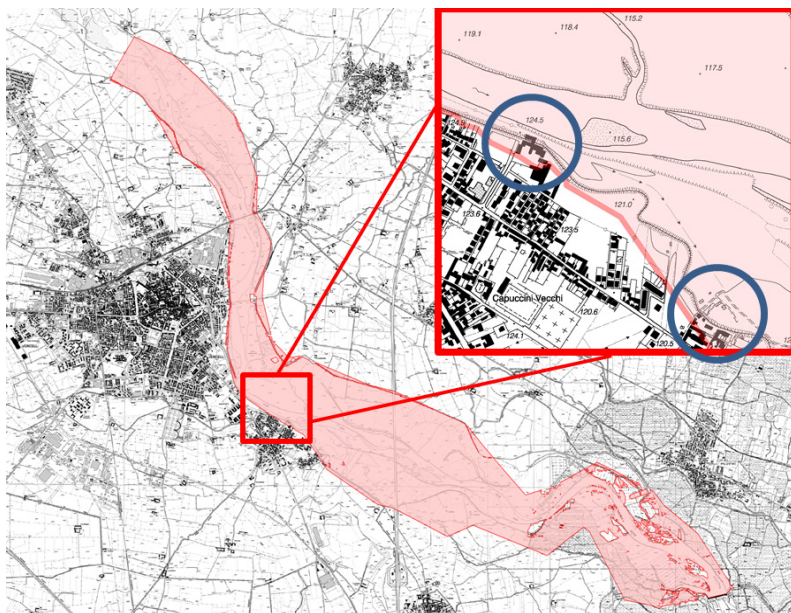


Figura 12 – Mappa di esondazione con tempo di ritorno $T = 500$ anni ed ingrandimento (in alto a destra) con evidenziati i fabbricati a rischio.

Conclusioni

La conoscenza delle aree di esondazione è oggi un aspetto fondamentale per la definizione delle fasce di rischio idraulico. In questo studio è stato presentato un approccio semi-automatico per la creazione delle mappe di esondazione, a partire dalle informazioni geografiche disponibili nei DTM/DSM e nelle CTR, spesso a carattere regionale, realizzati dalle Pubbliche Amministrazioni. La procedura descritta è stata sviluppata utilizzando i software gratuiti HEC-RAS ed HEC-GeoRAS, quest'ultimo operante nel ben noto ambiente ESRI ArcGIS.

Tale procedura è stata applicata ad un tratto di circa 16 km del Fiume Sesia (bacino del Po) in prossimità dell'abitato di Vercelli. I risultati ottenuti hanno consentito di determinare i livelli idrici per diversi tempi di ritorno, e di individuare le aree a rischio. Tale procedura risulta facilmente applicabile e ripetibile da parte di personale tecnico e fornisce una prima stima, già molto dettagliata, delle aree soggette a rischio idraulico.

Come ben noto, l'utilizzo di sezioni longitudinali e trasversali estratte da un modello digitale del terreno introduce un ulteriore fattore di incertezza legato all'accuratezza altimetrica (ed in parte anche a quella planimetrica) del modello stesso. Risulta pertanto evidente come l'impiego di DTM ad elevata risoluzione consenta di migliorare la stima delle mappe di esondazione (Cook e Merwade, 2009).

Un'ulteriore problematica è collegata alla presenza di manufatti o infrastrutture idrauliche presenti lungo l'asta fluviale, difficilmente individuabili attraverso il solo uso di modelli digitali. A tal proposito, è pertanto ancora necessario ricorrere a rilievi topografici di dettaglio ad integrazione delle informazioni estraibili da un DTM.

Il presente lavoro è stato in parte condotto nell'ambito del Progetto Interreg Italia/Svizzera HELIDEM "*Helvetia-Italy Digital Elevation Model*" (ID: 13881216).

Bibliografia

- AA.VV. (1996), *Piano Stralcio delle Fasce Fluviali*, Annesso sul monitoraggio morfologico e del trasporto solido degli alvei, Autorità di bacino del Fiume Po, 9-14.
- AA.VV. (2009), *Rilievo di dettaglio della batimetria costiera laziale con tecnologie LiDAR e valutazione delle caratteristiche fisiche e biologiche in aree marine della costa laziale di specifico interesse ambientale*, Rapporto della fase 1A - Ricerca bibliografica di settore e implementazione della metodologia, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA).
- Ackermann C.T. (2009), *HEC-GeoRAS User's Manual*, USACE (US Army Corps of Hydraulic Engineers), Davis (CA-USA).
- Brovelli M.A., Cannata M., Longoni U.M. (2004), "Estrazione di DTM da scansione laser: il test comparativo ISPRS", *Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA*, Perugia.
- Brunner G.W. (2010), *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*, USACE (US Army Corps of Hydraulic Engineers), Davis (CA-USA).
- Casella V. (2002), "Estrazione del DTM di precisione dell'argine di un fiume: fotogrammetria analitica, fotogrammetria digitale e laser scanning a confronto", *Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA*, Perugia.
- Ciavola P., Perini L., Luciani P., Armaroli C. (2006), "Il rilievo LiDAR della costa dell'Emilia-Romagna: uno strumento per la valutazione dell'impatto delle mareggiate sulle zone costiere e per la caratterizzazione della morfodinamica delle spiagge", *HydroGeo*, 1/2006: 18-25.
- Cicciodemarco S. (2003), *Applicazione del LiDAR batimetrico per la costruzione tridimensionale della morfologia e delle strutture sommerse in zone costiere: il caso di Broward County (FL)*, Tesi di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio, Università La Sapienza, Roma.
- Cook A., Merwade V. (2009), "Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping", *Journal of Hydrology*, 377: 131-142.
- Covelli C. (2006), *Sulla formazione di brecce nei rilevati arginali: implicazioni relative alla protezione idraulica del territorio*, Tesi di Dottorato, Università Federico II, Napoli.
- Surian N., Rinaldi M., Pellegrini L. (2009), *Linee guida per l'analisi geomorfologica degli alvei fluviali e delle loro tendenze evolutive*, edizioni CLEUP, Padova, 25-36.

Studio preliminare di un sistema innovativo per l'identificazione della sostanza organica dei suoli basato sull'integrazione di dati spettroradiometrici e dati analitici

Valeria Ancona (*), Raffaella Matarrese (*), Maria Rita Muolo (**), Rosamaria Salvatori (***), Pasquale Abbruzzese (*), Vito Felice Uricchio (*), Nicola Dongiovanni (**)

(*) Istituto di Ricerca Sulle Acque del CNR, Via F. De Blasio 5, Bari (BA), Italy, Tel. 0805820534, Fax 0805313365
e-mail: valeria.ancona@ba.irsra.cnr.it; raffaella.matarrese@ba.irsra.cnr.it
pasquale.abbruzzese@ba.irsra.cnr.it; vito.uricchio@ba.irsra.cnr.it;

(**) Servizi di Informazione territoriale -SIT- s.r.l., P.zza Papa Giovanni Paolo II 8, Noci (BA), Italy
Tel. 0804976098, Fax 0804970758, e-mail: mr.muolo@sit-puglia.it; n.dongiovanni@sit-puglia.it

(***) Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del CNR, Area della Ricerca di Roma 1, Montelibretti
V. Salaria Km 29,300, Monterotondo (RM), Italy, Tel 0690672451, Fax 0690672472, e-mail salvatori@iia.cnr.it

La Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio COM(179) del 2002 (*Verso una strategia tematica per la protezione del suolo*) ha definito la diminuzione della sostanza organica nei suoli come uno dei più rilevanti processi di degrado che affliggono la risorsa suolo in Europa. Tale processo, inoltre, ha ripercussioni dirette sulla qualità delle acque e dell'aria, sulla biodiversità e sui cambiamenti climatici ma può anche incidere sulla salute dei cittadini e mettere in pericolo la sicurezza dei prodotti destinati all'alimentazione umana e animale. Sebbene un cospicuo numero di studi scientifici abbia già dimostrato l'impatto che alcune specifiche pratiche di gestione agricola o i cambiamenti d'uso del suolo hanno sulle scorte di carbonio organico del suolo (e.g. Johnson and Curtis, 2001; Guo and Gifford, 2002; West and Post, 2002) diverse difficoltà sussistono nella stima delle riserve di carbonio organico e della loro evoluzione temporale (Post *et al.*, 2001). Una di queste è correlata alla variabilità spaziale del carbonio organico del suolo che maschera il suo lento accumulo o esaurimento; anche a scala di campo, la densità di campionamento necessaria per rilevare un cambiamento nel contenuto di carbonio organico del suolo può essere molto alta (Stevens *et al.*, 2008). Pertanto, emerge la necessità di sviluppare un sistema di monitoraggio che consenta di seguire l'evoluzione di tale parametro con continuità ed uniformità nel *topsoil* con la finalità di acquisire informazioni utili alla pianificazione di pratiche agricole con particolare riferimento all'impiego di ammendanti e di concimi organici.

Il telerilevamento, da satellite o da piattaforma aerea, è un metodo fisico non distruttivo, rapido e riproducibile che fornisce una previsione economica delle proprietà fisiche, chimiche e biologiche del suolo in funzione del loro comportamento spettrale nella gamma di lunghezze d'onda dal visibile all'infrarosso termico (Ben-Dor and Banin, 1995; Reeves *et al.*, 2000, 2002; Shepherd and Walsh, 2002; Islam *et al.*, 2003). È ampiamente dimostrato in letteratura che il carbonio organico nel suolo svolge un ruolo di primo piano rispetto a molti processi chimici e fisici in ambiente terreno influenzandone in modo significativo la forma e la natura della firma spettrale ad esso associata a diverse lunghezze d'onda (Ben-Dor *et al.*, 1999).

Negli ultimi anni, i progressi della tecnologia e della ricerca relativamente a tecniche spettroscopiche applicate allo studio dei suoli, hanno portato alla determinazione sempre più precisa dei contenuti di carbonio organico del suolo in laboratorio (e.g. Reeves *et al.*, 1999; Chang and Laird, 2002) e direttamente in campo mediante spettrometri portatili (e.g. Barnes *et al.*, 2003). Inoltre, la capacità dei sensori EO (*Earth Observation*) di nuova generazione di indagare grandi superfici in una singola ripresa, permette, di identificare le proprietà del suolo con un'alta risoluzione spettrale e di identificare la loro distribuzione su un territorio con un'elevata risoluzione

spaziale. Studi recenti hanno evidenziato le potenzialità dell'utilizzo di sensori multi/iper-spetttrali montati su piattaforme aviotrasportate per monitorare il carbonio organico nel suolo (Stevens *et al.*, 2010) e mappare le proprietà superficiali del suolo agricolo con elevate risoluzioni spetttrali e spaziali (Ben-Dor, et al., 2002; Selige *et al.*, 2006; Stevens *et al.*, 2006).

Nel presente lavoro è stata effettuata un'indagine preliminare sull'utilizzo di dati iperspettrali *in situ*, acquisiti mediante lo spettrometro portatile FieldSpec3, per l'identificazione delle firme spetttrali della sostanza organica in 30 campioni di suolo arricchiti con diverse concentrazioni di sostanza organica. Al contempo, sono state condotte analisi di laboratorio del contenuto di sostanza organica sugli stessi campioni di suolo con l'obiettivo di verificare la variazione dell'andamento spetttrale all'aumentare del carbonio organico. I risultati preliminari hanno evidenziato le potenzialità dell'utilizzo di un sistema innovativo -basato sull'integrazione di dati spettrometrici e dati analitici- nell'identificazione della sostanza organica del suolo. La ricerca è tutt'ora in atto al fine di individuare una metodologia, basata sull'integrazione di dati iperspettrali *in situ* e da remoto, a supporto delle attività di monitoraggio del carbonio organico del suolo su scala locale.

Riferimenti bibliografici

- Ben-Dor, E., Banin, A., 1995. "Near infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties." *Soil Science Society of America Journal*, 59, 364–372.
- Ben-Dor, E., Irons, J.R., Epema, J.F., 1999. "Soil reflectance: remote sensing for the Earth Science". In: Rencz, Andrew N. (Ed.), 3 ed. *Manual of Remote Sensing*, vol.3.
- Ben-Dor, E., Patkin, K., Banin, A., Karnieli, A., 2002. "Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data—a case study over clayey soils in Israel." *Intern. J. of Rem.Sens.* 23, 1043–1062.
- Barnes, E.M., Sudduth, K.A., Hummel, J.W., Lesch, S.M., Corwin, D.L., Yang, C., Daughtry, C.S.T., Bausch, W.C., 2003. "Remote and ground-based sensor techniques to map soil properties". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69 (6), 619–630.
- Chang, C.-W., Laird, D.A., 2002. "Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N". *Soil Science*, 167 (2), 110–116.
- Guo, L.B., Gifford R.M., 2002. "Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis" *Glob Change Biology* 8, 345–360.
- Islam, K., Singh, B., McBratney, A.B., 2003. "Simultaneous estimation of various soil properties by ultra-violet, visible and near-infrared reflectance spectroscopy." *Australian Jour. of Soil Research* 41, 1101–1114.
- Johnson D.W., Curtis P.S., 2001. "Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis." *Forest ecology and management*, 140, 227–238.
- Post W.M., Izaurralde R.C., Mann L.K., Bliss N., 2001. "Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil." *Climatic Change*, 51, 73–99.
- Reeves, J.B., McCarty, G.W., Meisinger, J.J., 1999. "Near infrared reflectance spectroscopy for the analysis of agricultural soils". *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 7, 179–193.
- Reeves, J.B., McCarty, G.W., Meisinger, J.J., 2000. "Near infrared reflectance spectroscopy for the determination of biological activity in agricultural soils." *J. of Near Infrared Spectroscopy* 8 (3), 161–170.
- Reeves, J.B., McCarty, G., Reeves, V.B., Follet, R.F., Kimble, J.M., 2002. "Mid-versus near infrared diffuse reflectance spectroscopy for the quantitative analysis of organic matter in soils and other biological materials." *Abstract of Papers—American Chemical Society* 223, U141–U142.
- Selige, T., Böhner, J., Schmidhalter, U., 2006. "High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures." *Geoderma* 136 (1–2), 235–244.
- Shepherd, K.D., Walsh, M.G., 2002. "Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties." *Soil Science Society of America Journal* 66 (3), 988–998.
- Stevens, A., van Wesemael, B., Vandenschrick, G., Touré, S., Tychon, B., 2006. "Detection of carbon stock change in agricultural soils using spectroscopic techniques." *Soil Sci. Soc. of America Jour.* 70, 844–850.
- Stevens A., van Waseamel B., Bartholomeus H., Rosillon D., Tychin B., Ben -Dor E., 2008. "Laboratory, field and airborne spectroscopy for monitoring organic carbon content in agricultural soils". *Geoderma*, 144, 395–404.
- Stevens A., Udelhoven T., Denis A., Tychon B., Liroy R., Hoffmann L., van Wesemael B., 2010. "Measuring soil organic carbon in croplands at regional scale using airborne imaging spectroscopy". *Geoderma*, doi: 10.1016/j.geoderma.2009.11.032.
- West T.O., Post W.M., 2002. "Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis." *Soil Science Society of American Journal*, 66, 1930–1946.

Mappe di uso e di copertura del suolo ottenute attraverso la classificazione di immagini Landsat-TM per la comprensione delle dinamiche in atto nelle regioni sub-Saheliane del Niger

Antoninetti M., Nutini F. (*); Boschetti M., Villa P., Bresciani M., Brivio P.A.

CNR-IREA, Via Bassini 15, 20133 Milano, 02-23699459, antoninetti.m@irea.cnr.it

(*) Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Produzione Vegetale, Via Celoria 2, 20133 Milano.

Riassunto

Il monitoraggio dello stato delle risorse naturali a scala locale nella regione africana del Sahel richiede lo sviluppo di strumenti cartografici di maggior dettaglio rispetto alle analisi di tipo regionale finora disponibili con dati satellitari a bassa risoluzione. Per valutare i cambiamenti di uso/copertura del suolo, riconducibili alla degradazione o al miglioramento della gestione delle aree agricole/pastorali, si sono utilizzate una serie di immagini Landsat relative ad annate diverse. Le classi di interesse identificate sono le aree agricole, i suoli nudi, la vegetazione naturale arborea/arbustiva e la vegetazione erbacea. L'identificazione delle differenti coperture vegetali è stata ottenuta grazie all'analisi delle risposte fenologiche alla pioggia, principale variabile guida dello sviluppo vegetazionale in queste aree, interpretando una serie multitemporale di dati di NDVI calcolati sulle immagini Landsat.

L'interpretazione dell'andamento fenologico, la foto interpretazione e le informazioni derivanti da letteratura specializzata consentono di utilizzare opportunamente le tecniche di classificazione supervisionate dei dati digitali per ottenere mappe di land cover ad alta risoluzione. Sono state così prodotte mappe di copertura e di uso del suolo per gli anni 2000 e 2007 sulle zone agropastorali del Niger. L'articolo presenta un confronto preliminare tra i prodotti cartografici ottenuti, con l'obiettivo di individuare, caratterizzare e comprendere le dinamiche dei cambiamenti in corso al fine di contribuire al monitoraggio, allo sviluppo ed alla gestione ottimale delle risorse naturali nel Sahel.

Abstract

This work is centered on African Sahel region, an area interested by an extensive famine and by chronic food emergency for local population during from the second half of the last century. Monitoring of natural and agricultural resources at local scale needs the development of systems with high cartographic detail, able to allow the change from regional analysis to more precise studies, as largely emphasized in various scientific papers. Different land cover maps, derived from multiyear Landsat imagery, have been compared to evaluate the changes of use/cover of a Sahel sub-area, directly traced back to a deterioration or improvement of agro/pastoral zones. The identified vegetation cover classes are: agricultural area, bare soil, natural tree/shrub, and grassland. The classes have been defined by means of interpretations of phenological response to rain, the main indicator of vegetation growth in this specific area, analyzing multitemporal sequences of Landsat NDVI images. Crops and animal pasture are renewed during the rainy season. The interpretation of phenological progress, photointerpretation, and other specific information from literature, finally allow the use of digital data supervised classification routines to produce high resolution land cover and use maps for the years 2000 and 2007 of a pasture and agriculture land in the Republic of Niger. The results show a preliminary comparison among different multiyear maps with the objective of identifying, characterizing, and understanding the dynamics of past and actual environmental changes, in order to offer a contribution in the development and protection of Sahel local population and nature.

Introduzione

Nel corso degli ultimi 35 anni le aree sub-Sahariane dell'Africa, a causa di una prolungata siccità, sono state interessate da anomali fenomeni antropici di migrazione e di pressione demografica, con conseguenti impatti negativi sulla vegetazione naturale, biodiversità, stabilità socio-economica e sicurezza alimentare (Brink, Eva, 2009). Infatti, lo sviluppo e la prosperità del Sahel Africano, una zona semi-arida di transizione fra il deserto del Sahara a Nord e la savana boschiva Sudanese a Sud, dipendono in gran parte dal regime delle piogge.

La FAO (*Food & Agriculture Organization*) mette a disposizione dati aggiornati relativi all'estensione delle foreste ed alla produttività agricola del Sahel. Tuttavia, queste informazioni, causa le complesse condizioni ambientali e logistiche dell'area, sono carenti in consistenza e completezza (Brink, Eva, 2009).

La disponibilità e le peculiarità di serie continue di riprese d'immagini telerilevate da satellite hanno significativamente migliorato le conoscenze sulle variazioni annuali ed intra-annuali della vegetazione anche in queste aree remote.

Le aree Saheliane si sono recentemente caratterizzate per una ripresa dei fenomeni piovosi e, di conseguenza, dello sviluppo di copertura vegetale. L'analisi di serie temporali di NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), ottenute da immagini da satellite a bassa risoluzione (1 km), mostra chiaramente un trend positivo nella copertura vegetale del Sahel (Huber et al., 2011). In particolare, il periodo 1994-2003 segna un passaggio verso una stagione molto più umida rispetto al passato, anche se non così umida come il periodo di massima piovosità registrata nel Sahel dal 1930 al 1965 (Anyamba, Tucker, 2005). Questa variazione positiva nel regime delle piogge ha portato a un consistente aumento delle aree agricole, in particolare le coltivazioni di miglio (Capecchi e Crisci, 2008). Inoltre, la relazione NDVI/piogge mostra che in alcune aree il comportamento della vegetazione presenta caratteristiche anomale rispetto ad altre aree simili in funzione delle attività delle popolazioni locali. L'analisi multitemporale a scala appropriata dei limiti di queste zone, che in funzione del regime delle piogge possono variare anche di 150 km ogni anno (Tucker, Nicholson, 1999), aiuta alla comprensione dei complessi fenomeni di desertificazione e degrado ambientale in atto (Hermann, Anyamba, 2005).

Una serie temporale (1999-2008) di dati NDVI derivati dai dati SPOT-Vegetation (VGT) sono stati recentemente utilizzati per monitorare l'evoluzione della vegetazione in Africa, nell'ambito di NARMA (*Natural Resources Monitoring in Africa*) del Progetto Geoland2 finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro (Nutini et al., 2010). Oltre ai dati NDVI sono stati utilizzati dati di pioggia RFE (*Rain Fall Estimate*) resi disponibili da FEWS NET (*Famine Early Warning System Network*) dell'Agenzia per lo Sviluppo Internazionale (US-AID) degli Stati Uniti. Non disponendo di un numero sufficiente di stazioni pluviometriche a terra, FEWS NET utilizza dati satellitari per produrre mappe di piovosità con 8 km di risoluzione spaziale ogni 10 giorni. L'analisi congiunta di dati NDVI e RFE ha permesso di identificare le anomalie locali della vegetazione che in parte potrebbero non essere collegate direttamente alle sole variazioni della stagione umida dell'area. Queste zone, essenzialmente utilizzate per attività antropiche di pastorizia ed agricoltura, sono caratterizzate da un aumento dei valori di NDVI anche quando la quantità di precipitazione sembra essere rimasta costante nel tempo, o, in alcuni casi, addirittura diminuita.

L'analisi dei valori di NDVI calcolati da dati Landsat TM a maggior risoluzione spaziale può quindi migliorare le capacità di caratterizzazione e comprensione delle dinamiche dei cambiamenti attualmente in corso in queste aree.

Area di studio

Il Niger è uno dei paesi più poveri al mondo, con i tre quarti della superficie coperti da deserti e con l'85% della popolazione interamente dipendente dalle magre risorse dell'agricoltura e pastorizia, che rappresentano il 40% dell'intero prodotto interno lordo. Il Niger comprende una zona unicamente pastorale a Nord, verso i grandi deserti Saheliani, ed una parte agro pastorale a Sud, sufficiente mente umida per consentire le colture di cereali, essenzialmente miglio. Tuttavia il reticolo irriguo è

talmente poco sviluppato, meno del 2% della superficie coltivata, da rendere molto aleatoria la produzione agricola.

Se nel 2004 l'ONU prevedeva una nuova carestia alimentare per l'anno successivo, a causa della siccità e della concomitante invasione di cavallette, con una diminuzione dell'11% della produzione cerealicola e del 35% di quella foraggiera, e conseguente penuria alimentare per 2,5 milioni di persone, e perdita del bestiame per più di 10.000 allevatori, nel 2010 la FAO ha tuttavia stimato un aumento del 62% della produzione agricola rispetto all'anno precedente.

L'area di studio, situata a ridosso del limite con il Sahara, è la regione circostante alla città di Filinguè, nella provincia di Tillabéri (Figura 1). In questa regione si sono verificate numerose crisi umanitarie (2000, 2004 e 2010, FEWS NET) in relazione ad un degrado delle risorse naturali e della produzione agricola. In uno studio recente condotto nell'ambito NARMA uno dei *Core Information Service* (CIS) del progetto EU Geoland-2 (<http://www.gmes-geoland.info/>), tale area è risultata un hot spot critico (Nutini et al., 2010).

La città di Filinguè (14°21'8"N 3°19'0"E), con una popolazione di 11.700 abitanti, ed una elevazione media i 212 metri sul livello del mare, è la capitale del Dipartimento di Tillabéri, nella parte Sud-Ovest del Niger, a circa 350 km dalla capitale dello Stato, Niamey. L'area, che confina a Sud con il Dipartimento di Dosso, a Nord-Est con la regione di Tahoua e con la Repubblica del Mali, e a Ovest con il Burkina Faso, copre una superficie di 97.251 km², pari al 7,7% dell'intero Niger. La popolazione è pari a circa 2 milioni di abitanti con una densità di 19 abitanti per km².

Le piogge sono generalmente concentrate nei mesi più caldi, da Aprile-Maggio a Settembre-Ottobre, con valori prossimi a zero nei rimanenti periodi (Tabella 1)

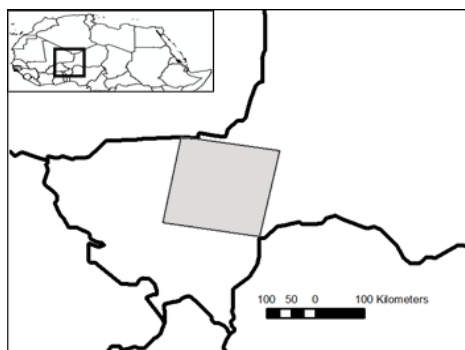


Figura 1 – Ubicazione dell'area di studio in Niger. In grigio chiaro l'area coperta dalle immagini Landsat selezionate.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dec	Anno
mm	0.0	0.0	0.0	1.6	20.5	60.9	139.1	164.4	59.8	6.5	0.1	0.0	449.9

Tabella 1 – Valore medio delle precipitazioni annue a Filinguè, dal 1951 al 1980 (fonte: www.worldclimate.com).

Immagini da satellite

Le immagini utilizzate per questo lavoro sono state acquisite dai sensori Thematic Mapper (TM) e Enhanced Thematic Mapper (ETM+) dei satelliti americani della serie Landsat, in particolare il Landsat 5, attivo dal marzo 1984, ed il Landsat 7, attivo dal Luglio 1999. Le immagini sono

disponibili in modalità gratuita grazie al servizio *Global Visualization Viewer GloVis* dell'USGS (*United States Geological Service*). Tuttavia le concomitanti limitazioni dovute al fatto che non tutte le scene riprese al di fuori degli Stati Uniti sono regolarmente acquisite dall'USGS, ed alla pressoché costante copertura nuvolosa presente nel periodo di sviluppo della vegetazione (massima piovosità) hanno condizionato la scelta della immagini.

Per l'area di studio sono state quindi scelte 6 immagini Landsat 7 nel periodo Marzo-Settembre 2000 e 8 immagini Landsat 5 ed una ripresa con il Landsat 7 nel periodo febbraio- agosto 2007, dalla fine del periodo secco al massimo sviluppo della copertura vegetale, lungo la valle di Filinguè, in Niger (Tabella 2).

Tuttavia per l'anno 2000 alcune zone delle immagini sono risultate sempre coperte dalle nuvole riducendo di conseguenza l'area utile per l'analisi ed il confronto con la stagione 2007.

Le immagini sono distribuite, in formato GeoTiff, con la correzione del terreno standard (Livello 1T). L'accuratezza radiometrica e geometrica è raggiunta utilizzando i punti di controllo ricavati da i DEM disponibili (STRM, NED, CDAC, DTED o GTOPO30). Le immagini vengono ricampionate con il sistema di Convoluzione Cubica (Cubic Convolution, CC) nella proiezione geografica UTM-WGS 84.

Anno	Data	Satellite
2000	16 Marzo	Landsat 7
	19 Maggio	Landsat 7
	20 Giugno	Landsat 7
	22 Luglio	Landsat 7
	23 Agosto	Landsat 7
	24 Settembre	Landsat 7
2007	08 Febbraio	Landsat 5
	24 Febbraio	Landsat 5
	12 Marzo	Landsat 5
	31 Maggio	Landsat 5
	16 Giugno	Landsat 5
	02 Luglio	Landsat 5
	18 Luglio	Landsat 5
	03 Agosto	Landsat 5
	28 Settembre	Landsat 7

Tabella 2 – Elenco delle immagini Landsat acquisite, elaborate ed interpretate (path 192, row 50).

Metodologia

Come indicato da Brink, Eva (2009) per valutare i cambiamenti di uso/copertura del suolo in ambiente africano riconducibili a degradazione o miglioramento delle aree agricolo/pastorali è utile poter identificare almeno quattro macroclassi quali: aree agricole, suolo nudo, vegetazione naturale arborea/arbustiva e vegetazione erbacea. Poiché la firma spettrale della vegetazione varia in funzione di diversi parametri quali densità, stato fenologico e contenuto di umidità, analizzando le variazioni della risposta spettrale della vegetazione in differenti lunghezze d'onda e nel tempo, è possibile ottenere informazioni circa la tipologia di vegetazione esistente.

Le immagini sono state sintetizzate nell'indice spettrale NDVI utilizzando rispettivamente la banda TM3 (rosso 0.63-0.69 μm) e la banda TM4 (infrarosso vicino 0.76-0.90 μm) nella seguente formula $\text{NDVI} = (\text{TM4} - \text{TM3}) / (\text{TM4} + \text{TM3})$.

Per poter effettuare un'analisi multitemporale dell'evoluzione della vegetazione è necessario l'utilizzo di misure quantitative e direttamente comparabili fra loro. Occorre perciò considerare e

quantificare sia le differenti condizioni di illuminazione sia l'influenza dell'atmosfera sulle singole riprese satellitari convertendo i valori di DN (*Digital Number*) in unità assolute di radianza spettrale ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$). Le immagini del sensore Landsat TM, sono state quindi calibrate per la radiometria (Chander et al., 2009), e corrette per gli effetti atmosferici con il codice *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S) (Vermote et al., 1997) utilizzando come input un profilo atmosferico tropicale e un modello di aerosol desertico con i valori di *Aerosol Optical Thickness* (AOT) ricavati dalla stazione AERONET di Banizoumbou (13°32'27" N e 02°39'54" E). I valori multitemporali di NDVI così ottenuti sono stati confrontati con i valori di NDVI dello strumento SPOT-VGT così come resi disponibili da NARMA (Combal et al., 2010).

Infine, per valutare comportamenti temporali distintivi delle differenti coperture di interesse si è condotta un'analisi dell'evoluzione dell'NDVI in relazione alla dinamica delle piogge della regione nell'anno 2007, utilizzando i dati RFE (*Rain Fall Estimate*), con risoluzione a terra di 8 km e temporale di 10 giorni, disponibili sempre nel CIS-NARMA.

Con lo scopo di individuare il migliore approccio metodologico per la classificazione delle immagini, si è confrontata l'accuratezza dei risultati ottenuti mediante l'algoritmo di *Maximum Likelihood* applicato a diversi dataset di immagini (tabella 3). E' stata realizzata una classificazione di tipo spettrale (6 bande del TM/ETM+, esclusa la banda dell'infrarosso termico) per tre immagini considerate significative nell'identificare diverse fasi della evoluzione fenologica: periodo asciutto e massimo di piovosità. Inoltre sono state classificate differenti serie temporali di NDVI e infine è stata provata una combinazione dei due approcci spettrale e temporale. In tutte le classificazioni è stato sempre utilizzato lo stesso set di dati di training e di test.

	dataset	tipo classificazione
data singola	TM Febbraio	spettrale
	TM Luglio	spettrale
	TM Agosto	spettrale
serie temporale	2 date NDVI	trend
	3 date NDVI	trend
	8 date NDVI	trend
	9 date NDVI	trend
combinata	9 date NDVI + TM	spettrale + trend

Tabella 3 – Test di classificazione per l'anno 2007 con algoritmo "Maximum Likelihood" effettuati su singole immagini Landsat, serie temporali di NDVI e combinazione dei due approcci.

Risultati

Il confronto tra la serie di dati di NDVI ottenuti dalle immagini Landsat del 2007 e l'andamento decennale dell'NDVI SPOT/VGT (figura 2), indica una stretta corrispondenza tra i due andamenti temporali così come dimostrato dall'analisi di correlazione ($r^2 = 0.8$). Questo confronto conferma che le correzioni di tipo radiometrico e atmosferico effettuate permettono di ottenere un dato quantitativo comparabile ad altri prodotti satellitari di NDVI.

L'analisi della risposta dei dati NDVI alle piogge ha permesso di identificare diverse classi di copertura vegetazionale; tali dati sono quindi utilizzabili per interpretare il comportamento dei diversi tipi di copertura. In Figura 3 il profilo *a* mostra una risposta vegetativa positiva già alle prime piogge di maggio/giugno ed un NDVI che resta stabilmente più alto di quello di altre zone, indicando così la presenza di vegetazione arborea/arbustiva naturale. A differenza delle aree coperte da sola vegetazione erbacea, in queste zone l'indice NDVI non raggiunge mai valori paragonabili a quelli caratteristici dei suoli nudi. La vegetazione arbustiva ed arborea rappresenta quindi l'unica fonte di foraggio anche durante la stagione secca.

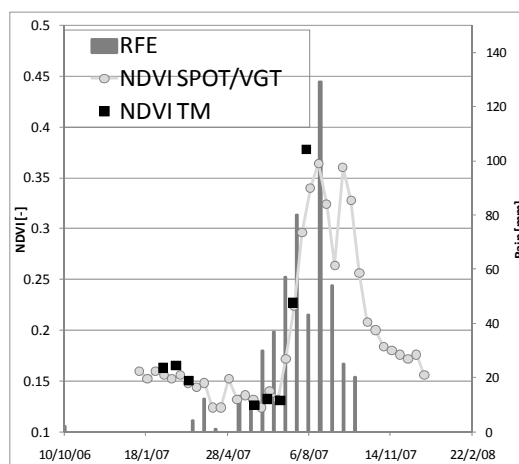


Figura 2 – Confronto fra andamento medio di dati RFE, NDVI-SPOT (grigio) e dati NDVI calcolati da immagini Landsat (nero).

Il profilo *b* in Figura 3 evidenzia una risposta tardiva alle piogge ma più intensa nel tempo. Queste aree sono interpretabili come zone coltivate poiché le pratiche agronomiche locali prevedono una semina unicamente in caso di piogge favorevoli, e questa pratica risulta in una risposta fenologica alle piogge posticipata rispetto alla vegetazione arbustiva.

Il profilo *c* in Figura 3 mostra una risposta della vegetazione alle piogge, oltre che tardiva rispetto ai casi precedenti, inferiore come intensità, con un massimo NDVI pari a 0.25 rispetto ai maggiori valori (0.40) dei due casi precedenti. Questo andamento è tipico di un sistema naturale erbaceo in cui la vegetazione non raggiunge il vigore di un campo coltivato a sorgo o miglio.

Il profilo *d* (Figura 3) non presenta alcuna stagionalità nell'NDVI, ad indicare un'area di suolo nudo durante l'intera annata, mentre il profilo di NDVI che identifica i corpi idrici mostra un suolo nudo che viene allagato con le prime piogge. Infatti il profilo *e* evidenzia che se ad inizio stagione delle piogge nelle aree umide è parzialmente presente la vegetazione, con l'aumento delle piogge tali aree vengono completamente sommerse.

Le differenze osservate sono diagnostiche dei differenti tipi di vegetazione e possono essere perciò utilizzate come chiavi interpretative per un processo di classificazione automatica.

Il contenuto informativo, in questa analisi preliminare, è stato messo in evidenza dalla classificazione delle serie di NDVI multitemporale. L'utilizzo di serie diverse di NDVI ha permesso di individuare quante e quali date siano necessarie per ottenere un prodotto di copertura vegetale ad una accuratezza accettabile.

Come mostrato dal grafico in figura 4, le classificazioni con la miglior accuratezza risultano essere quella che ha utilizzato le 6 bande dell'immagine di Agosto 2007 e quella multitemporale che prende in considerazione 9 date di NDVI (9NDVIa). Entrambe hanno un'accuratezza comparabile, anche se presentano degli errori in alcune classi di interesse.

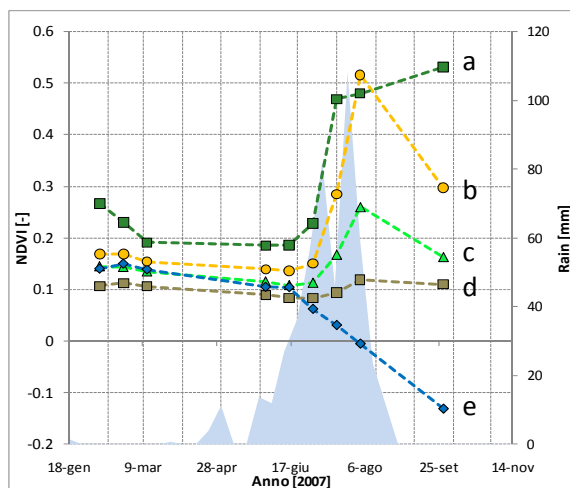


Figura 3 – Confronto tra le piogge e l'andamento temporale medio di NDVI nel 2007 dei training test individuati per le 5 classi di interesse: arbustiva (a), coltivata (b), erbacea naturale (c), suolo nudo (d) e zone umide (e).

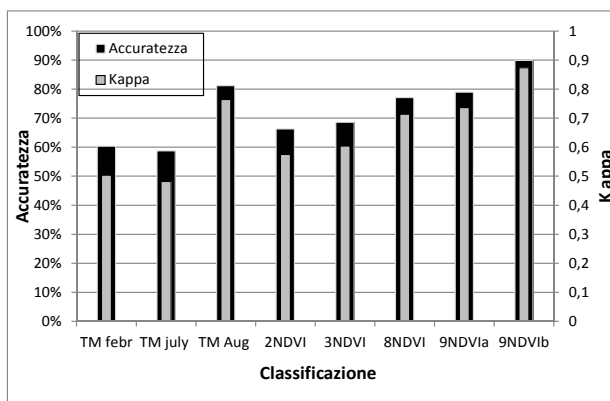


Figura 4 – Confronto tra le performance di classificazione (9NDVIb indica l'approccio combinato temporale e spettrale).

In particolare la classificazione spettrale (TM AUG) confonde l'arbustivo con l'erbaico, a causa del vigore vegetativo tipico della stagione. Invece la classificazione temporale (9NDVIa) sovrastima l'agricolo e l'arbustivo. Questa seconda classificazione è stata usata per un ulteriore passo di classificazione (9NDVIb) limitatamente alle classi risultate sovrastimate. Come rappresentato nella figura 3, avendo le diverse classi una risposta diversa alle piogge, una classificazione spettrale nelle date in cui le classi sovrastimate si differenziano maggiormente dalle altre (agricolo su Agosto, arbustivo su Luglio) permette di ottenere una mappa di copertura del suolo con una maggiore accuratezza (Figura 4).

Le immagini riprese nel corso del 2000, come già accennato precedentemente, sono state utilizzate per un confronto qualitativo e non quantitativo. La copertura nuvolosa molto irregolare ma costante ha infatti impedito il confronto diretto fra le classi definite nella classificazione del 2007. Molti training sets scelti per la classificazione non potevano essere utilizzati nelle immagini del 2000.

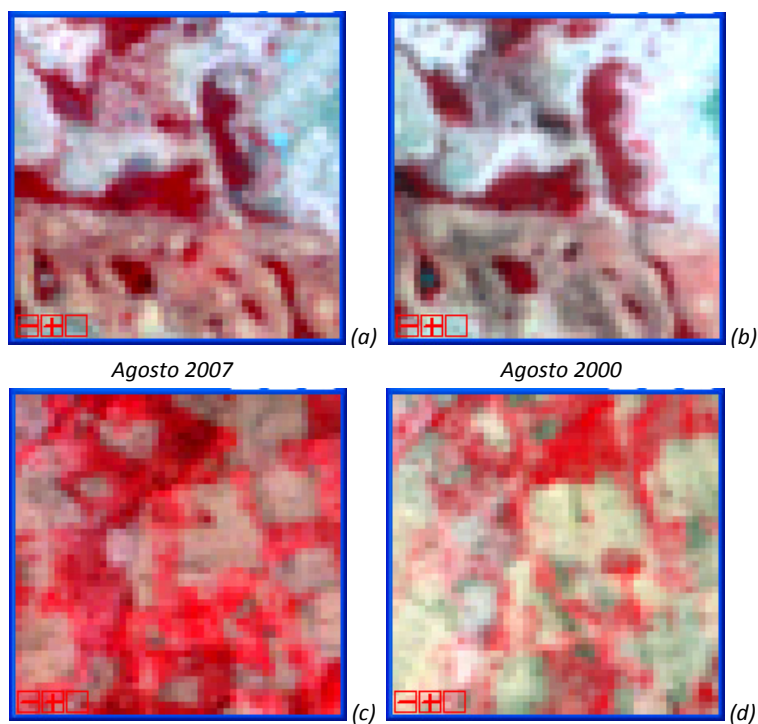


Figura 5 – Confronto fra due aree omologhe coperte da vegetazione naturale arbustiva (a e b) e da campi coltivati (c e d). Rappresentazione in falso colore RGB=432.

In attesa di ottenere una serie di immagini Landsat prive di nuvole per un altro anno, si è proceduto alla comparazione visiva delle aree comuni libere da nuvole nelle immagini del 2000 e del 2007. In particolare mentre le aree classificate a vegetazione arbustiva (*shrub*) appaiono essere costanti nel tempo, sia come posizione sia come densità (Figura 5, a e b), i campi coltivati, identificabili per la forma regolare e la vicinanza ad aree urbanizzate, mostrano una notevole variabilità (Figura 5, c e d), con una superficie maggiore per l'anno 2007.

Inoltre l'evoluzione dei valori di NDVI, misurati nelle immagini multitemporali del 2000, mostra una notevole similitudine con le curve ottenute analizzando la serie di immagini del 2007, per ognuna delle classi definite (figura 6). Le differenze relative ai singoli valori per data temporale sono collegabili direttamente alla quantità di pioggia caduta nel periodo.

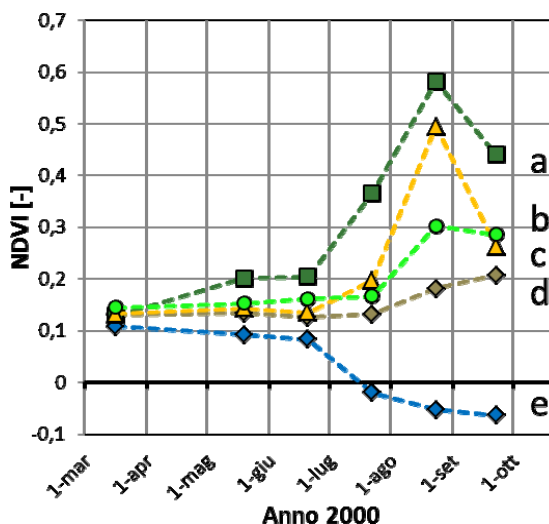


Figura 6 – Andamento temporale medio di NDVI nel 2000 nei training set liberi dalla copertura nuvolosa comuni a quelli identificati per l'anno 2007. Classi: arbustiva (a), coltivata (b), erbacea naturale (c), suolo nudo (d) e zone umide (e).

Conclusioni

La impossibilità di ottenere dati al suolo aggiornati e costanti nel tempo in aree africane remote e poco antropizzate rende l'utilizzo del satellite una validissima fonte di informazioni a costi molto contenuti. Le variazioni positive o negative nello stato della copertura vegetale che caratterizzano l'ambiente dell'area africana del Sahel possono essere così analizzate, interpretate e controllate nel tempo. In tal modo gli impatti sulla salute e l'alimentazione delle popolazioni locali possono essere individuati e in parte mitigati per tempo.

Le serie multitemporali dell'indice NDVI, analizzate insieme ai dati di precipitazione, anch'essi ottenuti da dati satellitari, ha permesso la stesura di mappe di uso del suolo, individuando le variazioni delle singole classi negli anni. In particolare le nuove aree a vocazione agricola possono essere quantificate e valutate nella loro evoluzione ed estensione.

La miglior risoluzione spaziale delle immagini Landsat ha permesso di meglio comprendere le anomalie vegetative evidenziate in precedenza nelle immagini SPOT Vegetation. Tuttavia la presenza di estese e continue coperture nuvolose, legate alla stagione delle piogge e quindi allo sviluppo fenologico della vegetazione, limita il confronto pluriennale. La disponibilità di ulteriori serie di immagini a media e alta risoluzione e lo sviluppo e l'applicazione in modalità semiautomatica di specifici algoritmi di classificazione potrà contribuire nel prossimo futuro ad un ulteriore avanzamento nel processo di comprensione delle complesse dinamiche delle aree desertiche e subdesertiche africane.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato condotto nel quadro del progetto GEOLAND-2 che è un Collaborative Project (2008-2012) finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro (progetto numero 218795), <http://www.gmes-geoland.info/>.

Bibliografia

- Anyamba A., Tucker C.J. (2005), "Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003", *Journal of Arid Environments*, 63:596-614.
- Brink A.B., Eva H.D. (2009), "Monitoring 25 years of land cover change dynamics in Africa: a sample based remote sensing approach", *Applied Geography*, 29:501-512.
- Capecchi V.A., Crisci A., (2008), "Analysis of NDVI trends and their climatic origin in Sahel 1986-2000", *Geocarto International*, 23(4):297-310.
- Chander G., Markham B. L., Helder D. L. (2009). "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors", *Remote Sensing of Environment*, 113: 893-903.
- Combal B., Bartholomè E., Brivio P.A., Boschetti M., Stroppiana D., Martini M., (2010), "The NARMA-geoland2 e-station an Earth Observation based decision support system tool for real time environmental monitoring in Africa", *ISPRS GI4DM*, Torino (Italy), 2-4 February 2010, CD, ISBN 978-88-903132-3-3
- Hermann S.M., Anyamba A., (2005), "Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate", *Global Environment Change*, Part A, 15 (4): 394-404.
- Huber S., Fensholt R., Rasmussen K. (2011), "Water availability as driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007", *Global and Planetary Change*, in stampa
- Nutini F., Boschetti M., Brivio P.A., Bartholomè E., Hosillo A., Stroppiana D., Bocchi S. (2010), "Analysis of vegetation pasture climate response on Sahel region through 10 years remoted sensed data", *Proc. of SPIE Remote Sensing for Agriculture, Ecosystem and Hydrology XII*, edited by C.M.U. Neale, and A. Maltese, SPIE vol. 7824.
- Tucker C.J., Nicholson S.E. (1999), "Variations in the size of the Sahara desert 1982-1999", *Ambio*, 28:587-591.
- Vermote E. F., Tanrè D., Deizè J. L., Herman M., Morcrette J. J. (1997), "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview", *IEEE Trans. on Geo. and Rem. Sens.*, 35: 675-686

Tecniche avanzate per il rilevamento e la valorizzazione dei beni culturali. La chiesa rupestre di San Nicolò a Modica (RG)

Giuseppe Anzalone, Salvatore D'Amelio, Benedetto Villa, Ilenia Maria Zisa

DICA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale, Università degli Studi di Palermo
Viale delle Scienze – Edificio 8, 90128 Palermo, Tel. 09123896223, Fax 091588853
architettoanzalone@gmail.com; arch.damelio@gmail.com; benedetto.villa@unipa.it; archilenia@gmail.com

Riassunto

La Geomatica mette oggi a disposizione degli operatori che a vario titolo si occupano di beni culturali (storici, tecnici delle Soprintendenze, specialisti del recupero e del restauro, o anche solo studiosi) tecniche e strumentazioni di rilevamento sempre più veloci, accurate, affidabili. Spesso, la complessità della geometria dei manufatti da rilevare richiede l'uso di metodologie differenti ma integrate fra loro. Questo è, ad esempio, il caso del rilevamento della chiesa rupestre di San Nicolò a Modica per il quale si è fatto ricorso all'impiego di tecniche laser-scanning e fotogrammetriche digitali integrate. Questa integrazione ha permesso di ottenere un modello 3D virtuale foto realistico ad alta risoluzione. Del modello è stata realizzata anche una versione nel formato VRML, particolarmente indicato per consentire la visualizzazione, la navigazione e l'interazione anche ad utenti privi di conoscenze e strumentazioni informatiche sofisticate. La disponibilità di un modello 3D completo e di precisione metrica adeguata ha fornito a storici ed archeologi uno strumento di grande utilità per la formulazione di ipotesi realistiche sulle varie fasi evolutive della grotta.

Abstract

Today Geomatics places surveying techniques and instruments more and more fast, accurate and reliable at disposal of experts who attend to cultural heritage for various reasons (historians, Monuments and Fine Arts Officer, specialists in restoration, or only scholars too). The complexity of the architectural artefacts to survey often needs the use of different, but integrated among themselves, methodologies. This is, for instance, the case of the survey of the St. Nicolò's rupestrian church at Modica (RG) for which it had recourse to employment of laser-scanning and digital photogrammetric integrated techniques. This integration enabled to achieve a high resolution 3D virtual rendered model. From this model a version carried out into VRML format, particularly indicated to permit also users devoid of sophisticated knowledge and instruments of computer science the visualization, the navigation and interaction. The availability of a complete and suitable precision 3D model gave historians and archaeologists an instrument of great utility to advance realistic hypotheses about the various stages of growth of the cave.

Introduzione

La chiesetta rupestre di San Nicolò Inferiore a Modica rappresenta un *unicum* nel panorama delle chiese rupestri dei monti Iblei, sia per le sue caratteristiche architettoniche sia per quelle pittoriche. Il rilievo di San Nicolò, nato dall'esigenza di documentare un patrimonio pittorico fortemente minacciato dal tempo e dall'umidità, ha fornito un'occasione per applicazioni di moderne metodologie integrate, quali quelle laser scanning e fotogrammetriche, finalizzate alla realizzazione di un modello tridimensionale della grotta, che tenesse conto degli aspetti geometrici e degli importanti affreschi correttamente posizionati, rispetto a tale modello.

La prima fase della ricerca è stata caratterizzata dal rilievo (topografico, laser scanner,

fotogrammetrico) distinto in tre momenti, in cui sono state utilizzate diverse strumentazioni.

La seconda fase, invece, è stata caratterizzata dall'elaborazione dei dati del rilievo, finalizzata alla realizzazione di un modello 3D fotorealistico che è stato la base di partenza per la formulazione di ipotesi sulle fasi evolutive della grotta.

L'architettura rupestre

L'architettura rupestre è un elemento distintivo del paesaggio mediterraneo. Testimonianze di siti rupestri sono ancora oggi presenti dagli altipiani anatolici ai deserti egiziani (Nubia), dall'Etiopia alla Tunisia, dai Balcani verso l'Italia, Francia e Spagna (Fig. 1).



Figura 1 – Siti rupestri dell'area Mediterranea.

Le zone in Italia maggiormente coinvolte dal fenomeno rupestre sono quelle del meridione. Infatti, tale fenomeno si sviluppa nei territori in cui la stagione calda interessa la maggior parte dell'anno e l'abitare in grotta rappresentava la soluzione migliore per contrastare le temperature troppo alte.

Gli esempi più ampi si trovano: nell'arco jonico della Murgia, in Puglia, in cui i primi ritrovamenti archeologici risalgono alle Età del Bronzo e del Ferro; in Basilicata, dove i Sassi di Matera rappresentano l'esempio più tangibile; in Calabria, soprattutto nel crotonese; e, ovviamente, in Sicilia, con particolare riguardo all'altipiano ibleo, nella zona orientale della regione, che per le sue caratteristiche offriva la possibilità di difendersi dagli assalti degli animali selvatici e da aggressioni nemiche.

Nel corso dei secoli gli ambienti rupestri, tra cui anche le chiese, furono riadattate secondo le necessità. Le chiese, ad esempio, furono spesso adibite a stalle oppure inglobate all'interno delle masserie per essere adibite a deposito di masserizie. In molti casi diventa difficile risalire alla datazione degli abitati rupestri poiché le grotte documentano solo la *facies* precedente l'abbandono. Le città trogloditiche di Modica e Scicli, scavate alla confluenza di profonde cave, mantengono ancor oggi l'originaria struttura rupestre.

Nel caso di Modica, il suo nucleo originario è facilmente riconoscibile nel massiccio sperone roccioso del Castello (Fig. 2). Lungo gli spalti dello sperone roccioso si addensano le abitazioni rupestri, mimetizzate dalle facciate in muratura.

Nel sito dell'attuale centro urbano di Modica sono state rintracciate diverse chiese rupestri antiche, che sono state nel tempo ristrutturate mediante l'introduzione di parti in muratura. Tra queste gli esempi più importanti sono le chiese di Santa Venera e San Nicolò Inferiore. La chiesa di San Nicolò, scoperta solo nel 1987 in una grotta adibita a locale di sgombero, è considerata la più antica



Figura 2 – Sperone roccioso del Castello.

chiesa di Modica. Ciò è possibile affermarlo grazie agli studi effettuati da storici ed archeologi sui diversi strati dei meravigliosi affreschi presenti sulle pareti della conca absidale. A seguito di questi studi si è ipotizzato che la grotta, o comunque una sua parte, sia stata scavata sul finire dell'XI secolo con funzioni parrocchiali. In seguito a causa di un crollo la grotta fu in parte occlusa dalla costruzione di una chiesetta in muratura chiamata "Santa Nicoletta". Quando anche la chiesetta in muratura cambiò la sua destinazione d'uso, divenendo autorimessa e abitazione, la chiesa di San Nicolò attraversò un periodo di buio, non solo figurativo. L'apertura al pubblico è stata voluta dal Centro Studi sulla Contea di Modica che nel 1992 ha acquisito la grotta e ha operato sul territorio facendo crescere sempre più l'interesse nei confronti di essa da parte degli studiosi. In questi anni, infatti, diversi sono stati gli studi effettuati sugli affreschi da diversi archeologi, quasi mai supportati da tecnologie all'avanguardia. Per questo motivo, nel 2010, l'Università di Palermo, essendo in possesso delle strumentazioni adeguate, ha apportato il suo contributo con un rilievo approfondito, avente un indiscutibile valore documentale.

Le operazioni di rilevamento

A causa della natura irregolare delle pareti della grotta, un rilievo topografico tradizionale non sarebbe stato sufficiente per ricostruire la sua complessa geometria ed è per questo motivo che, avendo come obiettivi principali, da una parte, la realizzazione di un modello tridimensionale della stessa, e, dall'altra, la documentazione degli importantissimi affreschi, ci si è avvalsi dell'utilizzo di tecniche fotogrammetriche *close range* e laser-scanning per il rilievo.

Preliminarmente è stata istituita una rete d'appoggio topografica, necessaria a fissare un sistema di riferimento locale opportunamente scelto, utile all'orientamento di tutti gli elaborati grafici, ottenuti dall'applicazione di tecniche fotogrammetriche e laser. Verificata la particolare morfologia del luogo si è deciso di realizzare una poligonale aperta formata da 4 vertici (Fig. 3), i quali sono stati materializzati mediante chiodi d'acciaio con calotta emisferica e di cui si è provveduto a stilare le monografie al fine di consentire in futuro la loro rintracciabilità. Sarebbe infatti possibile e auspicabile un eventuale ampliamento della poligonale grazie alla avvenuta materializzazione di un vertice esterno alla grotta. Ciò potrebbe consentire, con l'uso di un ricevitore GPS, di realizzare la georeferenziazione della poligonale e quindi di inquadrare la grotta nel sistema di riferimento globale. Per il rilievo topografico della rete di inquadramento ci si è serviti della *total station Leica TCR 1105* (Fig. 4) con precisione angolare di 5" e compensatore biassiale con campo operativo di $\pm 10^\circ$ e di un miniprisma munito di livella sferica.

Trattandosi di una poligonale aperta, quindi di una rete a misure strettamente necessarie, si è proceduto ad una ripetizione di tutte le serie di misure, al fine di evitare la presenza di errori grossolani.

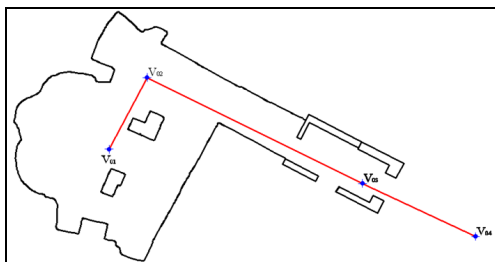


Figura 3 – Vertici della poligonale aperta.

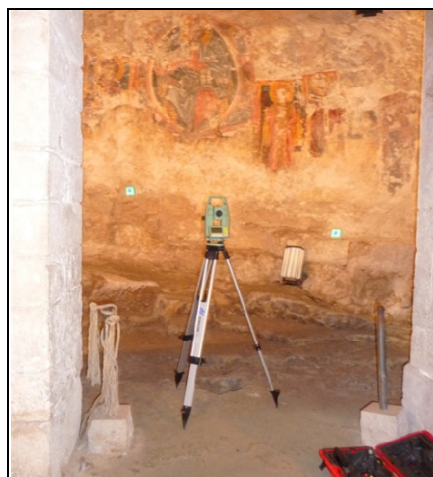


Figura 4 – Total Station Leica TCR 1105.

Mediante l'utilizzo del software *Leica win driver 3.0* sono stati elaborati i dati topografici dei vertici della suddetta rete ed i punti relativi, rispettivamente, ai target laser e ai punti di dettaglio rilevati in facciata e nel vano d'ingresso, e ai target fotogrammetrici, che sono stati correttamente orientati. Il rilievo laser è stato effettuato con un laser scanner Mensi GS200 *long range* (Fig. 5), basato sulla tecnologia a tempo di volo TOF (*time of flight*). A causa della presenza di due grossi pilastri, che impediscono la visione completa dell'ambiente, per il rilievo dell'intera grotta si è reso necessario realizzare 11 scansioni (Fig. 6), posizionando 13 target piani riflettenti rilevati topograficamente. Le acquisizioni sono state effettuate con il programma *Trimble® PointScape™3.2*.



Figura 5 – Laser scanner Mensi GS200.

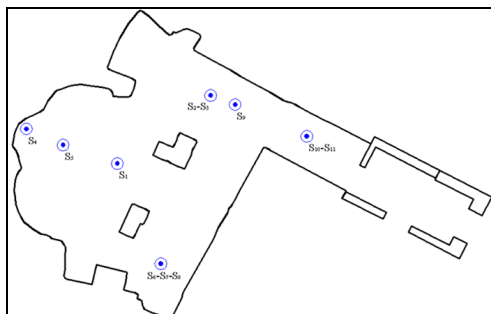


Figura 6 – Stazioni delle scansioni laser.

Dopo le operazioni di riduzione del rumore e di filtraggio, le nuvole di punti sono state mosaicate tramite omologia per tre punti individuati dai target ed orientate secondo il sistema di riferimento locale. Per queste tre operazioni ci si è avvalsi dell'ausilio del software *RealWorks*, che ha dato come risultato un'unica nuvola, contenente più di 8 milioni di punti (Fig. 7).

Il prodotto così ottenuto è stato salvato in formato *ascii* per essere importato all'interno di un altro

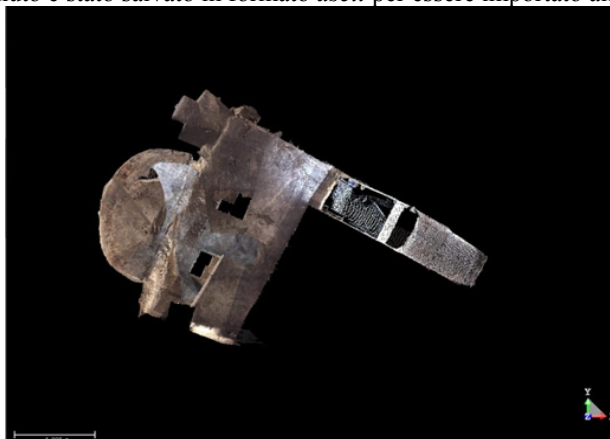


Figura 7 – Nuvole mosaicate e orientate.

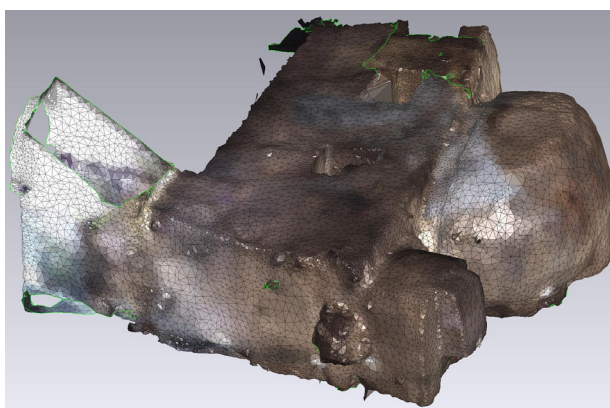


Figura 8 – Modello a mesh triangolari.

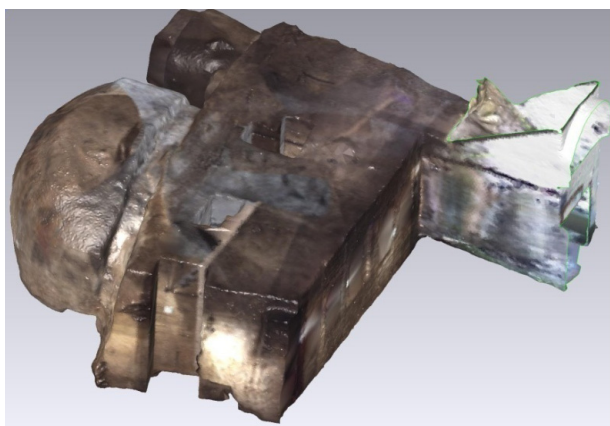


Figura 9 – Modello finale.

Il prodotto così ottenuto è stato salvato in formato *ascii* per essere importato all'interno di un altro software, *GeomagicStudio10*®, con il quale si sono realizzate le successive fasi di post-elaborazione.

A partire dalla nuvola di punti completa è stato generato, tramite l'algoritmo di Delaunay, un modello per superfici (*mesh* triangolari), i cui vertici sono costituiti dai punti della nuvola (Fig. 8).

Infine, dopo un'ulteriore fase di elaborazione semi automatica, finalizzata a smussare gli spigoli troppo acuti ottenuti del modello a maglie *mesh* e a colmare i "buchi" che si presentavano a causa della natura discontinua della parete rocciosa, si è ottenuto il modello definitivo (Fig. 9).

Il vano d'ingresso alla grotta è stato rilevato mediante un rilievo topografico classico e i suoi punti di dettaglio elaborati con il software *Autocad 2007*. Il modello 3D ottenuto è stato importato in un formato *stl* in *GeomagicStudio10*® per poter essere integrato al modello della grotta (Fig. 10).

Da questo modello è possibile estrarre elaborati metrici bidimensionali e tridimensionali (piante, sezioni, viste assonometriche da diverse angolazioni) di grande interesse per lo studio e la documentazione della grotta (Fig. 11).

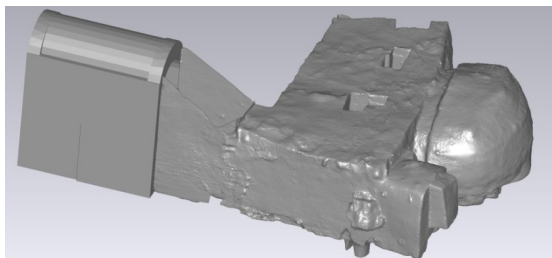


Figura 10 – Modello finale con il vano d'ingresso.

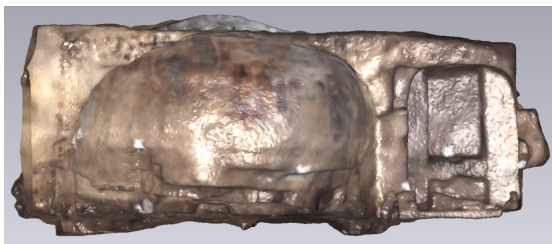


Figura 11 – Sezione con vista sulle absidi.

Il rilievo fotogrammetrico si è svolto in due diverse fasi, avvalendosi di approcci e strumentazioni differenti.

In particolare, la prima fase ha visto l'utilizzo del sistema ZScan, basato sull'approccio stereometrico. Il sistema, come è noto, è costituito da una camera digitale, nel nostro caso una *Nikon D80*, una slitta di precisione con carrello a ricircolo di sfere (lunghezza 900 mm) con testa tilt e un treppiede professionale (Fig. 12). Il software *ZScan*, corredato al sistema, ha permesso, attraverso l'elaborazione di singole triplette di fotogrammi, di generare un modello 3D texturizzato per ciascuna porzione dell'abside oggetto dei fotogrammi. Infine, i singoli modelli 3D sono stati importati in un unico file per consentire una visione complessiva fotorealistica dell'intera conca absidale (Fig. 13).



Figura 12 – Sistema Zscan.

Nella seconda fase si è fatto ricorso alla metodologia fotogrammetrica multi-immagine a prese convergenti, che ha portato alla ricostruzione della facciata di Santa Nicoletta. In questo caso ci si è serviti di una fotocamera digitale *Canon IDS-MARK II*. Per la restituzione fotogrammetrica è stato utilizzato il software *PhotoModeler*. Anche in questo caso il risultato finale è stato un modello tridimensionale fotorealistico (Fig. 14).

Il modello per superfici così generato è stato importato nello stesso *file* di *GeomagicStudio10®* insieme al resto del modello e ciò ha permesso la ricostruzione, a partire dalla superficie della facciata, del volume della chiesa di Santa Nicoletta.



Figura 13 – Modello 3D fotorealistico dell'abside.



Figura 14 – Modello 3D fotorealistico della facciata.

Ipotesi ricostruttive

Attraverso la realizzazione del modello tridimensionale della grotta è stato possibile analizzare con maggiore dettaglio gli elementi architettonici originari che ne hanno caratterizzato il primo assetto. La disponibilità di un modello 3D completo e di precisione metrica adeguata ha consentito inoltre di individuare le possibili fasi evolutive della grotta, a partire dalle ipotesi di storici ed archeologi che negli ultimi venti anni hanno condotto studi sui tre cicli pittorici, risalenti a periodi diversi, che ricoprono le pareti interne e, in particolare, la conca absidale.

Sulla base di tali ipotesi, e avendo come base il modello dello stato di fatto della grotta, si è proceduto a “manipolare” tale modello, adattandolo cioè alle possibili configurazioni delle diverse fasi evolutive della chiesetta di San Nicolò. Ciò al fine di rendere visive e graficamente verificabili le ipotesi avanzate.

Una prima ipotesi tenta la ricostruzione grafica a partire dalle ipotesi sostenute dagli studiosi. Consiste di cinque fasi architettoniche (Fig. 15), che vanno dal secolo XI al secolo scorso:

- nella prima fase (XI-XII secolo) si ha l'escavazione della prima porzione di grotta, comprendente la conca absidale e la navata, il cui ingresso si apriva in corrispondenza della facciata di quella che una volta era la chiesetta di Santo Nicoletta;
- nella seconda fase (XVI secolo) viene scavata la navata laterale con abside laterale, adibita a fonte battesimale. Si attribuiscono a questa fase le cinque tombe terragne scavate in prossimità delle due absidi;
- nella terza fase, più distruttiva che costruttiva, avviene il crollo della navata.
- nella quarta fase (XVIII secolo) la navata crollata viene sostituita da una nuova chiesa integralmente in muratura, Santo Nicoletta.
- Nella quinta ed ultima fase, che ha inizio tra l'800 e i primi del '900, si decide di edificare sopra la grotta, riducendo al minimo lo spessore della roccia ed introducendo inevitabilmente dei pilastri a sostegno, che vengono posti davanti la conca absidale. Per l'accesso a San Nicolò si realizza lateralmente uno stretto vano d'ingresso.



Figura 15 – Prima ipotesi ricostruttiva.

La seconda ipotesi (Fig. 16) si differenzia dalla prima per le tre fasi iniziali, mentre le ultime due coincidono. Questo approccio tenta, attraverso lo studio delle quote e delle relative curve di livello generate, di ricostruire la possibile pendenza della parete rocciosa al fine di stabilire con più probabilità la posizione dell'ingresso alla grotta, scavato originariamente. La conseguenza naturale di tale approccio è quella di ottenere una navata più corta ma più armonica nelle proporzioni. Proprio il confronto dimensionale con altre grotte rupestri di analoghe caratteristiche (Santa Venera, Santa Alessandra, San Giuseppe "u Timpuni") permette in definitiva di privilegiare questa seconda ipotesi.

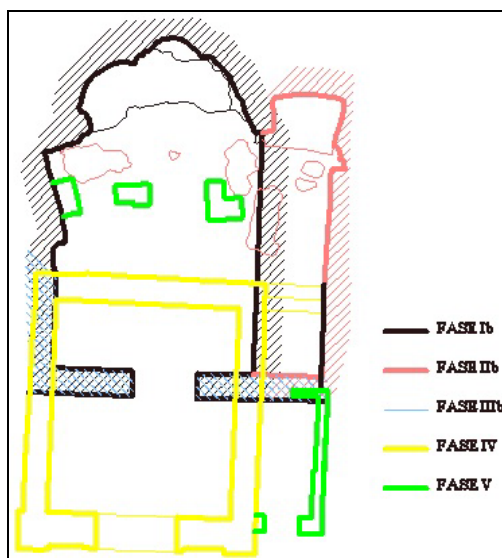


Figura 16 – Seconda ipotesi ricostruttiva.

Conclusioni

Lo studio della chiesa rupestre di San Nicolò Inferiore ha permesso di analizzare alcune problematiche relative al rilevamento e alla fruizione virtuale di architetture complesse.

L'utilizzo di tecniche classiche di rilevamento topografico non avrebbe permesso, data l'irregolarità delle pareti scavate nella roccia, di ottenere un risultato apprezzabile, come nel caso di superfici più omogenee. Invece, con il ricorso a tecniche avanzate di rilevamento, fenomeno che si sta ampiamente sviluppando nel campo dell'architettura rupestre, si è ottenuto un elevato livello di precisione sia per quel che concerne la complessa geometria della grotta, per cui si sono utilizzate tecniche laser-scanning, sia per quel che riguarda la documentazione dei preziosi affreschi della conca absidale, per cui si è fatto uso di tecniche fotogrammetriche.

L'integrazione di entrambe le tecniche ha rappresentato la giusta soluzione per ottenere un modello completo e un'elevata qualità del dettaglio. Il vantaggio maggiore nella realizzazione del modello tridimensionale è stato quello di poterlo visualizzare da tutti i punti di vista, cosa non sempre fattibile nella realtà.

Nella realizzazione del modello si è potuta fare un'attenta analisi degli elementi architettonici originari e delle varie fasi evolutive della grotta.

Dagli elaborati grafici ed informatici prodotti sarà possibile trarre dati e informazioni utili per un eventuale restauro della grotta.

Del modello 3D si è realizzata una versione navigabile (VRML), capace di offrire all'utente la sensazione di entrare nello spazio 3D, da poter pubblicare sul *web* in modo da consentire, agli studiosi e a tutti coloro i quali fossero interessati a conoscere meglio San Nicolò, l'interazione con il modello. Il *file* VRML, infatti, allo stesso modo di qualsiasi documento ipertestuale, prevede l'impiego di *link* a URL remoti, grazie ai quali sarà possibile interrogare il modello 3D per ottenere informazioni di carattere storico, dimensionale, ecc.

Sarà inoltre possibile, mediante la collocazione di una postazione in loco, utilizzare tale versione navigabile per la consultazione ed interrogazione del modello, che permetterebbe ai turisti, che non possono avvicinarsi troppo agli affreschi, di averne una completa e più ravvicinata visione. Tale sistema sarebbe, inoltre, consigliabile, qualora si volesse affrontare un restauro e la grotta dovesse rimanere chiusa, per potere garantire ai visitatori una fruizione virtuale.

Bibliografia

- Parenti R., Gilento P., Ceccaroni F. (2011), "Three-dimensional data and the recording of material structure", *IASPRS*, Vol. 38/5.
- Villa B., Anzalone G., Casamento M., D'Amelio S., Sciortino R. (2009), "Rilevamento e fruizione virtuale della Gurfa con metodologie avanzate", *Atti della giornata di studio: La Gurfa di Alia e il suo territorio. Archeologia, problemi e prospettive*, Palermo, 10/07/2009, IBAM CNR (in corso di stampa).
- Tucci G., Bonora V., Crocetto N., Nobile A. (2009), "Misurare l'irregolare: applicazioni della geomatica alla tutela e al recupero di un habitat rupestre a Gravina in Puglia", *Atti della 13^a Conferenza Nazionale Asita, 1809-1814*.
- Tucci G., Bonora V. (2007), "Il laser scanner terrestre e il rilievo dei Beni Culturali", *Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio*, Alinea Editrice, Firenze, 89-123.
- Girelli V.A. (2007), *Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali*, tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze Geodetiche e Topografiche, Università di Bologna, ciclo XIX.
- Remondino F., Fraser C. (2006), "Digital camera calibration methods: considerations and comparisons", *IASPRS*, Vol. 35, Part B5: 266-272.
- Beinat A., Crosilla F. (2003), *Tecniche avanzate di allineamento di scansioni laser*, La tecnica del laser scanner: teoria e applicazioni, ed. CISM, Udine.
- Rinaudo F. (2003), *La tecnica del laser scanning: applicazioni architettoniche e urbanistiche*, La tecnica del laser scanning: teoria e applicazioni, ed. CISM, Udine.
- Rizzone V.G., Sammito A.M. (2003), "Chiese di epoca bizantina e chiese di rito bizantino a Cava Ispica e nel territorio di Modica", *Archivum Historicum Mothycense*, 9: 5-46.
- Grussenmeyr P., Hanke K., Streilein A. (2002), *Architectural Photogrammetry*, Digital Photogrammetry, Taylor & Francis, 300-339.
- Rizzone V.G., Sammito A.M. (1998), "Nuovi dati sulla tarda architettura rupestre di carattere sacro a Modica", *Archivum Historicum Mothycense*, 4: 65-78.
- Di Stefano G. (1996), *La chiesetta rupestre di San Nicolò Inferiore a Modica*, Modica.
- Messina A. (1994), *Le chiese rupestri del Val di Noto*, Istituto Siciliano di Studi Bizantini e Neoellenici: Monumenti; 4, Palermo.

Il rilievo laser scanner a supporto dell'analisi di qualità nella produzione di un Sonar Dome in composito per le Fregate FREMM

Paolo Ardissonne (*), Leandro Bornaz (**), Giorgio Girola (***), Michele Mangiarotti (***)

(*) SIR Srl, Corso Monte Grappa 6, 10145 Torino, paolo.ardissone@sir.to.it

(**) Ad Hoc 3D Solutions Srl, Fraz. La Roche 8, 11020 Gressan (AO), leandro.bornaz@adhoc3d.com

(***) Orizzonte Sistemi Navali, Viale Brigata Bisagno, 45R 16129 Genova

Abstract

La società SIR Srl e la società Orizzonte Sistemi Navali S.p.A. hanno progettato e realizzato un rilievo laser scanner del Sonar Dome in composito installato sulle nuove Fregate FREMM per la Marina Militare Italiana, finalizzato a descriverlo *as it is*, dopo la produzione ed a confrontarlo con la superficie teorica da progetto. Il lavoro è stato strutturato in due sessioni di misura: una prima e una dopo l'installazione di una dima, che simulasse l'accoppiamento reale tra il bulbo (Dome) e lo scafo della nave. Per le operazioni di rilievo è stato utilizzato uno strumento laser terrestre Riegl VZ400.

L'articolo espone nel dettaglio le fasi di acquisizione e il trattamento dei dati, le precisioni ottenute e le funzionalità specifiche sviluppate ad hoc per l'analisi delle difformità geometriche tra modelli geometrici.

Abstract

SIR and Orizzonte Sistemi Navali S.p.A. have designed and carried out a laser scanner survey of a Sonar Dome installed on new FREMM frigates for the Italian Navy, designed to describe as it is, after production and to compare it with the theoretical surface of the project.

The work was structured in two measurement sessions: one before and one after the installation of a template, which simulates the coupling between real-bulb (Dome) and the ship's hull.

For surveying tasks has been used a Riegl VZ400terrestrial laser scanner. The article explains in detail the phases of acquisition and processing of data, the accuracy obtained and the specific features developed specifically for the analysis of the geometric differences between geometric models.

Introduzione

La produzione di unità navali di grandi dimensioni richiede oggi la collaborazione di diverse aziende medie e grandi, che mettono a disposizione del progetto le loro competenze specialistiche e le loro eccellenze tecnologiche. Diventa quindi particolarmente delicato e importante integrare tutte le fasi dei lavori che spesso avvengono in contemporanea ma in luoghi, cantieri e stabilimenti diversi.

Le nuove Fregate FREMM (*Fregate Europee Multi-Missione*) per la Marina Militare Italiana sono dotate di un *Sonar Dome*, un bulbo di alloggiamento del Sonar, realizzato in materiale composito, progettato e realizzato interamente in Italia. Tale bulbo è lungo circa 8 metri, alto circa 3,10 metri e nel punto di massima larghezza misura 4,20 metri.

La società SIR – Soluzioni Innovative per il Rilevamento Srl – spin off del Politecnico di Torino e la Orizzonte Sistemi Navali S.p.A società di ingegneria navale, costituita da Fincantieri e da

Finmeccanica, attiva nella progettazione, realizzazione e commercializzazione di unità navali militari ad elevato contenuto tecnologico e Prime Contractor per le Fregate FREMM, hanno progettato e realizzato un rilievo laser scanner del Sonar Dome. L'obiettivo del rilievo è di descrivere il *Dome as it is* dopo la produzione ed a confrontarlo con la superficie teorica da progetto. In particolare il lavoro è stato strutturato in due sessioni di misura: una prima e una dopo l'istallazione di una dima, che simulasse l'accoppiamento reale tra il bulbo (Dome) e lo scafo della nave. L'intero processo di misura ha così previsto tre fasi diverse:

- 1) Il positivo prodotto dallo stampo *Sonar Dome* è stato rilevato con tecnologia Laser Scanner in una prima sessione di misura, finalizzata a descriverlo *as it is* dopo le operazioni di produzione e cura del composito.
- 2) Una seconda acquisizione laser è stata fatta dopo la messa in dima.
- 3) I risultati di ognuna delle due sessioni di misura sono stati inseriti all'interno di una piattaforma software sviluppata ad hoc, insieme alla superficie teorica del progetto. Tale piattaforma è stata dotata di strumenti specifici per confrontare i tre modelli 3D, per misurare le eventuali deformazioni dovute al processo di cura (confronto progetto-sessione 1), e le deformazioni residue dopo la messa in dima (confronto progetto-sessione 2).

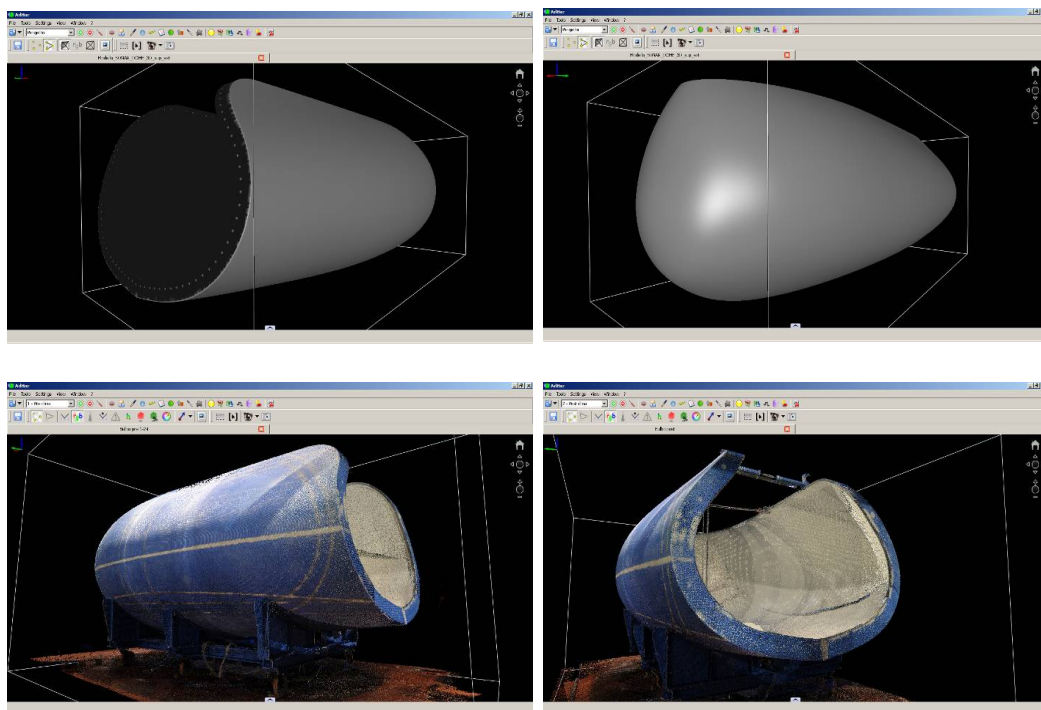


Figura 1 – Modello 3D del progetto (in alto). Modello 3D Pre Dima (in basso a sinistra), Modello 3D Post Dima (in basso a destra).

Operazioni di misura

Le operazioni di misura sono avvenute nello stabilimento ove avvenuta la produzione ad opera di Nuova Connavi S.r.l. presso Ceparana, comune di Vezzano Ligure (SP). È stato utilizzato uno strumento laser terrestre Riegl VZ400.

È stata materializzata e misurata una rete di *marker* posizionati sulla superficie esterna e interna del Bulbo. Di seguito è stato acquisito nella situazione pre dima con strumentazione laser scanner e fotogrammetrica. La progettazione del rilievo ha previsto di effettuare 24 posizioni di acquisizione diverse in modo da coprire le zone d'ombra e garantire un dato omogeneo e completo, compatibilmente con lo spazio a disposizione per il posizionamento che risultava di ridotte dimensioni a causa della localizzazione dello stampo in un capannone.

Dopo l'installazione della dima da parte del personale incaricato dalla direzione della produzione, si è proceduto con il rilievo laser scanner e fotogrammetrico post dima. Sono state ripetute le 24 scansioni, in posizioni approssimativamente simili a quelle della prima sessione.

Sistema di riferimento

Le operazioni di produzione e cura del composito avvengono utilizzando uno stampo “femmina”, un negativo dal quale si crea il positivo del Dome. Lo stampo è montato su di una struttura dotata di ruote, che viene spostata nelle diverse fasi di lavoro in luoghi diversi dello stabilimento. Di conseguenza non è possibile creare un poligono di misura esterno al Bulbo. Per confrontare le diverse sessioni di misura e la superficie teorica di progetto in modo corretto e rigoroso si è deciso di esprimere i dati nel sistema di riferimento nave. Tale sistema è impostato con l'asse x longitudinale allo scafo della nave, l'asse y trasversale e orizzontale, l'asse z trasversale e verticale. L'origine è posta sull'asse di simmetria della nave, verticalmente circa 47 cm più in basso rispetto alla flangia superiore del Bulbo, longitudinalmente circa 122 m a poppa della flangia posteriore del Bulbo.

Sono state definite le regole di passaggio dal sistema euleriano di acquisizione laser al sistema Nave. Il calcolo della rototraslazione spaziale è stato fatto minimizzando gli scarti tra le coordinate di numerosi rivetti misurate col sensore laser scanner e le coordinate degli stessi punti nel sistema di riferimento teorico nave. Tali rivetti sono stati tracciati con macchine a controllo numerico sullo stampo madre e quindi riportati, riconoscibili e misurabili sul positivo del bulbo.

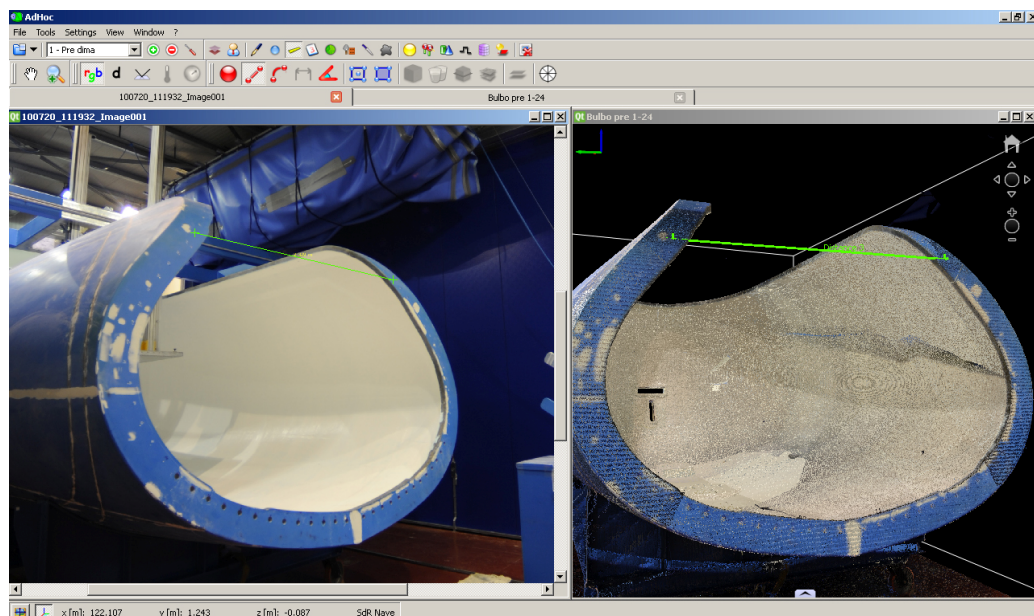


Figura 2 – Sistema di Riferimento Nave. Immagine Solida (sinistra), modello 3D Pre Dima (destra).

Trattamento dei dati laser e fotogrammetrici

Il trattamento dei dati laser acquisiti ha previsto la filtratura di tipo robusto delle scansioni per l'eliminazione di *gross errors* e *outliers*, la ricerca e definizione dei *marker* di appoggio, allineamento e triangolazione laser nel sistema di riferimento euleriano delle acquisizioni laser, l'unione e il controllo delle nuvole di punti acquisite.

Per migliorare i risultati dell'allineamento delle singole scansioni, è stata effettuata una triangolazione laser a modelli indipendenti. Le scansioni sono state infatti allineate in unico modello con un approccio di tipo fotogrammetrico, utilizzando e compensando sia punti di legame che di appoggio. Come punti di legame sono stati utilizzati sia *marker* omologhi, o visibili in scansioni adiacenti, sia punti omologhi automaticamente determinati mediante un algoritmo appositamente studiato per individuare punti geometrici significativi dell'oggetto scansionato. In questo modo il risultato dell'allineamento è migliore perché vi è un numero maggiore e una distribuzione omogenea dei punti di legame. I dati laser sono stati poi rielaborati con appositi algoritmi di post processing per ottenere una densità costante dei punti.

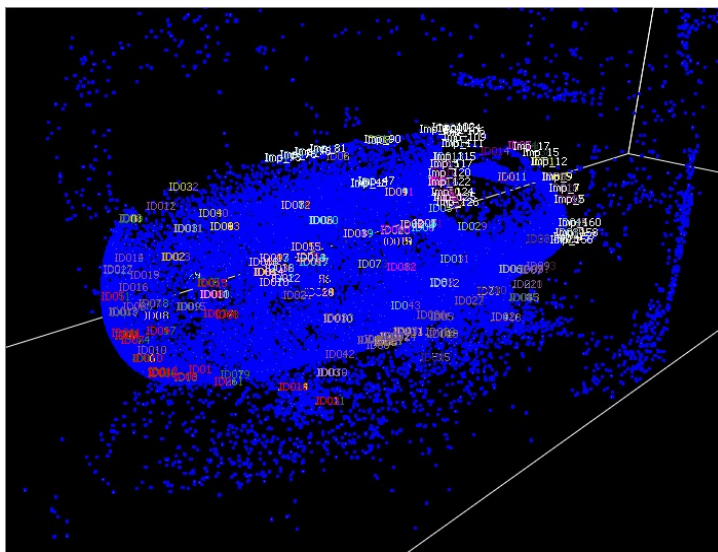


Figura 3 – Marker e punti omologhi automaticamente determinati.

Risultati dei rilievi

Il risultato finale sono 2 nuvole di punti colorate 3D complete, che cioè descrivono il bulbo pre e post dima, associate in una piattaforma software Ad Hoc appositamente sviluppata con il modello 3D del progetto. I tre modelli 3D vengono gestiti come tre epoche di misure diverse.

L'epoca *Pre Dima* è composta da 77 immagini solide ed un modello 3D di 9.417.257 punti.

L'epoca *Post Dima* da 77 immagini solide e un modello 3D di 7.430.467 punti. L'epoca *Progetto* da un modello 3D formato da 190.778 punti e 368.826 facce.

Tutti e tre i modelli sono espressi nel sistema di riferimento Nave, è quindi possibile confrontarli tra loro

Le specifiche tecniche dello strumento laser scanner utilizzato (marca Riegl, modello VZ400) riportano una precisione nella determinazione delle coordinate dei punti misurati di 4 mm a 100m e la precisione nella ripetibilità delle misure di 3 mm. La precisione varia in funzione della distanza di qualche parte ogni 1000 m. Vista la distanza ridotta di acquisizione e il fatto che le due sessioni di misura hanno utilizzato posizioni di scansione molto simili, possiamo stimare la precisione intorno ai 4mm (Statisticamente la precisione di uno strumento di misura è definita ad un valore di 1σ ,

valore che rappresenta il 67% circa delle probabilità che la misura sia effettivamente in un intervallo di $\pm 1 \sigma$).

Confronti tra i modelli 3D

Grazie alla collaborazione con la Società Ad Hoc 3D Solutions, specializzata nel fornire soluzioni personalizzate per la gestione di modelli e misure 3D, è stata sviluppata una piattaforma software dotata di strumenti e funzionalità specifiche per l'analisi delle difformità geometriche tra modelli geometrici. Il rilievo pre dima, quello post dima e il progetto originale sono strutturati in tre epoche diverse. Attraverso procedure semplici possono essere generate sezioni sui diversi modelli e confrontarne il risultato rispetto le altre epoche. Ci sono diversi modi per definire il piano di sezione: imporlo rispetto al sistema di riferimento nave, ricavarlo stimandolo tra un set di punti selezionati o tra un set di punti delimitati da un'area selezionata dall'operatore. Possono inoltre essere misurati, confrontati e esportati piani, distanze, dislivelli ecc. Tutte le misure e sezioni possono essere organizzate a *layer* e visualizzate sui modelli 3D.

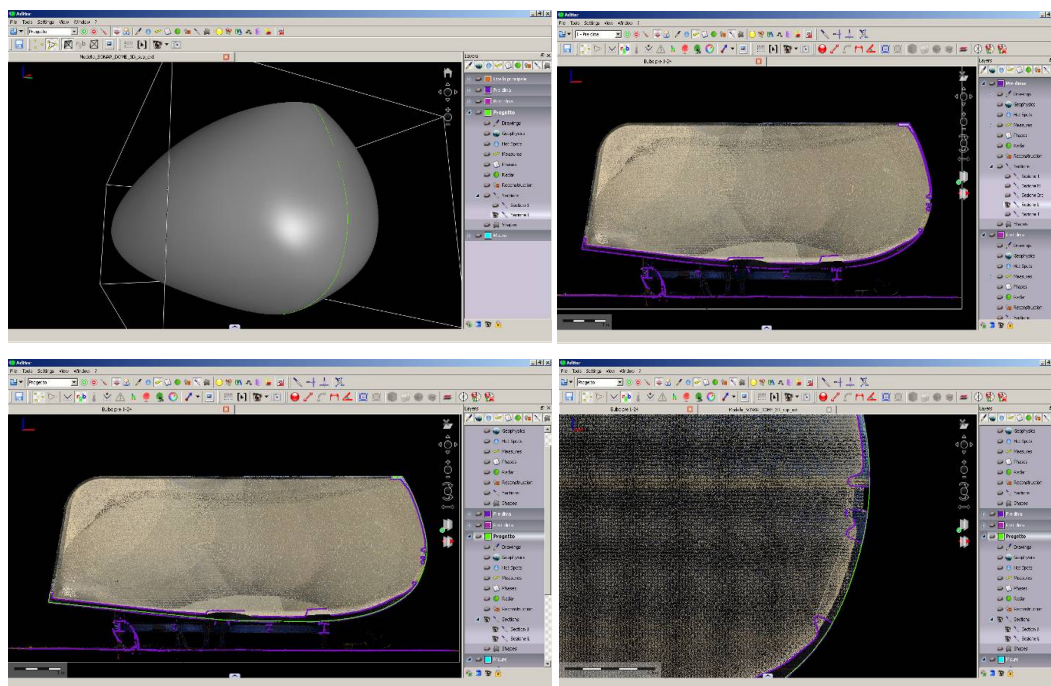


Figura 4 – Confronti tra sezione longitudinale di progetto (verde) e sezione longitudinale del modello Pre Dima (viola).

Questi strumenti di analisi però si caratterizzano come strumenti di analisi geometrica assistita. Richiedono cioè che il risultato del rilievo laser venga studiato e letto da un esperto di ingegneria navale, che scelga i piani di sezione che meglio evidenziano gli scostamenti tra le geometrie e che dia una valutazione generale, che pur avendo a disposizione tutta la forma del bulbo, prenderà in considerazione un set limitato di sezioni e misure.

Si è scritta così una procedura per permettere un confronto geometrico 3D tra i diversi modelli che individui gli scostamenti e crei un modello mappato con l'andamento e la posizione degli scarti. Il notevole vantaggio di questo tipo di analisi automatica è quello di restituire un dato oggettivo e

continuo, in quanto distribuito su tutta la superficie, da sottoporre alla direzione lavori per tutte le valutazioni specialistiche del caso.

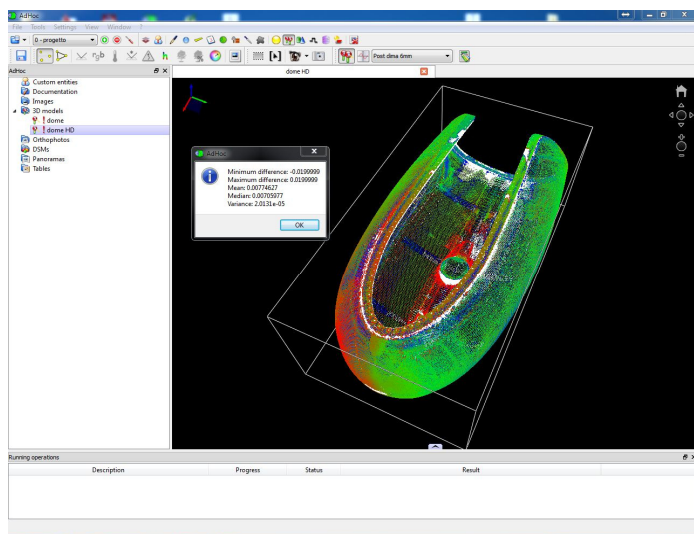


Figura 5 – Modello 3D mappato in base all'andamento e la posizione degli scarti.

Conclusioni

Il rilievo laser scanner Sonar Dome per le Fregate FREMM è stata un'ottima occasione non solo per testare le potenzialità degli strumenti e tecniche della geomatica oggi a disposizione a supporto dell'ingegneria navale, ma anche per definire metodi oggettivi di confronto tra design e produzione su scala reale. La collaborazione tra la direzione di produzione e il team di rilevatori ha permesso di evidenziare esigenze specifiche e guidare la ricerca e sviluppo di strumenti innovativi che possono migliorare l'intero processo di valutazione della qualità.

Bibliografia

- Leandro BORNAZ, Fabio DAGO, Andrea LINGUA, Mario NATTERO, Francesco NEX, 2008 "Tecniche LIDAR per il controllo di simmetria della carena di una nave", Atti 12ª Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila 21 – 24 ottobre 2008
- Biskup K., Arias P., Lorenzo H., Armesto J. (2007), "Application of terrestrial laser scanner for shipbuilding", *ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser 2007*, Espoo, 12-14 Settembre, Finland, pp.56-61
- Pfeifer, N., Lichti, D., 2004. "Terrestrial Laser scanning: Developments, Applications and Challenges", *GIM International*, December 2004.
- Arias p., Armesto J., Lorenzo H., Ordonez C. (2007). "Terrestrial Laser technology in sporting Craft 3D Modeling. *Proceedings book of the International Symposium CompIMAGE 2006: Computational Modeling of Objects Represented in Images: Fundamentals, Method and Applications*. ISBN 978-0-415-43349-5 Vol.1, pp.63-69. 2007. Taylor & Francis Group. London, United Kingdom.

GIS e valori immobiliari: un metodo per l'analisi del rischio d'investimento immobiliare

Michele Argiolas, Karol Coppola, Valeria Furcas, Sara Meloni

Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Sezione Urbanistica
Piazza d'Armi 19, 09100 Cagliari, Italia, Tel. +39-070-6755213, Fax +39-070-6755215
E-mail: michele.argiolas@unica.it

Abstract

In questi ultimi tre anni gli effetti complementariamente indotti sia dalla crisi economica globale che dalla bolla speculativa immobiliare, hanno comportato nel contesto statunitense una crisi del mercato immobiliare con pochi precedenti. Il fenomeno, per adesso, non ha colpito con analoga forza l'unione europea dove, fatti salvi casi specifici riguardanti paesi caratterizzati da una congiuntura economica particolarmente sfavorevole, la diversa connotazione del mercato e la mancata propagazione dei mutui subprime hanno impedito il manifestarsi di una crisi dei valori immobiliari paragonabile con quella statunitense. Diversi economisti hanno indicato tra le principali motivazioni della crisi immobiliare, la scarsa diffusione di strumenti ufficiali capaci sia di monitorare in maniera oggettiva i valori di mercato che di indicare il correlato livello di rischio d'investimento immobiliare.

L'aumento dei prezzi delle case registrato in gran parte dei paesi industrializzati negli ultimi anni ha riportato l'attenzione degli economisti al problema dell'accessibilità all'abitazione (*housing affordability*) delle famiglie, ovvero sulla loro capacità di sostenere le spese legate all'acquisto o all'affitto di un immobile di residenza adeguato.

Il presente contributo analizza in che misura sia variato negli ultimi anni l'Housing Affordability delle famiglie del contesto urbano di Cagliari (Italy), che considerato nella sua accezione metropolitana può contare su una popolazione complessiva di circa 400.000 persone, con particolare riferimento al decennio 1999 – 2009.

“The subprime crisis is the name for what is a historic turning point in our economy and our culture. It is, at its core, the result of speculative bubble in the housing market that began to burst in the United State in 2006 and has now caused ruptures across many other countries in the form of financial failures and a global credit crunch. The force unleashed by the subprime crisis will probably run rampant for years, threatening more and more collateral damage.” With this word Robert J. Shiller, ranked among the 100th most influential economists of the world, describes the 2007-2010 Real estate market bubble. The phenomenon has not yet affected the European Union with the same strength, as, except for some specific cases involving countries in adverse economic conditions, different connotations of the housing market and lack of subprime mortgages have prevented the spreading of a real estate (RE) market crisis comparable to the U.S. one.

This paper analyzes the historical evolution, over the last decade, of the relationship between the family average income and the average annual price of a home in an Italian metropolitan context (Cagliari, c.a. 400.000 habitants).

Key words: Real Estate market, Housing Affordability Index, Risk appraisal.

1.1 Il mito del mattone e lo scandalo dei mutui subprime

Dalla fine degli anni novanta ad oggi, il panorama mondiale del mercato immobiliare ha risentito, come forse mai era accaduto in precedenza, delle continue turbolenze provenienti dall'andamento economico degli stati industrializzati. Sino alla data dell'undici settembre 2001, la forte tendenza verso gli investimenti azionari rivolti all'emergente "new economy" sembrava dover relegare l'acquisto, azionario e non, di beni immobiliari ad una sorta di manierismo arcaico. Tale pensiero ebbe tuttavia vita breve: a seguito del crollo delle torri gemelle e degli scandali finanziari (Enron e Parmalat in primis), il mercato immobiliare riprese vigore in tutto il mondo. In particolare, grazie anche alla diffusione dei mutui subprime¹, in alcune regioni urbane degli Stati Uniti l'incremento dei valori immobiliari raggiunse, complessivamente nel quinquennio tra il 2001 ed il 2005, delle punte del 191%. Ciò che all'epoca colpì di questo dato specifico è che, all'interno di uno stesso contesto nazionale e nell'ambito di spazi urbani simili per dimensioni, gli incrementi dei valori rilevati risultarono in alcune realtà sino a sei volte maggiori rispetto ad altre².

Il sospetto di una bolla speculativa³ presente sul mercato immobiliare, specie in quello statunitense, si manifestò sempre più confortato dagli indicatori di rischio d'investimento classici, primo fra tutti l'Housing Affordability Index⁴. Lo scandalo dei mutui subprime dell'estate 2007 può essere considerato lo spillo in grado di sgonfiare la bolla speculativa: secondo la National Association of Realtors, i valori immobiliari negli Stati Uniti sono mediamente diminuiti dell'11% tra il 2007 ed il 2008 e del 15% nel periodo tra il febbraio del 2008 ai primi mesi del 2009.

La crisi è iniziata nel febbraio del 2007 quando molti possessori di mutui subprime divennero insolventi anche a causa del rialzo dei tassi di interesse. Gli effetti più tangibili di quest'ultima si manifestarono nel bimestre settembre-ottobre del 2008, bimestre in cui fallirono alcune note banche d'affari, tra le quali la Lehman Brothers. Tutti gli indici borsistici mondiali flessero in maniera consistente, ritornando ai valori della fine degli anni 90.

La crisi del mercato immobiliare statunitense si è ripercossa, e continua a tutt'oggi a farlo, sull'intera economia mondiale e per questo motivo negli Stati Uniti viene considerata da molti come la crisi economica peggiore dai tempi della grande depressione. Nell'aprile 2009, il Fondo Monetario Internazionale ha stimato in 4.100 miliardi di dollari Usa il totale delle perdite delle banche ed altre istituzioni finanziarie a livello mondiale.

Inoltre, dal 2006 ad oggi circa 3.000.000 di abitazioni sono state ricollocate attraverso aste giudiziarie, numero che potrebbe raddoppiare entro il 2013, anno in cui è previsto il riassorbimento da parte del mercato delle proprietà immobiliari in difficoltà.⁵

¹ Mutui caratterizzati da un forte rischio di insolvenza da parte del contraente e per questo considerati dall'istituto di credito erogante come investimento di "seconda scelta" (subprime).

² Rif. Marchi G., Argiolas M., Miccoli S. (2009) "L'influenza dei beni paesaggistici nella valutazione del rischio d'investimento immobiliare: analisi ex-post del contesto statunitense".

³ Si definisce bolla speculativa una fase di mercato caratterizzata da un aumento considerevole e ingiustificato dei prezzi, dovuto ad una crescita della domanda repentina e limitata nel tempo.

⁴ Indice capace di valutare la sostenibilità economica generale nell'acquisto immobiliare attraverso il rapporto tra il prezzo medio della tipologia immobiliare più diffusa ed il reddito medio percepito nel medesimo contesto.

⁵ Rick Sharga, RealtyTrac's senior vice president – Bloomberg Business Week January 13, 2011-

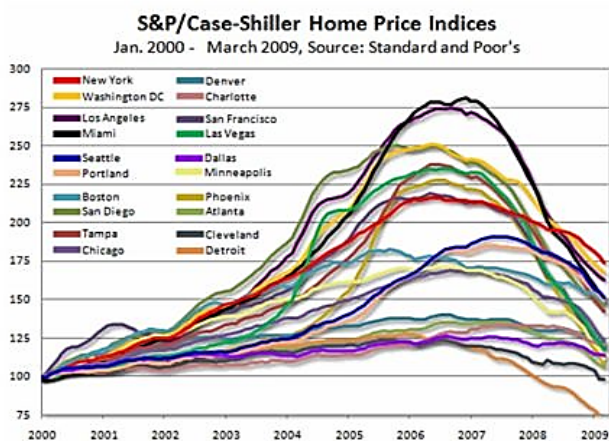


Figura 1 – Indici borsistici mondiali nel decennio 2000-2009.

Ma chi sono i responsabili di tale crisi? Robert J. Shiller, docente di economia alla Yale University e vero e proprio “profeta” della grande crisi del 2008 - con anni di anticipo aveva previsto in modo accurato l'esplosione dei mutui subprime - riassume in maniera molto efficace il fenomeno: *“I prestatori aggressivi di mutui ipotecari, gli addetti alle valutazioni compiacenti, i mutuatari soddisfatti hanno proliferato e hanno gonfiato il boom del mercato immobiliare. Gli erogatori di mutui ipotecari hanno cessato di preoccuparsi del rischio di rimborso, in quanto progettavano di cedere i crediti a operatori che li avrebbero trasformati in titoli da rivendere nel mercato mobiliare. Di regola, gli erogatori si limitavano a qualche verifica superficiale della capacità di rimborso dei mutuatari; spesso non ne verificavano neppure il reddito presso l'agenzia delle entrate, anche se possedevano l'autorizzazione scritta dei mutuatari. A volte questi prestatori autorizzavano clienti ingenui, con credenziali creditizie misere, a ricorrere al prestito nel mercato dei mutui ipotecari subprime che andava gonfiandosi. Questi crediti ipotecari venivano inseriti in pacchetti di titoli, venduti e rivenduti in modi tanto sofisticati quanto arcani a investitori in tutto il mondo, creando così i presupposti per una crisi di proporzioni vera mente globali. La bolla del mercato immobiliare, combinata con il sistema di incentivi implicito nel processo di cartolarizzazione, amplificò l'azzardo morale, incoraggiando ulteriormente alcuni fra i più sfrontati erogatori di mutui ipotecari”* (Shiller, 2008).

I debitori sono stati naturalmente criticati per aver contratto mutui, pur ben consci di non poterli soddisfare. Al momento della forte crescita dei mutui, tuttavia, tassi di interesse ai minimi storici e stabilmente bassi da alcuni anni, lasciavano pensare che fossero convenienti mutui a tasso variabile. I contratti stessi non prevedevano espressamente un interesse massimo applicabile.

A seguito delle perdite registrate dalle banche, i dirigenti dei gruppi Citybank, Merrill Lynch e Morgan Stanley hanno perso il posto e più di 300 manager sono stati arrestati; le responsabilità oggettive non possono comunque essere considerate la causa principale del fenomeno subprime. L'attenzione va rivolta ai sistemi di controllo e, soprattutto, d'informazione pubblica legati alle attività finanziarie, sistemi che sicuramente non hanno permesso di rilevare la reale entità del rischio connesso ai titoli subprime e, soprattutto non hanno consentito ai singoli acquirenti immobiliare di poter valutare con certezza il rischio d'investimento.

1.2 La formazione di una bolla immobiliare ed il correlato rischio d'investimento

Una bolla del mercato immobiliare consiste in un rapido incremento dei valori immobiliari ben oltre la soglia della sostenibilità economica della popolazione locale. Tale insostenibile incremento si ripercuote sull'economia locale rendendo economicamente impraticabile l'acquisto o la locazione immobiliare e, di conseguenza, provocando una repentina discesa dei valori di mercato. Questa

repentina discesa dei valori immobiliari rende anti-economico l'investimento immobiliare eseguito nei periodi di ascesa del mercato. La mancata redditività dell'investimento immobiliare può comportare dei notevoli danni nella capacità produttiva locale ed una conseguente stagnazione o recessione dell'economia locale. Le bolle immobiliari sono solitamente generate da un'eccessiva e generalizzata fiducia sul mercato immobiliare di uno specifico contesto che inesorabilmente provoca l'investimento di ingenti capitali monetari esterni al contesto economico locale. Tale investimento genera in tempi rapidissimi un insoddisfabile incremento della domanda, incrementa i valori d'offerta ed attiva il mercato delle nuove costruzioni per soddisfare la domanda espressa dal mercato. Inoltre, dal momento che oggi una quota sempre più elevata del valore immobiliare dipende anche dalla richiesta generata dagli investitori azionari, i tempi necessari affinché si possa presentare una richiesta eccessiva da parte del mercato sono veramente irrisori ed il rischio di incorrere in una bolla immobiliare sono notevolmente più elevati rispetto al periodo precedente la globalizzazione.

Da un punto di vista squisitamente estimativo in molteplici situazioni la domanda aggiuntiva generata dalla bolla immobiliare può far agio sul valore intrinseco del complesso dei fattori di produzione del bene stesso. Stante la sostanziale correlazione tra il costo tecnico di costruzione e l'andamento generale dell'economia locale, tale agio finisce per riversarsi interamente sul fattore produttivo costituito dall'area edificabile. In termini estimativi questo significa che nell'ambito delle realtà produttive o di particolare pregio ambientale ove confluiscono capitali esterni destinati all'investimento immobiliare, il valore di mercato può sensibilmente allontanarsi dal prezzo massimo che la comunità locale sarebbe disposta a pagare per il fattore produttivo del suolo edificabile.

Sia ben chiaro che un flusso di investimenti esterni verso il mercato immobiliare comporta, entro certi limiti, una grande occasione per la realtà locale: se contenuta entro i limiti può fungere da volano e consentire nel tempo all'economia locale di adattarsi positivamente ai nuovi valori. Ma se l'investimento immobiliare è spinto da una sorta di psicosi⁶ basata sull'errata convinzione che il mercato immobiliare non possa subire flessioni a causa dell'eccessiva ed ingiustificata domanda, può avere delle ripercussioni devastanti sia per gli investitori che, soprattutto per la popolazione locale. Popolazione che necessariamente cercherà di porre parte delle proprie capacità produttive a servizio della domanda espressa dal mercato per poi ritrovarsi all'interno di un vero e proprio binario morto quando inesorabilmente il mercato decreterà la mancata remuneratività degli investimenti immobiliari effettuati ed il conseguente ritiro degli investimenti futuri.

Si è già accennato al fatto che oggi il mercato immobiliare ed il mercato azionario siano imprescindibilmente legati. Lo stesso scandalo dei mutui subprime è un esempio di come una bolla immobiliare possa rapidamente rivalersi sul mercato finanziario e viceversa. Si noti tuttavia che i sistemi che consentono di monitorare lo stato del mercato immobiliare sono ben lontani rispetto a quelli, seppur migliorabili, messi a disposizione per studiare il mercato finanziario. Possiamo infatti valutare l'acquisto di un portafoglio di azioni localizzate nei più remoti contesti analizzando i dati di bilancio di una società, studiare l'andamento storico delle quotazioni, valutare il business plan redatto per il futuro dell'azienda e giudicare le capacità degli amministratori analizzando i risultati ottenuti dagli stessi in altre esperienze.

La stessa analisi non può essere eseguita relativamente agli investimenti immobiliari, sia nel caso in cui venga effettuato direttamente – ovvero con l'acquisto della proprietà di un immobile – che nel caso in cui ci si avvalga di sistemi d'investimento indiretti. Infatti, non esistono strumenti ufficialmente riconosciuti attendibili per capire quali siano le condizioni del mercato immobiliare. Non è possibile nemmeno conoscere un dato ufficiale e certificato dell'andamento dei valori immobiliari in città come Roma o Parigi. Il punto di partenza per combattere i rischi economici connessi ad una bolla immobiliare consiste prima di tutto nell'esser certi della sua esistenza e della sua entità. Sono dunque necessari ora più che mai strumenti che siano in grado di incrementare il livello di informazione oggettiva inerenti le condizioni del mercato immobiliare.

⁶ Il termine psicosi è usato dallo stesso Robert J. Shiller (2008) – Finanza Shock, Egea. Pg 26

Lo stesso Schiller nel 2004, stupito dal fatto che non esistesse un indice capace di rappresentare l'andamento storico dei valori immobiliari sia negli Stati Uniti che in qualunque altro paese, ha messo a punto un indice dei prezzi medi di mercato relativo ai più rappresentativi contesti urbani statunitensi che ricopre il periodo compreso tra oggi ed il 1890. L'indice è stato poi acquisito dalla Standard and Poor's che attualmente si occupa del suo aggiornamento⁷.

Basta un semplice sguardo per capire che l'andamento dei prezzi delle case nel periodo compreso tra il 1999 ed il 2007 non ha alcuna correlazione con l'andamento dei costi di costruzione, della popolazione, dell'inflazione e dei tassi d'interesse. Il fatto che il risultato della folle crescita dei prezzi di mercato fosse assolutamente intuibile da una semplice analisi macro-economica, lascia qualche perplessità sia sul fatto che non esistano sistemi oggettivi e certificati di rilevamento dei prezzi di mercato e, soprattutto, che quelle poche considerazioni effettuate dagli esperti del settore non vengano adeguatamente comunicate ai potenziali acquirenti immobiliari. Lo stesso Schiller evidenzia che nella fase d'acquisto immobiliare, l'acquirente entra in contatto esclusivamente con delle figure professionali, l'agente immobiliare, l'operatore bancario ed il notaio, che sono direttamente interessate affinché egli possa concludere l'acquisto. È difficile che un normale cittadino possa richiedere ad un professionista una consulenza specializzata che gli consenta di capire quali possano essere i rischi direttamente connessi all'acquisto di una casa. Eppure questo acquisto rappresenta nella maggior parte dei casi il più importante investimento della propria vita.

E' dunque insensato che in un'epoca storicamente improntata sulla tecnologia dell'informazione, si sia potuto manifestare in questo modo un fenomeno che Alan Greenspan, all'epoca dei fatti presidente della FED, ha imputato nel 2008 alla presenza di "euforia" e "febbre speculativa" per il mercato immobiliare. Lo stesso Greenspan sostiene che: *"Il problema essenziale è che i nostri modelli - sia quelli basati sul Rischio sia quelli econometrici - per quanto siano divenuti complessi, sono ancora troppo semplici per catturare tutta la serie di variabili che governano la realtà economica globale. Un modello fa necessariamente astrazione dai dettagli del mondo reale"* (Greenspan, 2008). Parole che, alla luce del semplice grafico pubblicato da Schiller nel 2004, sembrano più una giustificazione che una considerazione oggettiva, ma anch'esse evidenziano la presenza di una certa lacuna presente negli attuali strumenti di rilevazione del mercato. Strumenti che uniti ad una politica di diffusione della conoscenza, ovverosia attraverso la realizzazione di sistemi informativi che consentano al cittadino di valutare oggettivamente la portata del rischio legato al proprio investimento, eviterebbero la ricomparsa nel futuro di fenomeni analoghi.

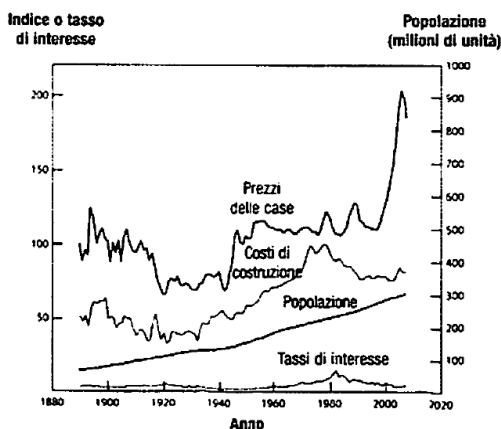


Figura 2 – Prezzi reali delle case negli Stati Uniti (1890-2007), costi di costruzione, popolazione e tassi di interesse sui titoli di stato di lungo termine nel periodo 1890-2008.

⁷ <http://www.standardandpoors.com/indices/sp-case-shiller-home-price-indices/en/us/?indexId=spusa-cashpidf--p-us--->

2. Il caso studio

Lo scopo principale del presente caso di studio è quello di analizzare oggettivamente in che misura sia variata negli ultimi dieci anni l'accessibilità economica da parte della popolazione locale del comune di Cagliari (circa 400.000 abitanti considerando l'area vasta). Tale analisi verrà svolta attraverso l'applicazione dell'indice Housing Affordability Index, capace di misurare, attraverso il rapporto tra il reddito medio di un nucleo familiare ed il costo medio delle abitazioni, il suddetto livello di accessibilità economica dell'acquisto immobiliare. Esso esprime dunque il numero di annualità di reddito necessarie alla famiglia ordinaria per l'acquisto di un'abitazione di medio livello. L'Annual Demographia International Housing Affordability Survey⁸ individua cinque diverse categorie di accessibilità dell'acquisto immobiliare, riportate nella successiva figura 3.

Ovviamente, più alto sarà il rapporto tra il prezzo di un immobile ed il reddito medio di un nucleo familiare, maggiore sarà il livello di insostenibilità economica dell'acquisto immobiliare ed il conseguente rischio che il mercato possa essere influenzato da una bolla immobiliare.

Per poter dunque calcolare l'evoluzione dell'indice HAI negli ultimi dieci anni, è necessario quantificare la serie storica dei valori immobiliare. A tal fine, si è fatto ricorso alla banca dati pubblicata trimestralmente dalla Camera di Commercio di Cagliari⁹.

Demographia Housing Affordability Rating Categories	
Severely Unaffordable	7.1 & over
Severely Unaffordable	5.1 to 7.0
Seriously Unaffordable	4.1 to 5.0
Moderately Unaffordable	3.1 to 4.0
Affordable	3.0 or less

Figura 3 – I diversi livelli di accessibilità economica individuati dall'indice HAI.

L'osservatorio della Camera di Commercio di Cagliari suddivide la città in 5 zone omogenee:

- Centro storico (Castello, Stampace, Marina, Villanova)
- Centro (Via Roma, Largo Carlo Felice, Piazza Yenne, Piazza del Carmine, Viale Trieste, Via Mameli, San Benedetto, Piazza Giovanni XXIII, Piazza Repubblica, Via Pessina, Via Sonnino)
- Quartieri residenziali (Genneruxi, Monte Urpinu-Amsicora, Quartiere del Sole, Poetto, Bonaria, Via Milano, Monte Mixi, Viale Merello, Zona Punici)
- Semicentro (Fonsarda, Viale Ciusa, La Vega, Sa Duchessa, Monte Claro, Via Marconi, Via Bandello)
- Periferia (Sant'Avendrace, Is Mirrionis, San Michele, Mulinu Becciu)

Per ognuna di queste zone è stato quantificato il valore unitario medio di un'unità immobiliare residenziale. Non essendo possibile rilevare dati relativi al periodo antecedente il 2001, i valori di mercato degli immobili negli anni 1999 e 2000 sono stati ricavati attraverso un'interpolazione lineare basata sull'andamento dei valori medi pubblicati dal Sole 24 Ore¹⁰.

Per quanto invece riguarda la quantificazione dei redditi medi, si sono considerate cinque differenti tipologie di nuclei familiari a cui corrispondono altrettanti differenti redditi ed unità immobiliari:

1. giovane single monoreddito che acquista un appartamento di 60 mq.
2. operaio monoreddito con moglie e 1 figlio che acquista un appartamento di 80 mq.
3. giovane coppia bi-reddito con 1 figlio che acquista un appartamento di 90 mq.
4. impiegato monoreddito con moglie e 2 figli che acquista un appartamento di 90 mq.
5. coppia benestante bi-reddito che acquista un appartamento di 90 mq.

⁸ www.demographia.com

⁹ Nel 2001 è stato istituito "l'Osservatorio dei prezzi degli immobili di Cagliari e Hinterland" la pubblicazione trimestrale della Camera di Commercio destinata ai privati ed agli intermediari che si affacciano al mercato dell'immobile.

¹⁰ Annuario Immobiliare 2010, F. Tamborrino, Il Sole 24 Ore S.p.A. - Milano

	centro storico	centro	quartieri residenziali	semicentro	periferia
1999	1.000,00 €/mq	1.075,00 €/mq	1.000,00 €/mq	1.000,00 €/mq	650,00 €/mq
2000	1.100,00 €/mq	1.300,00 €/mq	1.225,00 €/mq	1.100,00 €/mq	800,00 €/mq
2001	1.425,00 €/mq	1.650,00 €/mq	1.325,00 €/mq	1.175,00 €/mq	1.000,00 €/mq
2002	1.175,00 €/mq	1.575,00 €/mq	1.550,00 €/mq	1.250,00 €/mq	1.000,00 €/mq
2003	1.400,00 €/mq	1.700,00 €/mq	1.850,00 €/mq	1.400,00 €/mq	1.150,00 €/mq
2004	1.400,00 €/mq	1.700,00 €/mq	1.850,00 €/mq	1.500,00 €/mq	1.200,00 €/mq
2005	1.450,00 €/mq	1.700,00 €/mq	1.850,00 €/mq	1.600,00 €/mq	1.250,00 €/mq
2006	1.750,00 €/mq	2.100,00 €/mq	2.200,00 €/mq	1.900,00 €/mq	1.550,00 €/mq
2007	1.950,00 €/mq	2.250,00 €/mq	2.250,00 €/mq	1.950,00 €/mq	1.650,00 €/mq
2008	1.950,00 €/mq	2.250,00 €/mq	2.250,00 €/mq	1.950,00 €/mq	1.650,00 €/mq
2009	2.050,00 €/mq	2.350,00 €/mq	2.350,00 €/mq	2.050,00 €/mq	1.750,00 €/mq

Figura 4 – Tabella dei valori medi unitari degli immobili di Cagliari espressi in €/mq¹¹.

La stima dei redditi medi è stata effettuata utilizzando diverse fonti:

- i dati del Ministero dell'Economia e delle Finanze elaborati da Il Sole 24 Ore
- i dati elaborati dal sito www.comuni-italiani.it
- i dati elaborati dal Centro Studi de L'Unione Sarda

Partendo dai redditi medi lordi rilevati annualmente, si è giunti alla quantificazione di un reddito medio netto applicando la corrispondente aliquota IRPEF. Ovviamente, tale approccio operativo può scontare una certa aleatorietà che tuttavia non tende ad influenzare in maniera significativa l'analisi della serie storica.

categoria	Reddito netto (€)										
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
1	15.353	15.989	16.769	15.394	16.500	16.997	18.606	19.379	19.578	19.805	20.108
2	15.353	15.989	16.769	15.394	16.500	16.997	18.606	19.379	19.578	19.805	20.108
3	23.797	24.783	25.991	23.860	25.576	26.346	28.839	30.037	30.346	30.698	31.167
4	21.340	22.225	23.308	21.397	22.936	23.626	25.862	26.936	27.213	27.529	27.950
5	38.382	39.973	41.922	38.485	41.251	42.494	46.514	48.446	48.945	49.512	50.270

Figura 5 – Reddito netto calcolato per ogni categoria familiare.

¹¹ In giallo sono evidenziati i dati ottenuti per interpolazione lineare

HOUSING AFFORDABILITY INDEX						
categoria	anni	centro storico	centro	quartieri residenziali	semicentro	periferia
giovane single monoreddito (appartamento di 60 mq)	1999	3,91	4,20	3,91	3,91	2,54
	2000	4,13	4,88	4,60	4,13	3,00
	2001	5,10	5,90	4,74	4,20	3,58
	2002	4,58	6,14	6,04	4,87	3,90
	2003	5,09	6,18	6,73	5,09	4,18
	2004	4,94	6,00	6,53	5,29	4,24
	2005	4,68	5,48	5,97	5,16	4,03
	2006	5,42	6,50	6,81	5,88	4,80
	2007	5,98	6,90	6,90	5,98	5,06
	2008	5,91	6,82	6,82	5,91	5,00
	2009	6,12	7,01	7,01	6,12	5,22
operaio (monoreddito) con moglie e 1 figlio (appartamento di 80 mq)	1999	5,21	5,60	5,21	5,21	3,39
	2000	5,50	6,50	6,13	5,50	4,00
	2001	6,80	7,87	6,32	5,61	4,77
	2002	6,11	8,19	8,06	6,50	5,20
	2003	6,79	8,24	8,97	6,79	5,58
	2004	6,59	8,00	8,71	7,06	5,65
	2005	6,23	7,31	7,95	6,88	5,37
	2006	7,22	8,67	9,08	7,84	6,40
	2007	7,97	9,19	9,19	7,97	6,74
	2008	7,88	9,09	9,09	7,88	6,67
	2009	8,16	9,35	9,35	8,16	6,96
giovane coppia bireddito con figlio (appartamento di 90 mq)	1999	3,78	4,07	3,78	3,78	2,46
	2000	3,99	4,72	4,45	3,99	2,91
	2001	4,93	5,71	4,59	4,07	3,46
	2002	4,43	5,94	5,85	4,71	3,77
	2003	4,93	5,98	6,51	4,93	4,05
	2004	4,78	5,81	6,32	5,12	4,10
	2005	4,53	5,31	5,77	4,99	3,90
	2006	5,24	6,29	6,59	5,69	4,64
	2007	5,78	6,67	6,67	5,78	4,89
	2008	5,72	6,60	6,60	5,72	4,84
	2009	5,92	5,92	6,79	5,92	5,05
impiegato monoreddito con moglie e 2 figli (appartamento di 90 mq)	1999	4,22	4,53	4,22	4,22	2,74
	2000	4,45	5,26	4,96	4,45	3,24
	2001	5,50	6,37	5,12	4,54	3,86
	2002	4,94	6,62	6,52	5,26	4,21
	2003	5,49	6,67	7,26	5,49	4,51
	2004	5,33	6,48	7,05	5,71	4,57
	2005	5,05	5,92	6,44	5,57	4,35
	2006	5,85	7,02	7,35	6,35	5,18
	2007	6,45	7,44	7,44	6,45	5,46
	2008	6,38	7,36	7,36	6,38	5,39
	2009	6,60	7,57	7,57	6,60	5,64
coppia benestante bireddito (appartamento di 90 mq)	1999	2,34	2,52	2,34	2,34	1,52
	2000	2,48	2,93	2,76	2,48	1,80
	2001	3,06	3,54	2,84	2,52	2,15
	2002	2,75	3,68	3,62	2,92	2,34
	2003	3,05	3,71	4,04	3,05	2,51
	2004	2,97	3,60	3,92	3,18	2,54
	2005	2,81	3,29	3,58	3,10	2,42
	2006	3,25	3,90	4,09	3,53	2,88
	2007	3,59	4,14	4,14	3,59	3,03
	2008	3,54	4,09	4,09	3,54	3,00
	2009	3,67	4,21	4,21	3,67	3,13

Figura 6 – Evoluzione storica dell'Housing Affordability Index relativa al comune di Cagliari.

Dall'analisi emerge che l'indice calcolato si mantiene quasi sempre su valori che evidenziano una notevole difficoltà da parte della comunità locale nell'acquisto di una adeguata unità immobiliare. Tale aspetto è riconducibile al fatto che negli anni l'andamento dei prezzi degli immobili è aumentato di circa il 100% mentre il reddito della popolazione non ha seguito la stessa tendenza.

Inoltre, esaminando l'evoluzione storica dell'indice HAI, si evince chiaramente che solo negli anni 1999/2000 si è manifestata la possibilità di acquistare agevolmente un immobile residenziale per tutte le tipologie di nuclei familiari prese in considerazione. Invece dal 2000 sino al 2008 l'indice HAI è cresciuto bruscamente, rendendo praticamente impossibile l'acquisto di un immobile specie per i nuclei familiari monoreddito. Dal 2008 in poi tale indice si è invece pressoché stabilizzato, subendo solo un leggero incremento.

E' dunque evidente che il mercato immobiliare nel contesto analizzato si trova in una fase di grossa incertezza sugli sviluppi futuri. Secondo gli operatori del mercato, allo stato attuale, complice la crisi economica globale, il numero di compravendite negli ultimi tre anni risulta particolarmente ridotto rispetto al periodo 2004-2008. L'inevitabile conseguente diminuzione dei prezzi si è per adesso manifestata prevalentemente nei canoni d'affitto mentre i valori d'offerta delle unità immobiliari residenziali tendono a variare notevolmente a seconda della volontà o meno del proprietario di voler procedere ad una vendita in tempi rapidi. Il mercato immobiliare si trova dunque in una fase di stallo il cui futuro dipenderà, molto probabilmente dall'andamento a breve termine della congiuntura economica: nel caso in cui la crisi economica dovesse risolversi in tempi rapidi il mercato potrà riprendere fiato ed assestarsi lentamente su valori sostenibili dalla comunità locale, altrimenti questo passaggio dovrà inesorabilmente compiersi in maniera più brusca con una conseguente drastica contrazione dei prezzi medi di vendita che potrebbe condurre il mercato immobiliare locale ad una situazione di crisi assolutamente inimmaginabile sino a qualche anno addietro. Inoltre, aldilà di quelli che potranno essere gli sviluppi futuri del mercato, ciò che colpisce maggiormente è ancora una volta la scarsa disponibilità di informazioni oggettive capaci di far conoscere l'investitore sul livello di rischio associato all'investimento immobiliare. Nelle condizioni attuali del mercato, chi si appresta ad acquistare un immobile deve necessariamente avere la possibilità di essere informato sui rischi relativi all'investimento. Per poter creare un prototipo di sistema informativo capace di assolvere questo compito, l'analisi dei valori HAI è stata eseguita anche tramite un applicativo GIS capace di rappresentare i risultati ottenuti attraverso un sistema di Virtual Earth Exploration, basato sull'interfaccia Google Earth. In questo modo, anche un utente non esperto, può percepire agevolmente l'evoluzione storica del livello di sostenibilità economica nell'acquisto immobiliare ed essere, almeno in parte, consapevole del livello di rischio associato all'investimento immobiliare.

Bibliografia

- Marchi G., Argiolas M. (2009) "Tecniche di supporto per la diffusione delle conoscenze" in Marchi G., Argiolas M., Miccoli S. (2009) "L'influenza dei beni paesaggistici nella valutazione del rischio d'investimento immobiliare: analisi ex-post del contesto statunitense", *Atti del congresso Valutazione e progetto di paesaggio*, Napoli.
- Deplano G. *Partecipazione e comunicazione delle nuove forme del piano urbanistico*, Edicom Edizioni, Monfalcone (GO), 77-85.
- Fabozzi F., Shiller R. J., Radu T. (2009), "Hedging Real – Estate Risk", *Journal of Portfolio Management, Special Real Estate Issue*, 35: 92-103.
- Greenspan A. (2008), "We Will Never Have a Perfect Model of Risk", *Financial Times*, 9.
- Istituto Italiano di Valutazione Immobiliare (2004) "Rating Europeo della Proprietà e del mercato" in *TEGoVA*, Milano.
- IVSC (2009), *International Valuation Standards*, IVSC, Londra.
- Shiller R. J. (2008) – *Finanza Shock come uscire dalla crisi dei mutui subprime*, Egea.
- Su G. (2003), "The evolution about the risk of real estate investment", *Industrial Technology and Economy*, 6: 78-81.
- Tamborrino F. (2010), *Annuario Immobiliare 2010*, Il Sole 24 Ore S.p.A., Milano.

TEGoVA (2009), *International Valuation standards*, Bell&Bain, Glasgow.

Trotz R. (2004), *Property and Market Rating. A Practical Tool of Property Analysis*, HVB Expertise, Monaco.

Zhang J., Zhang P. (2004), "The grey fuzzy comprehensive evaluation of financing risk in real estate" *Construction Management Modernization* 4.

www.agenziadelterritorio.com

www.ca.camcom.it

www.demographia.com

www.eurostat.com

www.istat.it

www.globalpropertyguide.com

www.standardandpoors.com

www.unionesarda.it

Territorial domains – competences integration model: geographical and cultural data, archaeological heritage, urban reconstruction project through “*augmented reality*” techniques

Ezio Arlati (*), Fariz Khalilli (**), Mauro Langfelder (***), Giovanmaria Lechi (*)
Elisabetta Rosina (*), Luigi Scrinzi (****)

(*) Politecnico di Milano - Dipartimento BEST, Via Bonardi 3, 02-23995178, ezio.arlati@polimi.it
(**) MIRAS - Social Organization in Support of Studying of Cultural Heritage, Archaeological Department
responsible. the National Museum of History of Azerbaijan, Baku, fariz.khalilli@yahoo.com
(***) Capitolo Italiano IAI, langfelder@tiscalinet.it
(****) Artistic Director of the National Historical Museum of Azerbaijan restoration, Baku,
the MIRAS Representative in Italy, scrinziluigi@gmail.com

ABSTRACT

The present paper introduces the research and design initiative of the Politecnico di Milano – BEST Department in collaboration with MIRAS, concerning the application of an integrated set of technologies to the surveying and digital modeling of archaeological sites in Azerbaijan. The range of interested scientific and technological competences that are implemented in the data mining, data sets representation and elaboration into digital models, ambitiously aims at reconnecting a quantity of knowledge fragments concerning the ancient Capitol City of Shirvanshah Khanate Agsu and its history, the layout of which was lost through dramatic historical events, including the deportation of the archives by military occupants or political Institutions aiming at a strict centralization and banishment to exile of ethnic traditions. The synergy among technologies extended from the Geographical surveys and Information Systems towards architecture and engineering of building constructions is awaited to recompose the lost mosaic of this culture.

A SCIENTIFIC RESEARCH AND DESIGN PROJECT

The goal of this presentation is to introduce to the audience of scientists and technicians a research experience that is moving its first steps towards an ambitious aim: to experiment the collaboration among different knowledge domains working around the reconstruction of a significant historical and cultural heritage, the major traces of which historical events have dispersed.

The engagement of many holders of specialized competences operating together within the Politecnico di Milano - BEST *Building Environment Science and Technology*, is proposing a practical experimental model of knowledge synergy applied – to begin with a very relevant case in the history of Azerbaijan - to an archaeological theme situated in Azerbaijan: the lost city of Agsu, one of the capital cities of the old Shirvanshah Khanate.

The base for this activity has been officially constituted by the “Framework Agreement” jointly signed between Politecnico di Milano and MIRAS - *Social Organization in Support of Studying of Cultural Heritage*, the Azeri Institution in charge of developing the archaeological exploration and cultural valorization of Agsu and other very relevant sites. The essential objectives of the “Framework Agreement” concerns the implementation of the Politecnico – and particularly of BEST Department – integrated technological competences’ system in supporting the development of specific applications in the domains of geographical data inquiry and collection by means of spatial and terrestrial surveys of archaeological sites, digital modeling and performance simulation for excavated remnants protection systems, updated high energy efficient envelopes’ conception and design, collaboration for technology transfer initiatives, cross exchange initiatives for the cultural heritages dissemination between Italy and Azerbaijan and for education for researchers and PHD students.

AGSU, THE ABANDONED REFUGE - CAPITOL CITY

Extraordinary is the history of Aghsu, since the reasons of the foundation itself by order of its Governor of Shirvanshah Khanate, who wanted to rescue his Capitol City from the military pressure of its very encumbering and arrogant neighbor, the Russian Zar Nicola th 1st. Thence Aghsu – chronicle reports – was built in only two years of intense construction works, that resulted in the foundation of the city in a square settlement, applying the scheme of an ancient Roman *Castrum*, organized around the crossing of *Cardus* with *Decumanus* main streets (but here exactly oriented upon Mecca direction?), enveloped in its square scheme defense system, with walls and river – supplied ditches.

- RECONSTRUCTING A LOST IDENTITY

One of the major peculiarities of the Aghsu re-discovery project is the absence of a large number of evidences of its history – that normally guide the archaeologists' research work – that political and natural events have cancelled, dispersed and exiled to the land of non-remembrance: from this removing of memory – of the Knowledge patrimony interwoven with the history of civilizations along this bridge-way territories – and the Country's desire of re- knotting the warp and woof of the forgotten carpet configuring its identity, recognizing the scheme of its design with its special chromatics, specially moves this trial of knowledge contamination.



Images 1&2 – Gobustan landscape: gigantic stones with alphabet inscriptions.

- PRECEDENT EXAMPLES: GOBUSTAN INSCRIPTIONS

A formidable example of reconstruction of the lost traces of a remarkable historical past is located in Gobustan Region, a wild land north of Baku, where the geological events of the glaciers descending the Caucasian Mountains slopes towards the Caspian sea. Here, a vast population of stone - carved inscriptions since Superior Paleolithic to recent times is spread upon the fragmented layers of huge stones that form the wild character of the landscape: drawings of totemic wild or domestic animals, magic symbols, human figures of soldiers or horse-mounted heroes, inscriptions in many different languages, from Arabic to Farsi to unknown alphabets. Among them one sounds extremely important for the understanding of the timeless tradition of commercial, cultural and political exchange between the West and the East: the Latin inscription carved by an ancient Roman Army officer Lucius Julius Maximus, stating the presence of his Legion – the “*Duodecima Fulminata*”, “The Twelfth Thunderbolt-decorated Legion” - , under the empire of Domitianus Caesar Augustus Germanicus.

The restoration and preservation of this historically fundamental inscription has been recently carried out by one of the authors of this paper, prof. Luigi Scrinzi, guiding an on purpose archaeological equip composed by Azeri personnel from MIRAS and the National Historical Museum of Baku.



Images 3&4 – Gobustan: the Ancient Roman inscriptions reporting of 12th Legion Fulminata.

- THE SILK WAY BRANCH THROUGH AGSU

The discovery of other relevant traces of the Azerbaijan history and civilization may occur travelling through the chain of Caucasian mountains north – west of Agsu, highlighting the fundamental character of this bridge- land between East and West. This case – extremely pleasant in addition to its great cultural interest – concern the un-awaited and surprising permanence of the traditions connected with the Silk Way tradition, *id est* the conservation of traditional artisan craft techniques for the silk fabrics decoration by natural colors dyeing derived by vegetal essences, applied by hand stamping by wooden blocks, composing natural dyed colors and decorative patterns by the “Batik” technique, inherited from ancient India.



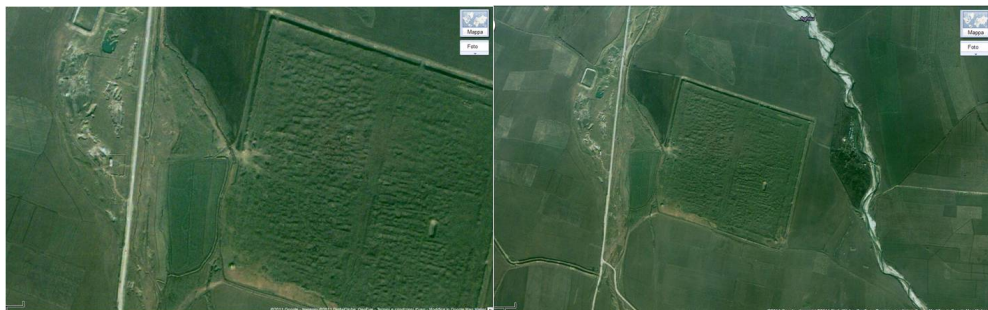
Images 5 – The silk decoration by wooden blocks and Batik dyeing technique.

- IMAGES FROM THE HIGH: RECONSTRUCTING THE TERRITORIAL INVISIBLE SUPPORTING STRUCTURE

The fundamental contribution awaited from satellite picture-taking of the Agsu geographical area is the recognition of the pattern of physical characters that can describe the thick fabrics of relationships structuring the territory; thence becoming the supporting backbone to guide the reconstruction of the mosaic of connected material particles - tracks that evidence the passage of the historical events and, even more, configure the outline of an entire civilization located along the Silk Way, by its material culture and even more in the immaterial conception of its human population styles of life and believes.

Actual revelations are awaited by satellite surveys of the old Agsu city, the images of which will be analyzed in order to identify a number of data sets according to the city’s reconstruction hypothesis

that are being formulated by Azeri archaeologists and Politecnico researches: for instance the actual position of the ancient Agsu River bed – in charge of supplying water for defense ditches - but probably much more; *id est* to separate the city into a defensive creek, that made its military position much more defensible due to the presence of an ever changing stream and to the uneven terrain of its bed and banks.



Images 6&7 – The ancient city of Agsu, before the archaeological excavations.

- **TRACES OF THE URBAN MOSAIC**

But a number of further data are the objects of the scanning and analysis of the digital images that both satellite and terrestrial survey will supply to the researchers:

- which was the original layout of the road network connecting ancient Agsu to the Silk Way through its peculiar branch passing through the mountains' chain protecting the plan from the north, reaching the little town of Laich, religious and pilgrimage centre since very ancient times;
- which was the actual tracing of the road connecting Agsu to the mountains' passage related with the Agsu River contemporary bed; one or more bridge-ways and fords have to be identified, in order to correctly interpret the disposition of the city defense system, provided of one only access door, fortified by a ravelin: the reconstruction of actual tracings and their dimensions would make clear the whole defensive system scheme, proving the application of military techniques related to the use of available weapons and to the tactical actions of defenders against offending troops;
- how the essential communication and transportation system with the city was designed – considering the vital commercial role of the whole area and of this capitol city along the Silk Way – how it was peculiarly connected with a fundamental infrastructure like the local Caravansary, clearly identifiable traces of which are placed in front of the city access door, but at a non-negligible distance; once more a defense measure to be interpreted in connection with river stream;
- how correct is the geographical orientation to the Mecca, upon which the tracing of the whole city layout is planned, around the crossing of its main streets *Cardum* with *Decumanum* the central Mosque is located. The exact reconstruction of the layout would support the individuation of other main buildings' and infrastructures' most probable locations, guiding the excavation priorities for archaeologists.



Image 8 – A view of the recently excavated Mosque site in Aghsu, showing the columns' basements.

- A DECISIVE REMNANTS' ENSAMBLE: FINDING OF THE MOSQUE

The excavation of the ancient Aghsu Mosque – the one we suppose to be the main central one, connected with religious ceremonies practiced by the rulers – marked a decisive enhancement for the reconstruction of Aghsu main features' layout: during the Spring 2011, the building was individuated by on purpose aimed excavations, that revealed a wide area surrounded by enclosure walls, furnished with access way from the main street to an entrance atrium, hygienic services with clean water supply and sewerage system.

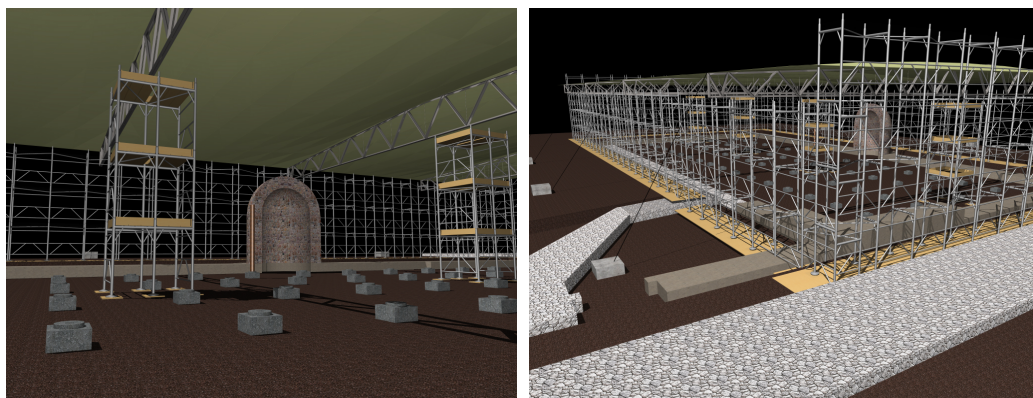


Image 9&10 – Views of the digital model of the Aghsu Mosque, protected by a provisional structure against the damages due to the rain season.

The Mosque prayer area is a wide rectangular building of which very thick enclosing walls made by clay and straw bricks have been excavated, together with the very regularly disposed base stones of 56 columns have been found. The Mirhab structure has been individuated through the ruined remnants, perfectly recognizable because of the presences of the couple of crowning arches made by burnt bricks and lime mortar – the one structure built by solid and permanent materials among the whole ensemble of up-to now excavated structures belonging to such an important building. Examples of the cone-shaped stone capitals of the columns have been found; the slender shape and limited dimension of which tells about a light roofing structure, in which wide and high wood truss-beams had to configure the interior space of the praying area.

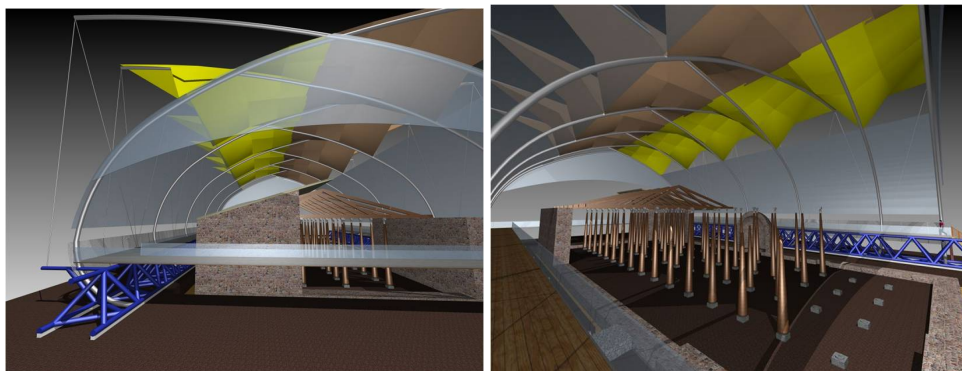


Image 11&12 – Views of the digital model of the Aghu Mosque tentative reconstruction on the base of the finding analysis. A permanent protection system is added to rescue the site, allowing visits.

A huge quantity of the burnt clay roofing tiles have been found, broken unto a myriad of fragments from which some entire examples were extracted and assembled to configure the real consistency of the tiles waterproofing, allowing the evaluation of the whole amount of loads to be supported by truss-beams supporting structure. The analysis of the tiles describe the great attention of the architects and tile-makers for the quality of the manufactured elements, that are very thin and light in comparison with the normal size of Italian similar elements, our Italian “*coppi*” - covering tiles. The 3D preliminary architectural models for the reconstruction of the Mosque, based upon the tentative and provisional commonly shared interpretation of the findings issued by MIRAS archaeologists and BEST architects, describe the main features of the building and forward the representation of the special atmosphere that had to permeate this worship place.

- THE EXCAVATED FINDINGS’ PROTECTION: INTEGRATED DESIGN OCCASION

Advanced architectural and engineering modeling techniques are applied to configure the archaeological remnants, the ideal – by now – or preliminary reconstruction of the buildings, by using 3D, Object Oriented, Parametrical modeling software tools, populating the IFC Standard-based elaboration environment enabling the interoperability practice among the phases of the design development, enhancing from the preliminary to the executive and shop-design stages.

This sophisticated software apparatus is adopted in order to allow the very ‘sensitive and exact’ representation of the original archaeological materials fruit of the excavation campaigns, associating the assumption of correctly assessed building materials and techniques data with the ability of configuring the linguistic and spatial suggestion that the original buildings were offering to the population of their users, including the light and shadow atmospheres, the climatic variations control for the comfort of the inhabitants.

- FRAGMENTS OF MATTER DESCRIBING BUILDING TECHNIQUES

The construction techniques of the buildings - as revealed up today by archaeological excavations led by MIRAS - are directly influenced by the limitations imposed by the compelling construction accomplishment program and by the nature of the locally available resources of construction materials, in the flat alluvial plan along the Aghu river. Large layers of gravel with rounded pebbles of every dimension made of hard limestone, fruit of the glaciers’ erosion from the sides of Caucasian mountains. Among the gravel, middle-size stones are abundant; in spite of their rounded and globular shape, their use for the construction of buildings’ foundations is allowed by simply splitting them into two or four parts by sledge-hammer strokes, so that nearly plane surfaces can be composed with crude clay into thick foundations, the peripheral sides of which show a nearly regular texture. The thickness of foundation walls is the consequence of the evaluation of ability of the applied

building technique as the load-bearing structure supporting the crude clay and straw bricks elevation walls, on which wooden horizontal structures are laid to build flooring and roofing parts of works.

- AUGMENTED REALITY' TECHNIQUES

Profiting both of the digital 3D models elaborated for the Agsu terrain from topographical, terrestrial, aerial and satellite surveys, and of the main buildings' digital models the layout and architectural features of which the archaeologists' excavations have already revealed, a simulation of the ancient Agsu city will be elaborated; the virtual reality environment into which the digital model will be implemented will allow visual exploration and other interactions, in order to explore the alternative possibilities for architectural reconstruction, for conservation actions modeling, comparing alternative of techniques to be applied, for the preservation policy to be implemented in order to allow visitors access, etc.

An advanced software environment will be implemented to support the issuing of a number of alternative and concurrent reconstruction hypothesis for the whole Agsu city ensemble and its surrounding territory, by means of digital simulation of its urban texture, the hierarchy of streets and little squares infrastructures with their technical installations as water supply pipes and sewerage systems, the location and architectural features of the urban landscape configures by main public and civil representative buildings, of the main public services as markets, completed by the filling-up texture of more modest residential and service buildings as artisans' and merchants' shops, etc. The progressive upgrading of the urban model will be the fruit of the updated data and reconstruction issues supplied by archaeologists' exploration of the Agsu site by new excavation campaigns; the virtual reconstruction. The ability of the digital model of Agsu to receive and implement the upgrading of the newly added data sets in the ensemble of its information system, the consequent ability to re-formulate the network of spatial and physical relationships describing the complexity of the city, depends on the potentialities of the virtual representation software environment. The *Augmented Reality* techniques applied to the urban digital model will allow, by a dedicated encoding technique, the direct association of any kind of data stored in the information system that the model's author or users may want to represent in close connections with the objects or sets of objects composing the digital model itself: for instance thermal data fruit of the simulation of seasonal behavior of buildings under the seasonal solar irradiation regime, or the performance data connected to specific building materials or parts of work.

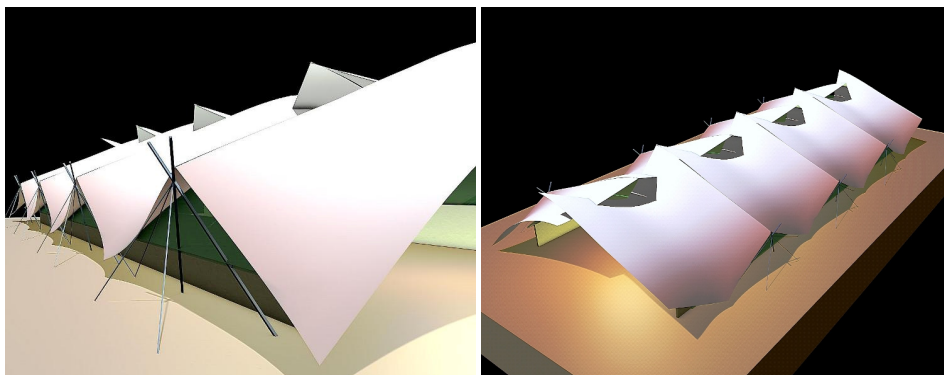


Image 13&14 – Views of the digital model of the Agsu existing Museum building, protected from solar irradiation by a tensile added structure and textile filtering membrane.

(Credits: Digital 3D object Oriented parametric models elaborated by **ProTeA - Progettazione Tecnologica Assistita** Research Unit. Authors of the pictures included in this paper: Ezio Arlati, Luigi Scrinzi, Fariz Khalilli, the Agsu Excavation Mission members).

***City model* per un sistema di trasporto urbano: la linea tranviaria Cosenza - Rende - Università della Calabria**

Giuseppe Artese (*), Vincenzo Marcella, Luca Vitaliano Rotundo,
Giuseppe Dodaro, Raffaele Toteda

(*) Università della Calabria, Dipartimento di Pianificazione Territoriale,
Ponte Bucci cubo 45B – 87036 – Rende - e-mail: g.artese@unical.it

Riassunto

Nell'ambito della progettazione definitiva di una linea tranviaria che dovrà collegare il centro della città di Cosenza con la limitrofa Rende ed il campus dell'Università della Calabria, è stato realizzato un *city model* di tutta l'area interessata.

Le zone attraversate dalla linea tranviaria hanno posto problematiche diverse e le soluzioni adottate hanno fatto uso di dati di diversa provenienza. In particolare, sono stati utilizzati i risultati di rilievi fotogrammetrici e di rilievi LIDAR aerei. Le viste di *Pictometry* sono state adoperate in alcuni casi per le facciate degli edifici. Tra i prodotti finali, è stato messo a punto un filmato virtuale, con l'animazione del tram e l'indicazione delle varie fermate.

Abstract

In the framework of the final design of a tramway that will connect the center of Cosenza with the neighboring city of Rende and the campus of the University of Calabria, a city model of the entire area has been realized.

Due to the different characteristics of the interested areas, many problems have been to be faced, and the solutions have made use of data from different sources. In particular, we have used the results of both photogrammetric and LIDAR aerial surveys, along with the existing maps in scale 1:2000 and 1:1000. The views of *Pictometry* have been used in some cases for the facades of the buildings.

Introduzione

La realizzazione di *city models* ha avuto negli ultimi tempi uno sviluppo considerevole, grazie alla possibilità di fare uso di DTM, DSM e DDSM (Dense Digital Surface Model) estremamente dettagliati. L'utilizzo sempre più diffuso del LIDAR aereo consente oggi di disporre di modelli densi delle superfici che, uniti ad ortofoto di grande risoluzione, permettono la realizzazione di riproduzioni foto realistiche di grande efficacia. Quando le zone da modellare hanno estensione limitata, si ricorre a prese LIDAR terrestri e/o all'utilizzo di foto raddrizzamenti (Artese, Salemi, 2002, Artese et al., 2003). L'ingombro di tali modelli non ne consente l'estensione a città intere, ma si ricorre sempre più spesso alle rappresentazioni *multiresolution*. E' sempre più diffuso, anche e soprattutto tra i non addetti ai lavori, l'uso di strumenti come *Google Earth* o *Bing Maps*; questi offrono la possibilità di una vista del territorio con l'evidenziazione del rilievo e per moltissime zone urbane, viste aeree a 45° e la possibilità di passeggiate virtuali. Con *Pictometry* è possibile realizzare modelli tridimensionali delle zone urbane ed eseguire sugli stessi misure geometriche. Altre rappresentazioni, molto diffuse sul WEB, sono le viste panoramiche a 360°, di facile realizzazione e limitate ad un incrocio o ad una piazza.

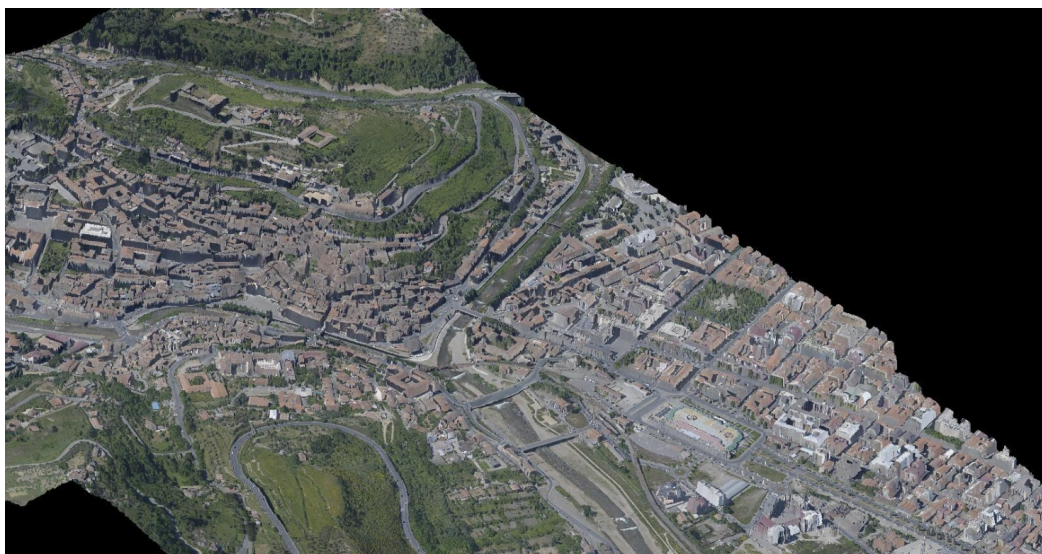


Figura 1 – Vista del modello globale da Nord-Est.

Nell'ambito della progettazione definitiva di una linea tranviaria che dovrà collegare il centro della città di Cosenza con la limitrofa Rende ed il campus dell'Università della Calabria, è stato realizzato un *city model* di tutta l'area interessata.

La linea tranviaria si sviluppa lungo una direttrice Sud - Nord ed ha uno sviluppo complessivo di 20 km. Essa attraversa quattro zone con caratteristiche diverse ai fini della realizzazione del *city model*: una prima zona è urbana e risale agli inizi del '900, una seconda zona è costituita da un viale a doppia carreggiata che attraversa un'area di espansione ed è fiancheggiata da edifici nuovi; la terza zona è la parte valliva di Rende, urbanizzata dagli anni '70 in poi, mentre la quarta zona è un tratto extraurbano fino all'Università, che si sviluppa lungo un asse di 1,5 km costituito da un ponte e da una serie di edifici ai lati dello stesso. Le zone attraversate hanno posto problematiche diverse e le soluzioni adottate hanno fatto uso di dati di diversa provenienza.

Il tipo di modello da realizzare dipende, ovviamente, dallo scopo per cui lo stesso viene richiesto. Nel nostro caso le esigenze erano due:

- valutare l'impatto di un'infrastruttura di notevoli dimensioni sul tessuto urbano dell'area Cosenza – Rende;
- realizzare un filmato virtuale del tracciato.

Per la prima finalità era necessario avere, da una parte, una rappresentazione su scala territoriale senza eccessivo dettaglio ma efficace come resa, dall'altra una rappresentazione con un dettaglio maggiore, limitando la zona rappresentata ad una striscia a cavallo del percorso della linea tranviaria; per la seconda finalità era necessario un dettaglio volumetrico in modo da individuare bene le zone attraversate, anche se non veniva richiesto un rendering foto realistico.

Per la zona urbana i dati a disposizione dei progettisti erano costituiti dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000 e dalle carte dei territori comunali in scala 1:2.000. Erano disponibili, inoltre, le foto aeree e l'ortofoto in scala 1:5.000. L'Università della Calabria è fornita di una cartografia in scala 1:1.000 dell'area universitaria; un modello 3D era stato, inoltre, realizzato per la zona nord (Artese et al., 2006). L'esecuzione di un volo LIDAR ha permesso l'utilizzo di un DSM molto dettagliato (4 punti per metro quadrato) unito ad un'ortofoto con pixel a terra di 20 cm.

Si è deciso, pertanto, di realizzare diversi modelli tridimensionali, che saranno descritti nel seguito.

Tecniche, strumenti e software adoperati per i modelli realizzati

Modello fotorealistico dell'intero territorio

Il primo modello, riguardante l'intero territorio urbano tra Cosenza e Rende, è stato realizzato utilizzando un DDSM ottenuto da volo LIDAR. L'effetto foto realistico è stato ricavato spalmando l'ortofoto sul modello numerico. Per tale operazione si è fatto uso del software *Er Mapper*.



Figura 2 – Vista del modello globale da Nord.

Le figure 1 e 2 mostrano due viste della parte sud, comprendente il centro storico di Cosenza.

Modello planivolumetrico

Il secondo modello costituisce la base per la valutazione dell'impatto a livello locale e per la realizzazione di un filmato virtuale lungo la linea tranviaria. Per questo motivo era necessario avere una rappresentazione con le volumetrie degli edifici. Sono state eseguite, pertanto, le misure a terra delle principali dimensioni delle facciate degli edifici con l'utilizzo di un distanziometro Disto. La zona rilevata è una fascia intorno all'asse del percorso tranviario.

La base cartografica a disposizione è stata utilizzata per ottenere il modello con i volumi estrusi. Per tale operazione è stato utilizzato il software Autocad.

In tale fase gli edifici e gli spazi sono stati differenziati in base alla loro destinazione d'uso. Sono state riportate, inoltre, le principali infrastrutture viarie.

La figura 3 mostra una panoramica del plani volumetrico della zona urbana, che si estende per circa 6 km in direzione nord – sud. La zona in comune di Cosenza si sviluppa lungo un asse viario che ricalca il vecchio tracciato ferroviario. Nella zona di Rende il percorso si sviluppa lungo due strade parallele, anch'esse con orientamento nord – sud. La fascia rilevata ha un'ampiezza di circa 100 m a cavallo del tracciato.

In figura 4 si può osservare il modello da nord; in primo piano la zona finale del percorso urbano da cui si dirama il percorso per il campus dell'Università della Calabria.

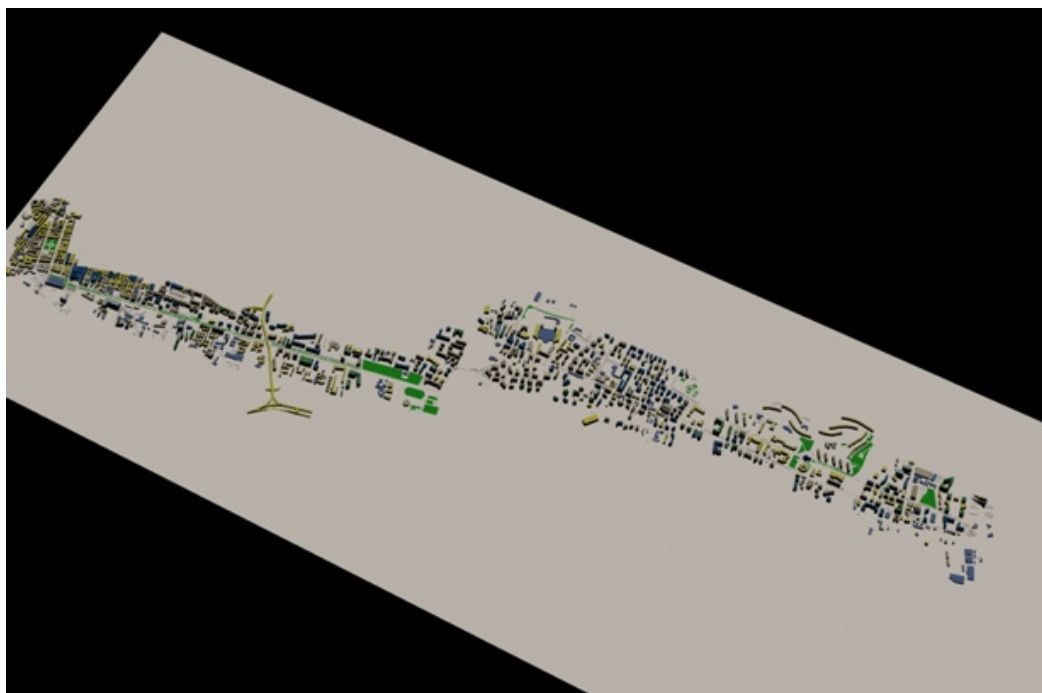


Figura 3 – Panoramica del planivolumetrico.

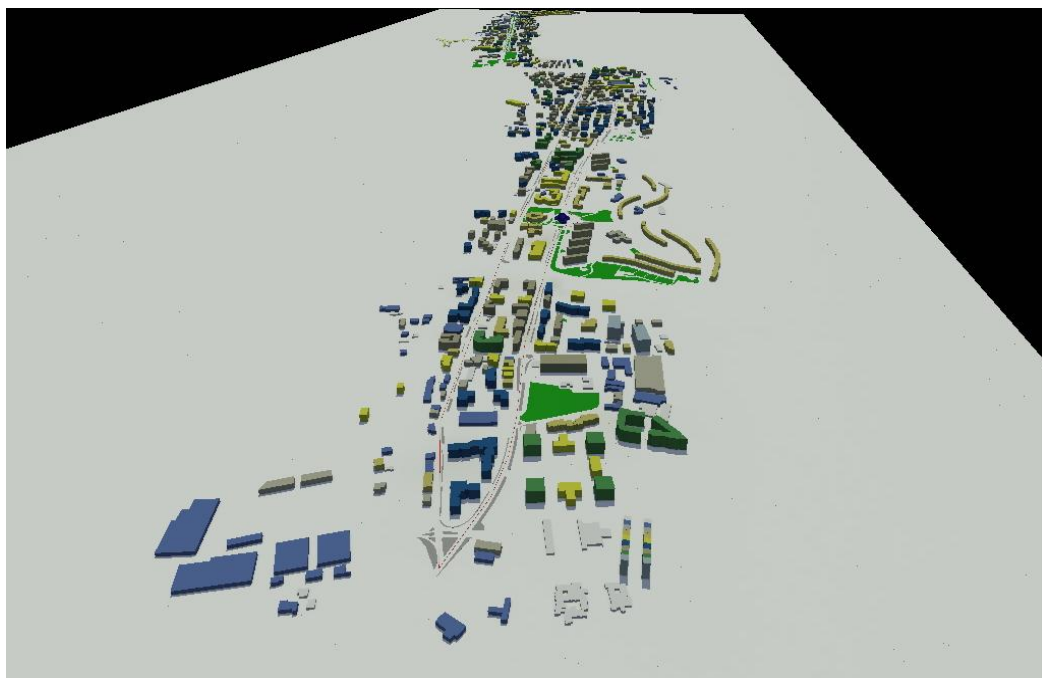


Figura 4 – Vista da Nord del planivolumetrico.

Modello dettagliato fotorealistico

Per alcune zone indicate dai progettisti, si è provveduto a realizzare un modello fotorealistico più particolareggiato. Le viste delle facciate degli edifici sono state raddrizzate e applicate al modello volumetrico. Vista l'estensione della linea tranviaria, non era possibile utilizzare foto a grande risoluzione senza rendere il modello di dimensioni non trattabili; altro aspetto importante è dato dalla difficoltà di avere viste pulite acquisite da terra. Per queste ragioni si è fatto uso di viste aeree a 45° disponibili sul web, che hanno il pregio di essere nella massima parte dei casi libere da ostacoli ed hanno ingombro contenuto. Il rovescio della medaglia è, ovviamente, la limitata definizione, che si evidenzia se si utilizzano viste molto ravvicinate.

Il raddrizzamento delle foto è stato eseguito col software Stereoview, mentre il modello fotorealistico è stato ottenuto con il software Artlantis.

Nelle figure 5 e 6 sono riportate alcune viste: la prima relativa alla stazione di partenza “due Fiumi” a Cosenza, la seconda nella zona urbana di Rende; si possono osservare le *textures* delle coperture, ottenute da ortofoto. La parte con *textures* foto realistiche è quella prospiciente la linea tranviaria, necessaria per una valutazione dell'impatto dell'infrastruttura nell'ambiente urbanizzato esistente. In vicinanza della stazione di partenza sono visibili alcuni fabbricati industriali che devono essere demoliti; il *city model* sarà utilizzato per la valutazione dell'inserimento dei nuovi interventi edilizi da realizzare nella zona.

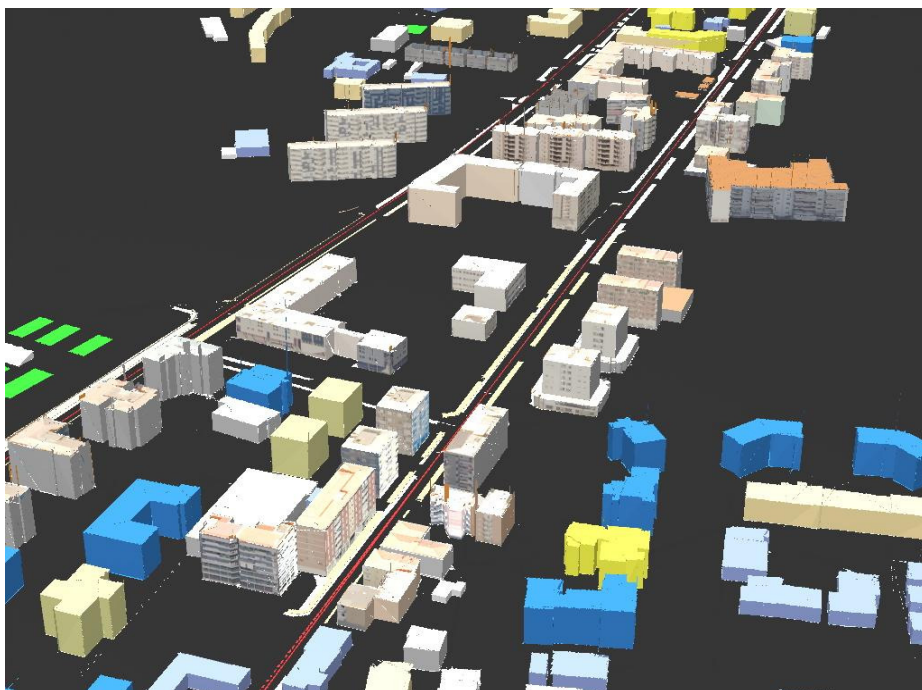


Figura 5 – Vista da Sud del modello fotorealistico nella zona di Rende.

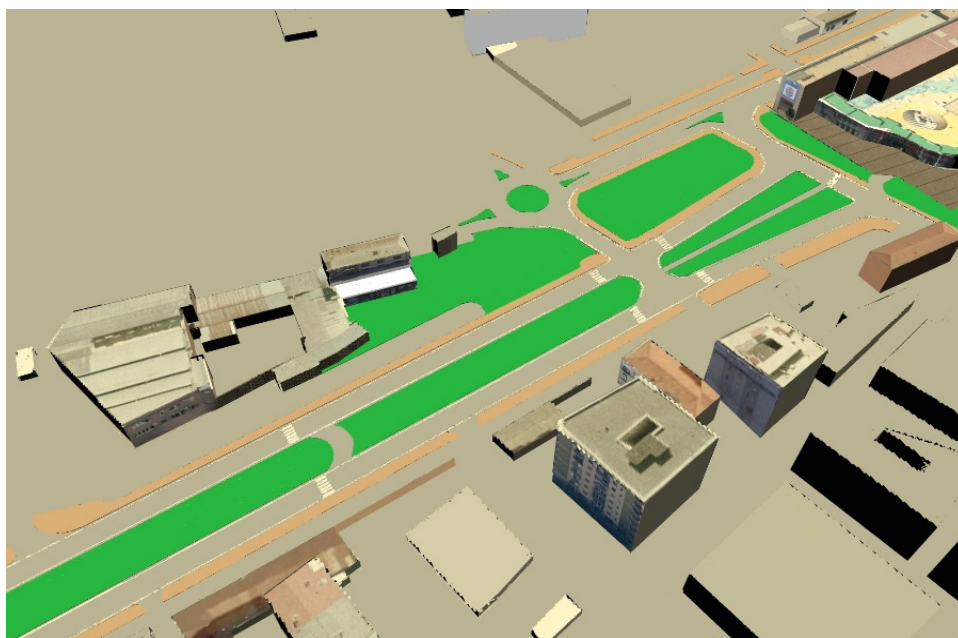


Figura 6 – Vista da Ovest del modello fotorealistico nella zona “due Fiumi”.

Modello per filmato virtuale

Il modello è stato messo a punto utilizzando il software Cinema 4D. E' stata adoperata la cartografia tecnica come base di appoggio, sovrapponendo alla stessa l'estrusione degli edifici ed i modellini 3D per le costruzioni aventi forma non prismatica.

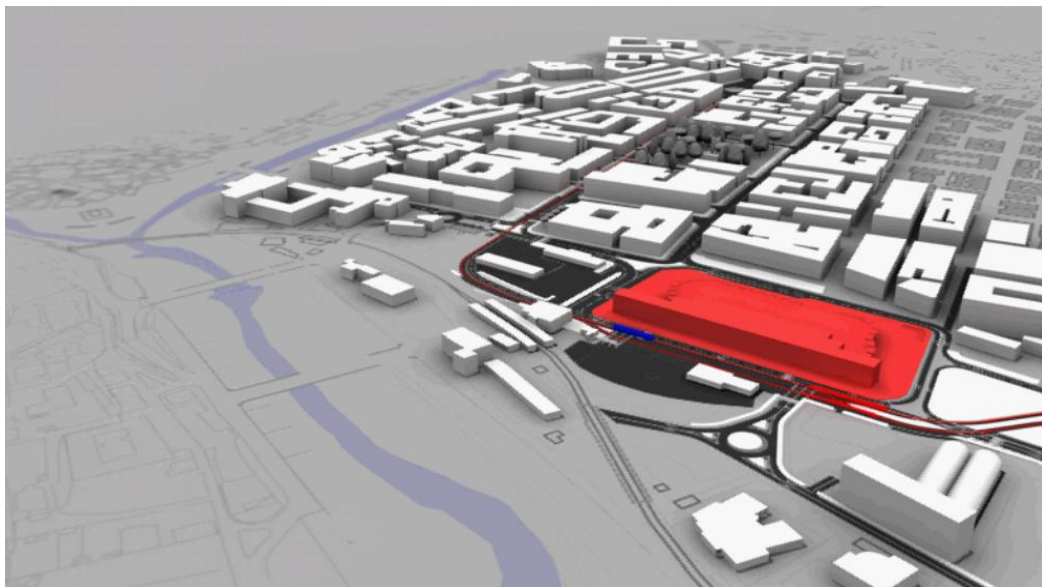


Figura 7 – Vista da Est del modello in Cinema 4D nella zona “due Fiumi”.

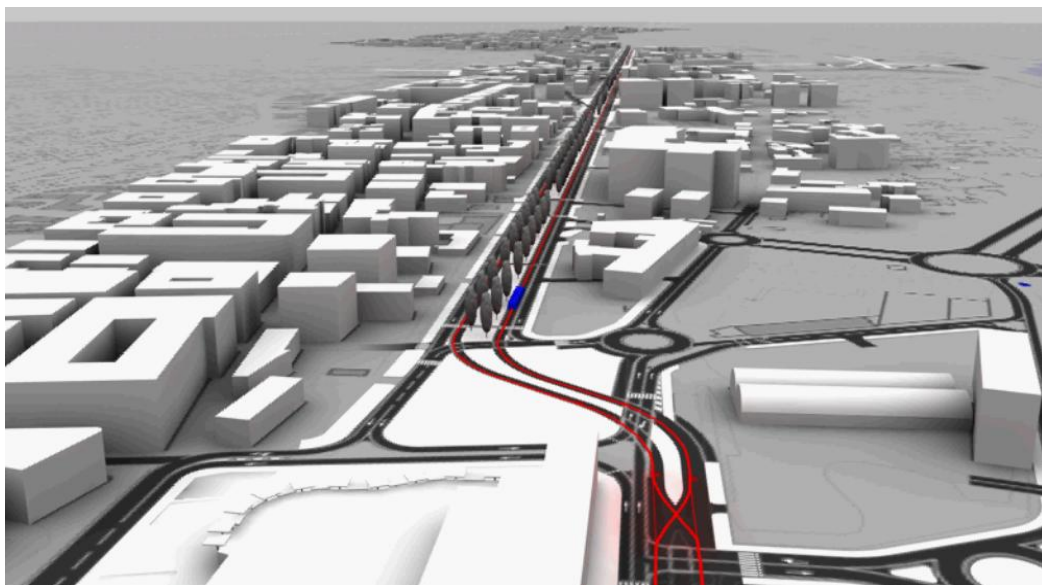


Figura 8 – Vista da Sud del modello in Cinema 4D nella zona “due Fiumi”.

Questi edifici, facilmente riconoscibili, costituiscono dei veri e propri *landmarks* per l'individuazione delle zone attraversate e vengono colorati in rosso nel filmato virtuale, quando il tram si avvicina agli stessi.

In figura 7 si può osservare la zona della stazione di partenza. E' evidenziato il centro commerciale detto appunto "due Fiumi"; il tram è colorato in blu, mentre a sinistra c'è la zona in 2D, con evidenziato il tracciato della Ferrovia della Calabria ed il fiume Crati. In figura 8 si osserva la stessa zona da sud; il centro commerciale non è più evidenziato in rosso.

Una terza vista da sud, lungo il tratto di Cosenza, è mostrata in figura 9. La strada sopraelevata esistente è schematizzata ma riconoscibile facilmente, mentre sullo sfondo si osserva la parte settentrionale del modello.

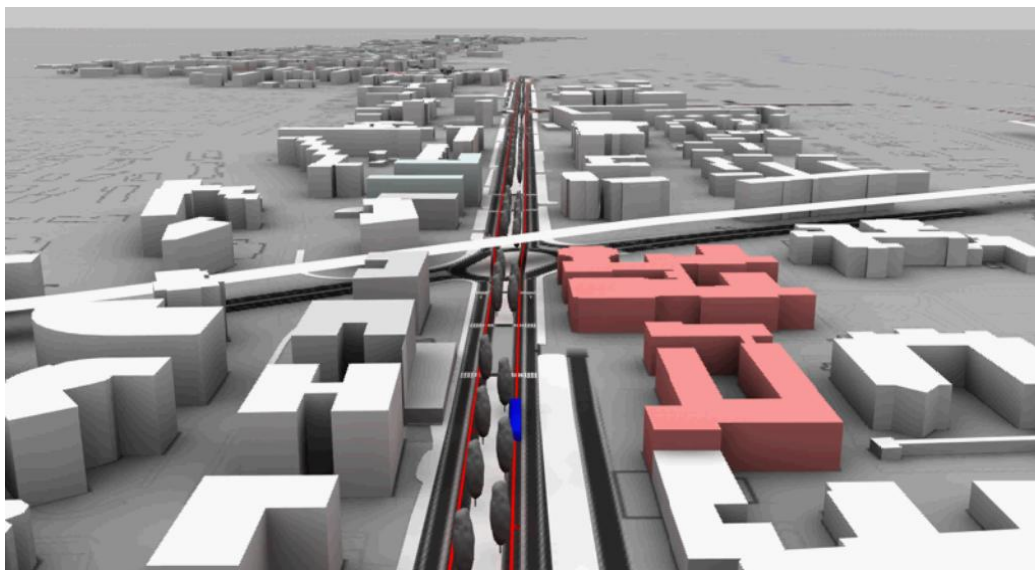


Figura 9 – Vista da Sud del modello in Cinema 4D lungo il viale Mancini.

Il filmato virtuale con il percorso del tram è utilizzato in un secondo filmato realizzato per la presentazione del progetto.

In figura 10 osserviamo la suddivisione in tre zone del fotogramma tipo. In alto a sinistra è riportata una vista 2D del *city model*, in alto a destra c'è il riquadro con il filmato vero e proprio, mentre in basso c'è uno schema del percorso simile a quelli che si trovano nelle vetture delle metropolitane, con l'indicazione delle fermate. Si può osservare da nord il tracciato extraurbano ed il planivolumetrico dell'Università della Calabria.

In figura 11 osserviamo un fotogramma con il tram in movimento. Nel modello 2D una luce rossa indica la posizione della vettura. Il tram è visibile nel riquadro a destra, seminato da un albero, nei pressi della chiesa di S. Carlo Borromeo, evidenziata in rosso. Il tracciato evidenziato in rosso nella parte bassa indica il tragitto che dev'essere percorso, e sono facilmente individuabili numero e nome delle fermate precedenti e successive.

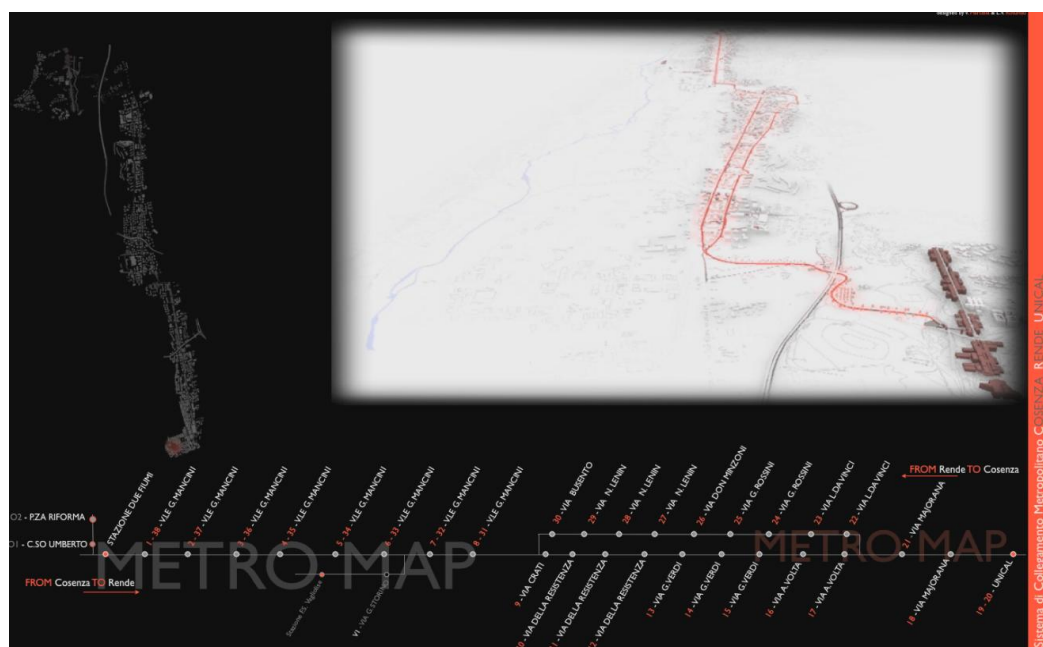


Figura 10 – Fotogramma del filmato per la presentazione con panoramica da nord.

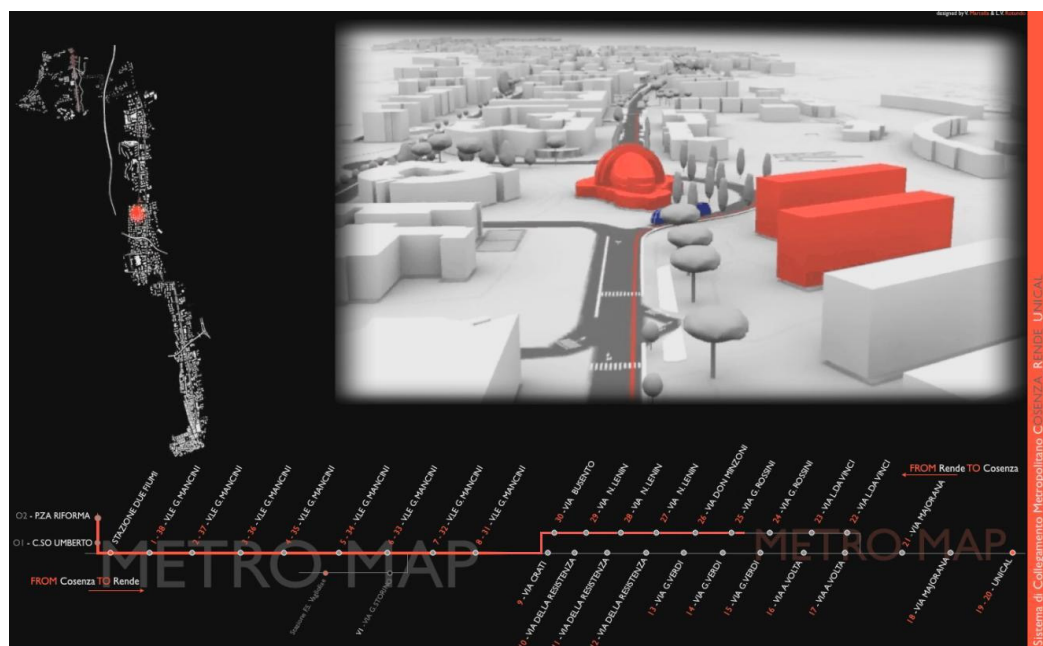


Figura 11 – Fotogramma del filmato per la presentazione con tram nei pressi della fermata 24 – Via Rossini.

Conclusioni

Sono stati messi a punto alcuni city models nell'ambito della progettazione del collegamento metropolitano Cosenza – Rende – Università della Calabria. Per i modelli, che si differenziano per estensione e grado di dettaglio, sono stati utilizzati dati provenienti da rilievi LIDAR, da cartografia, da ortofoto e da misure sul terreno. Sono stati adoperati diversi software sia per la creazione dei modelli che per il rendering e per la realizzazione di un filmato virtuale.

Bibliografia e Sitografia

Artese G., Salemi G. (2002), "Ortofoto 3D dinamiche: la ricostruzione dello Stradun di Dubrovnik", *Atti 6^a Conferenza Nazionale ASITA - Perugia 5-8 novembre 2002*– VOL. I – pp. 195-200

Artese G., Achilli V., Abitrante M. (2003), "Dynamic 3D representation of architecture as a design tool: the old town of Cosenza", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. XXXIV, PART 5/W12, Commission V*, pp. 28–33 – 2003 – ISSN 1682-1750

Artese G., Dodaro S., Trecroci A. (2006), " Il modello 3d dell'Università della Calabria", *Atti del convegno "Convegno Nazionale SIFET", Castellaneta Marina - Taranto, 14-16 Giugno 2006*, atti su CD ROM

<http://maps.google.it/>

<http://www.bing.com/maps/>

www.pictometry.com/

Geo-Progetto: studio di procedure geomantiche per la definizione di un Modello Unico Digitale Cartografico (MUDIC), integrato nel Modello Unico Digitale per l'Edilizia (MUDE) e finalizzato all'aggiornamento cartografico

Gian Paolo Artioli (*), Fabrizio Benati (**), Roberto Gavaruzzi (***), Eros Guareschi (****),
Marta Morani (*****), Leonardo Piccinini (****)

(*) ANCI Emilia-Romagna, segreteria@anci.emilia-romagna.it

(**) Certhidea SRL, fabrizio.benati@certhidea.it

(***) Università di Bologna, DICAM, roberto.gavaruzzi@unibo.it

(****) Fondazione Geometri e Geometri laureati dell'Emilia-Romagna, leonardo.piccinini@geopec.it

(*****) Comune di Reggio nell'Emilia, eros.guareschi@municipio.re.it, marta.morani@municipio.re.it

Riassunto

Il processo oggetto di questa analisi si inquadra nel Modello Unico Digitale per l'Edilizia (MUDE), ovvero all'istituto a cui viene chiesto di ricomporre i procedimenti autorizzativi edilizi e catastali introdotto dall'articolo 34-quinquies della Legge 80 del 10 gennaio 2006. Questo processo (ancora non attuato, essendo ancora al lavoro la preposta commissione ministeriale) racchiude tutti i procedimenti relativi ad ogni atto di edilizia privata in capo al Comune e ogni pratica relativa agli aggiornamenti catastali relativi a nuovi accatastamenti o variazioni oggettive di immobili già accatastati in capo alla Agenzia del Territorio.

L'idea sottostante questa sperimentazione è che grazie ad una opportuna modifica della prassi di interazione tra il Comune e il Professionista nelle fasi di compilazione di un permesso, istanza del permesso e alla richiesta di agibilità si possa effettuare un inquadramento cartografico degli immobili su cartografia comunale con informazioni presentate dai professionisti, e che grazie all'uso delle nuove tecnologie questo possa diventare preciso e poco oneroso (non necessitando di adattamenti al frame dato dalla RDN successivi a quelli realizzati dai professionisti – *fitting* – o altra forma di elaborazione).

Per potere fare sì che questo cambiamento del processo MUDE sia tecnologicamente possibile, è necessario che i Comuni forniscano ai professionisti la cartografia topografica con associate le informazioni sulla sua georeferenziazione in modo che essa rimanga integra nel frame originale anche quando il professionista la restituirà al Comune con le proposte di aggiornamento cartografico una prima volta derivate dal progetto edilizio e poi derivate dal rilevamento in modalità PREGEO dell'intervento edilizio realizzato.

Per verificare la fattibilità di tale aggiornamento cartografico, nell'ambito degli studi di fattibilità stesi dal Comitato MUDE dei progetti ELIFIS, ELICAT e FEDFIS (Benati et al. 2010) è stato ipotizzato il cambiamento organizzativo necessario, le tipologie di interazioni e la documentazione scambiata tra ente e professionista, oggetto del presente articolo. Infine, con la collaborazione dei tecnici professionisti è stata effettuata "una prova sul campo" - a Reggio Emilia - della adeguatezza delle tecnologie a disposizione per verificare concretamente la fattibilità di tale cambiamento.

1. Definizione di MUDE cartografico

Se da un lato il MUDE, nelle sue componenti “Edilizia” e “Catastale”, può risultare immediatamente chiaro dalla sola lettura del testo di legge, forse così può non essere per quello che abbiamo chiamato MUDE “Cartografico” o MUDIC e di cui forniamo quindi la nostra proposta di definizione.

In questo caso infatti, il set di dati afferente alla definizione di MUDE Cartografico varia al variare dallo fase della trasformazione urbana:

- al momento della comunicazione di Inizio Lavori, il MUDIC sarà una georeferenziazione del progetto di realizzazione dell’immobile necessaria per rendere “congruenti con le coordinate cartografiche” i riferimenti spaziali planimetrici di progetto dell’intervento edilizio.
Si tratta in questa fase di evoluzione dell’opera della caratterizzazione dell’ingombro del costruendo immobile con lo scopo di aggiornare la carta tecnica comunale (o il più “moderno” Data Base Topografico Comunale/Regionale), e quindi il SIT come immobile in costruzione / area di cantiere.
- al momento dell’Accatastamento, tramite rielaborazione da parte del professionista dei dati in PREGEO “modificato tecnologicamente”, il MUDIC consoliderà la geometria dell’intervento edilizio realizzato andando ad aggiornare la carta tecnica. In altre parole il MUDIC ambisce ad integrare il Sistema Informativo Territoriale (SIT, comunale e regionale) con la rielaborazione fornita dai professionisti dei dati nei PREGEO già realizzati per l’Amministrazione catastale.

La parte condivisa nazionale del MUDE per la cartografia, cioè quello che abbiamo chiamato MUDIC, dovrà quindi contenere tutti i dati necessari all’aggiornamento delle mappe catastali (in pratica i contenuti del PREGEO nella parte grafica tralasciando il censuario) e i dati necessari all’inserimento dell’immobile sulla cartografia tecnica (db topografico) comunale/regionale.

Per questo ultimo set di dati si dovrà fare riferimento a quanto definito dal Comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle pubbliche amministrazioni (Art. 59 del “vecchio” Codice dell’Amministrazione Digitale), per i Data Base Topografici (DBT) e per il nuovo Sistema Geografico di riferimento. Le prescrizioni da tenere in considerazione riguarderanno tutte le entità coinvolte nei processi di trasformazione del territorio “licenziati” dal Comune (edifici, strade, etc).

A tendere, sfruttando le potenzialità satellitari del moderno rilevamento topografico NRTK fornito da reti regionali di stazioni permanenti inquadrare nel frame RDN, sarà possibile (con investimenti relativamente piccoli) misurare e definire nuove ed accurate coordinate ai Punti Fiduciali catastali nel nuovo Sistema Geografico di riferimento; ciò renderà possibile progettare un processo di aggiornamento integrato delle “due cartografie” (molto diverse tra loro per contenuti informativi, tolleranze plano-altimetriche, modalità di impianto e di aggiornamento) da realizzarsi tramite il “MUDE cartografico”; il progetto di medio periodo presenta obiettive difficoltà tecniche e saranno necessarie alcune operazioni preliminari per la mosaicatura delle mappe catastali, per il riconoscimento sul DBT dei “punti omologhi” ai Punti Fiduciali catastali e altro ancora per rendere coerenti i dati cartografici e i dati di aggiornamento cartografico alle nuove coordinate dei Punti Fiduciali.

2. Il rapporto tra MUDE ed anagrafi immobiliari comunali

Come previsto nella normativa vigente, il MUDE deve permettere l’aggiornamento delle Anagrafi Immobiliari Comunali (anche note come Anagrafi Comunali degli Immobili o ACI). Per potere fare questo è necessario inserire nel MUDE una descrizione, anche cartografica, degli immobili interessati secondo una struttura dati condivisibile sia con ACI che con l’Agenzia del Territorio.

Il compito principale dell’ACI è quello di consolidare in un punto all’interno dell’Amministrazione Comunale informazioni certificate sui beni immobiliari del territorio. Dal punto di vista

amministrativo è concettualmente analoga all'anagrafe della popolazione: è un'anagrafe certificante dalla quale è possibile estrarre informazioni derivanti da atti amministrativi codificati da norme e regolamenti in vigore (procedimenti edilizi, atti di variazione catastale, istituzione di vie, etc.).

Dal punto di vista dei dati l'ACI realizzata in ELICAT (Progetto del Programma ELISA del DAR) integra da subito in modo coerente dati provenienti da: Agenzia del Territorio, Pratiche Edilizie, SIT/Urbanistica e Toponomastica.

È perciò evidente che l'introduzione del MUDE, compresa la sua componente cartografica MUDIC, con i contenuti comunali e catastali tra loro relazionati ed integrati *ex-ante* garantirà l'alimentazione dell'ACI con dati "univoci" e di qualità superiore al passato e il raggiungimento di due obiettivi:

- convergenza completa delle banche dati Comunali e Catastali sugli immobili;
- progressivo sgravamento dei professionisti nella attività di ricomposizione dello stato di fatto legittimato e degli atti di aggiornamento catastale.

Fatte tutte le ipotesi cui sopra, siamo ora pronti ad andare a vedere concretamente nella sperimentazione di Reggio Emilia quale impatto tecnico ed organizzativo, nel contesto dato, avrebbe la introduzione di un aggiornamento cartografico alimentato dalle attività dei tecnici Professionisti dell'edilizia.

3. La preparazione del MUDIC

Prima di potere procedere alla preparazione di una istanza di pratica MUDE (prima di una DIA/SCIA o Permesso di Costruire), si richiede al professionista di dotarsi della cartografia topografica di base utile all'inquadramento cartografico e che, a Reggio Emilia, viene denominata BTU. Fino ad ora ciò è avvenuto a Reggio Emilia solo per i prototipi di seguito illustrati, quindi queste attività che sono ancora sperimentali vengono rappresentate nelle figure 1 - 2 - 3 con un tratteggio.

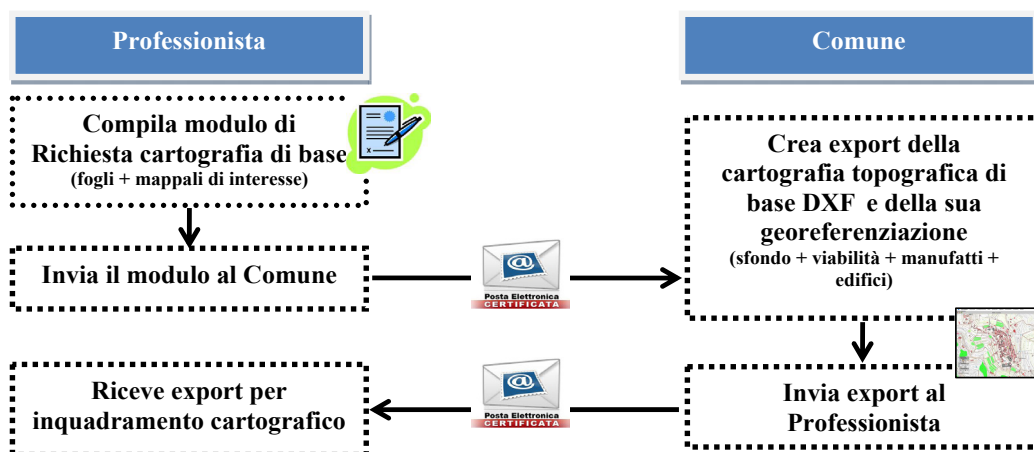


Figura 1 – Le attività preliminari all'inquadramento cartografico di una pratica edilizia.

Il Professionista compila un modulo di richiesta della cartografia topografica di base. La regolamentazione di questa richiesta presso il Comune di Reggio Emilia è avvenuta a seguito di una Delibera di Giunta Comunale (6516/2007), ed avviene con le seguenti fasi:

- il professionista scarica dal sito web del comune un modulo PDF

- compila il modulo nelle sue parti (i dati essenziali sono i fogli e i mappali di interesse).

A questo punto, il Professionista spedisce per posta elettronica il modulo compilato al Comune.

Il Comune prepara la base cartografica per inviarla al Professionista. Si tratta di una estrazione dalla carta topografica di base in formato DXF (per semplicità di interscambio in questa fase sperimentale) contenenti i *layer* utili ad una estensione cartografica adeguata e la loro georeferenziazione come: edifici esistenti, manufatti (es. recinzioni), viabilità (es. vie e civici esistenti), sfondo (appiattimento di verde, corsi d'acqua, etc).

Il professionista riceve la carta topografica di base con relativa georeferenziazione e ciò gli permette di mantenere nello stesso frame prima l'inquadramento cartografico del progetto edilizio e poi il rilevamento catastale PREGEO dell'intervento realizzato.

4. La istanza del titolo abilitativo

Questa operazione descrive come si è progettato di modificare l'attività di sportello nella accettazione di una istanza di pratica edilizia inclusiva dell'inquadramento cartografico: si tratta cioè di una operazione interamente di *backoffice* (vengono evidenziate con un tratteggio le sole operazioni aggiuntive o modificate rispetto alla situazione tradizionale). In aggiunta dei normali controlli di completezza, correttezza e rispondenza alle norme e regolamenti della pratica edilizia, in questo caso dovranno essere effettuati anche dei controlli sull'inquadramento cartografico prima della inclusione in carta topografica di base entro 30 giorni dal ricevimento. Questi tempi, nel momento in cui la DIA era ancora in vigore, garantivano un corretto feedback al professionista prima della validità del titolo abilitativo. Ora che la DIA è stata sostituita da un titolo abilitativo ad effetto immediato (la SCIA), tale vincolo viene a decadere ma si ritiene opportuno continuare a mantenere i 30 giorni in quanto – al momento della stesura di questo documento – tali sembrano essere i termini entro i quali la pubblica amministrazione può opporre il veto ad una SCIA.

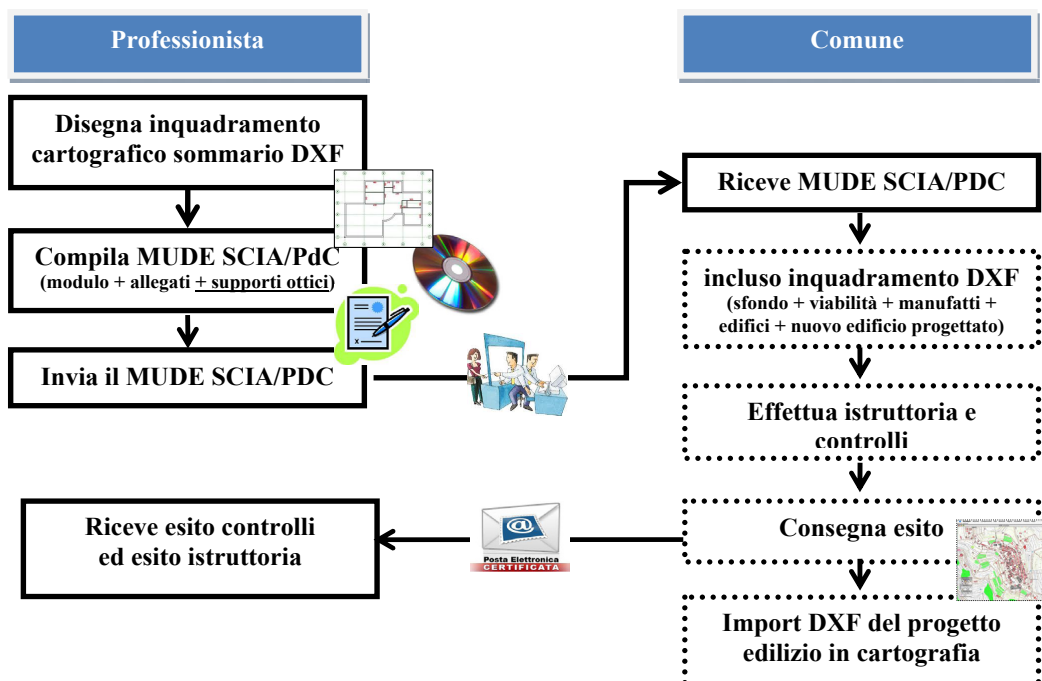


Figura 2 – La istanza di un pratica edilizia con inquadramento cartografico.

Nella sperimentazione il file di inquadramento cartografico dopo i controlli è stato incluso nella carta topografica di base per import dei *layer* georiferiti aggiuntivi rispetto all'originale fornito dal Comune e descritto in precedenza:

- I punti fiduciali catastali utilizzati (estratti dal sito della Agenzia del Territorio);
- I nuovi edifici.

I controlli adottati ai fini di garantire il corretto import in carta tecnica sono stati:

- a) **Presenza del file sul supporto:** SI/NO - il file fornito dal professionista è leggibile;
- b) **Tipologia del file:** SI/NO - l'estensione del file è uguale a quella richiesta (es. DXF);
- c) **Metadati del file:** SI/NO - primo intestatario del progetto, foglio, mappale, ecc.;
- d) **Georeferenziazione:** la porzione di carta tecnica riprodotta è georeferenzata correttamente
 - SI/NO - la georeferenziazione iniziale è inalterata;
 - SI/NO - si sovrappone correttamente alla attuale carta tecnica comunale;
- e) **Fedeltà dei layer agli originali:** il contenuto del file corrisponde ai *layer* forniti in origine
 - SI/NO - gli edifici prospicienti il lotto non sono stati "manomessi"; in caso di manomissione si è proposto di evidenziare (in rosso) le aree manomesse;
- f) **Correttezza dei dati geometrici dell'immobile:** i dati geometrici del professionista
 - SI/NO - presentano delle geometrie all'interno del lotto come insieme delle particelle dichiarate; in caso di manomissione si è proposto di evidenziare (in rosso) la zona del lotto manomessa;
- g) **Correttezza della sagoma rispetto le planimetrie:** i dati geometrici del professionista è coerente con quanto definito nelle planimetrie 1:100 od 1:50 del progetto architettonico
 - SI/NO - geometrie (perimetri) fornite nelle planimetrie e nell'inquadramento cartografico; segnalazione in caso di significativa differenza di superficie;
- h) **Coerenza con i punti fiduciali della Agenzia del territorio:** se il contenuto dei dati geometrici di competenza del professionista è coerente rispetto i Punti fiduciali
 - SI/NO - corrispondenza dei punti fiduciali indicati con quelli recentemente pubblicati sul sito della Agenzia; per quelli manomessi si è proposto vengano evidenziati in viola;

L'esito dei controlli effettuati sul file del professionista nella sperimentazione poi sono stati inviati per posta elettronica a questi sotto forma di documento PDF con anche file DXF modificato:

- In caso di esito positivo dei controlli, il documento PDF attesterà la correttezza del file;
- In caso di esito negativo dei controlli, il documento PDF indicherà quale dei controlli hanno dato esito negativo ed a questo verrà affiancato la restituzione (sempre in allegato alla e-mail) di copia integrale del file fornito dal professionista con eventualmente aggiunte le notazioni (cerchiature rosse) del funzionario, come indicato nei punti 5 6 7 e 8 dell'elenco dei controlli.

5. La istanza di Agibilità

Nello scenario legislativo previsto dall'art. 34-quinquies della L.80/2006 più art. 25 del D.P.R. 380/2002 e successive modifiche), la documentazione per il Catasto (DOCFA e PREGEO modificato) dovrebbe essere consegnata allo sportello unico per l'edilizia comunale prima della fine dei lavori. Nella situazione attuale però le suddette norme non sono state complementate con regolamenti attuazione, pertanto ai fini della sperimentazione abbiamo fatto riferimento al momento della richiesta al Comune del certificato di Agibilità, quando l'intervento edilizio è terminato ed il professionista ha già fornito i dati di aggiornamento catastale all'Agenzia del Territorio.

A differenza del capitolo precedente dove l'inquadramento cartografico sul file DXF fornito dalla pubblica amministrazione avveniva per posizionamento di una planimetria CAD di un progetto su un nuovo layer, in questo caso il punto di partenza sarà un rilevamento catastale - in modalità PREGEO - dell'immobile effettivamente costruito effettuato in loco.

Tradizionalmente, tale rilevamento avveniva impiegando strumenti di misurazione di distanze di tipo ottico rispetto ai Punti Fiduciali forniti dalla Agenzia del Territorio poi triangolati sulla cartografia a disposizione del tecnico. Di recente, grazie all'uso di reti di Stazioni Permanenti e modalità NRTK è possibile georiferire con una forte riduzione dei tempi di rilevamento e una precisione "centimetrica" gli "spigoli" del perimetro dell'immobile e importare su CAD tali punti rilevati.

Una volta rientrato in sede il tecnico professionista, tramite strumenti CAD potrà:

1. Inserire nel *layer* i Punti Fiduciali di pertinenza della Agenzia del Territorio ed identificarli con i punti omologhi della cartografia comunale/regionale
2. Inserire nel *layer* dei nuovi manufatti i punti georiferiti rilevati
3. Collegare i punti con la funzione di snap del CAD andando a formare i poligoni e tutte le altre informazioni cartografiche necessarie alla preparazione dei dati necessari alla produzione di (DOCFA) e PREGEO da trasmettere alla Agenzia del Territorio.

Riutilizzando il lavoro fatto per l'aggiornamento cartografico catastale quindi, il professionista potrà inserire nel file DXF richiesto al Comune i due *layer* di interesse: i punti fiduciali utilizzati e la sagoma del nuovo edificio come da rilevamento. Allegherà poi copia di questo file alla istanza MUDE di Agibilità per consegna allo sportello unico per l'edilizia assieme ad una autodichiarazione del fatto che "i file forniti" derivano da una rielaborazione di quanto precedentemente fornito all'Agenzia del Territorio tramite il PREGEO".

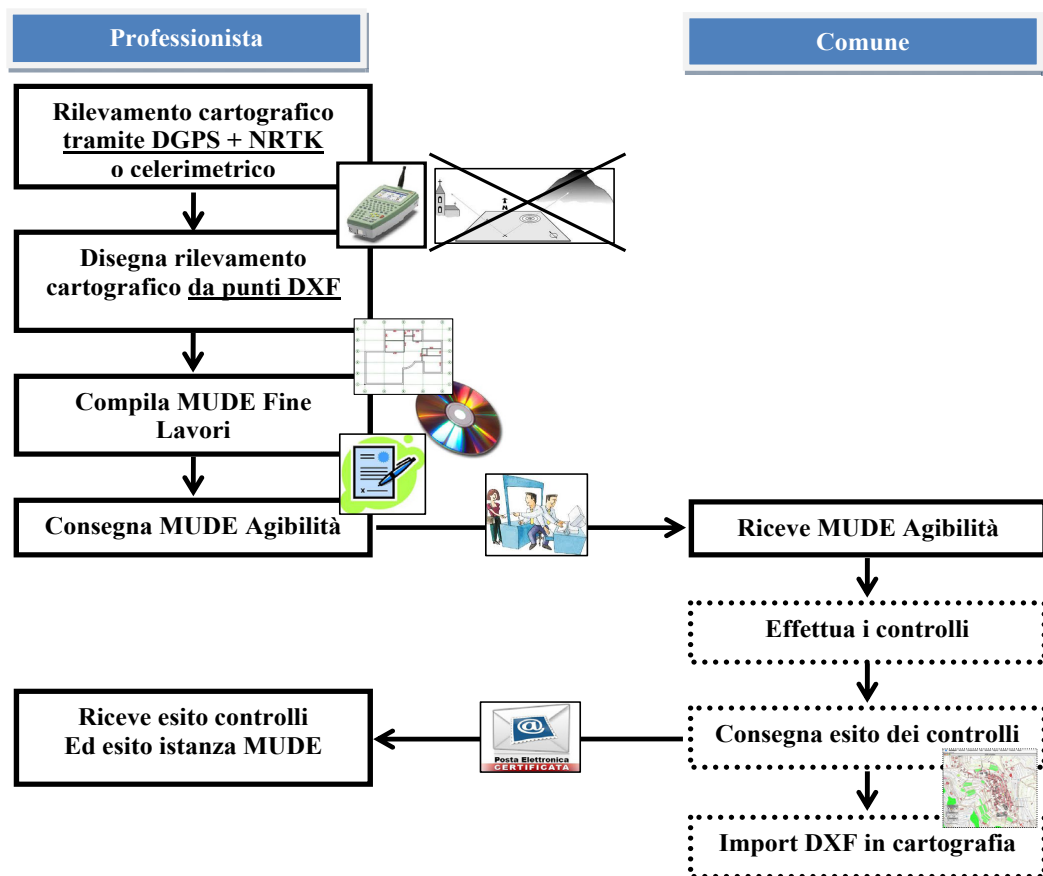


Figura 3 – La richiesta di certificato di Agibilità con inquadramento cartografico definitivo.

In futuro, in un contesto più maturo (ad esempio in caso di implementazione regionale del MUDE), si potrà chiedere al professionista di fornire copia integrale del PREGEO in aggiunta alle coordinate planimetriche della carta topografica di base e dei punti fiduciali utilizzati.

A questo punto lo sportello unico per l'edilizia potrà effettuare delle attività di controllo e ne potrà fornire comunicazione dell'esito al professionista prima di inserire il rilevamento in cartografia e comunque prima del completamento della istruttoria di Agibilità (prevista in 15 giorni come da art. 25 del D.P.R. 380/2002) in maniera del tutto simile alla sperimentazione del capitolo precedente.

In aggiunta ai controlli precedentemente proposti occorre effettuare anche il controllo:

- i) **Coerenza tra il MUDIC dati di progetto e dati finali:** SI/NO - tra il contenuto dei dati geometrici di competenza del professionista inviati in fase di accatastamento e quelli inviati al Comune di istanza per il titolo abilitativo (considerando anche le eventuali varianti presentate);
 - o oggi la tolleranza grafica nella carta topografica di base del Comune è ± 3 metri;
 - o in futuro, se sarà presentato anche per il progetto il rilevamento del lotto, il Comune potrà adottare come congruente tutto quello che non supererà l'errore di rilevamento di ± 10 centimetri.

Nella sperimentazione, per la fase "finale" dell'aggiornamento cartografico si è voluto verificare che il triangolo fiduciale del "MUDIC finale" possa essere lo stesso di quello già adottato nel "MUDIC progetto"; l'unica eccezione possibile potrà essere solo quando nell'intervallo di tempo tra "progetto" e "finale", mediamente due o tre anni, uno dei punti fiduciali è stato demolito od eliminato.

In maniera del tutto simile al capitolo precedente, l'esito dei controlli previsti sui file dei professionisti saranno inviati a questi sotto forma di documento PDF e nel caso di errori della tipologia e) f) g) h) i) allegando anche il file DXF con evidenziato (in rosso) i problemi riscontrati.

6. II MUDIC per trasformazioni di immobili esistenti

Nella sperimentazione il progetto di aggiornamento cartografico degli ampliamenti di immobili esistenti è simile al caso dei nuovi edifici salvo non si prevede di richiedere Punti Fiduciali, bensì due vertici (quando possibile anche tre) non modificati del perimetro dell'edificio da ampliare; ovvero di utilizzare la loro rappresentazione nel file cartografico fornito dal Comune (facciamo cioè riferimento al layer di edifici forniti nei DXF) oltre ai nuovi *layer* con la nuova sagoma degli edifici modificati. Di conseguenza, i controlli previsti ai punti f) ed h) diventano:

- f) **Correttezza dei dati geometrici dell'immobile:** i dati geometrici del professionista
 - o SI/NO - posizione delle geometrie del fabbricato oggetto di modifica rispetto all'originale; in caso di manomissione si è proposto di evidenziare (in rosso) la zona del lotto manomessa;
- h) **Coerenza con i riferimenti comunali:** SI/NO - i dati geometrici di competenza del professionista sono coerenti in quanto presenti due vertici dell'edificio non modificati nel progetto di ampliamento.

Nella sperimentazione in maniera del tutto simile alla istanza di titolo abilitativo, anche nel caso di MUDIC legato alla istanza di Agibilità a seguito di una modifica di un fabbricato esistente continua a valere quanto già descritto nel capitolo precedente con le stesse modalità previste per il primo inquadramento cartografico, ovvero:

- la richiesta dei due o tre vertici dell'edificio ampliato al posto dei Punti Fiduciali;
- i controlli effettuati sulle geometrie tramite i vertici anziché sui (non richiesti) punti fiduciali.

Nella circolare catastale 2/88, relativa alle procedure di aggiornamento cartografico, si prevede il non utilizzo dei punti fiduciali solo quando l'ampliamento dell'edificio è inferiore al 50% dell'esistente già in mappa. Nella sperimentazione per l'aggiornamento della carta tecnica, abbiamo ritenuto che si possano quasi sempre considerare i vertici dell'edificio non coinvolti nell'ampliamento.

7. Il contesto cartografico sperimentale

Inserimento dei Punti Fiduciali nel disegno di progetto:

- nella sperimentazione sono stati ri-usati progetti edilizi preesistenti che, pur contenendo la rappresentazione cartografica del lotto, non presentano alcun riferimento a Punti Fiduciali; pertanto, per simulare le condizioni future, abbiamo proiettato il lotto di ogni Progetto sulla mappa catastale e, dalla sovrapposizione con essa, abbiamo dedotto le relazioni geometriche tra Punti fiduciali e Progetto;

Proiezione del progetto vincolato ai minimi quadrati alle coordinate cartografiche BTU dei tre punti notevoli:

- nei tre casi della sperimentazione le differenze tra le distanze tra i Punti fiduciali misurate nei tre ambienti operativi [BTU], [Progetto, alias mappa catastale], [Finale, alias sul terreno, alias Pregeo] sono inferiori all'errore di graficismo della BTU [trattandosi di una scala 1:5.000 non super rigoroso, uguale a 3 metri]; quindi le differenze riscontrate sono davvero piccole in relazione alla rappresentazione alla scala 1:5.000; pertanto non abbiamo modificato la scala dei dati di aggiornamento ma semplicemente adattato manualmente le sovrapposizioni mantenendo equivalenti le piccole differenze quando l'oggetto di aggiornamento baricentrico rispetto ai Punti Fiduciali; oppure, quando l'oggetto di aggiornamento molto prossimo ad uno dei tre, facendo coincidere il disegno di aggiornamento sul Punto Fiduciale prossimo e orientandolo sugli altri due;

Differenze tra disegno di Progetto e disegno Finale inseriti in BTU:

- nei tre casi della sperimentazione le differenze tra i poligoni edificio da progetto e da rilevamento finale sono piccole e contenute nell'errore di graficismo; pertanto non si riscontrano differenze significative (a parte il caso voluto n°3); mentre se in futuro il RUE prescriverà di fare il rilevamento sul terreno del lotto prima di presentare il progetto, allora potremmo pensare di ridurre ampiamente il valore dell'errore di graficismo fino a una decina di centimetri [forse sarà un approfondimento che realizzeremo in una ulteriore sperimentazione];
- inoltre in futuro la sagoma dell'edificio descritto nel Progetto deriverà da procedure digitali in ambiente tipo CAD, quindi saranno disponibili più dettagli su riseghe e piccoli movimenti lungo il perimetro ed una sua accuratezza relativa tipica dei progetti edilizi (mediamente scala 1:50);

Uso di un Punto Fiduciale diverso tra georeferenziazione in BTU di Progetto e georeferenziazione in BTU di Finale:

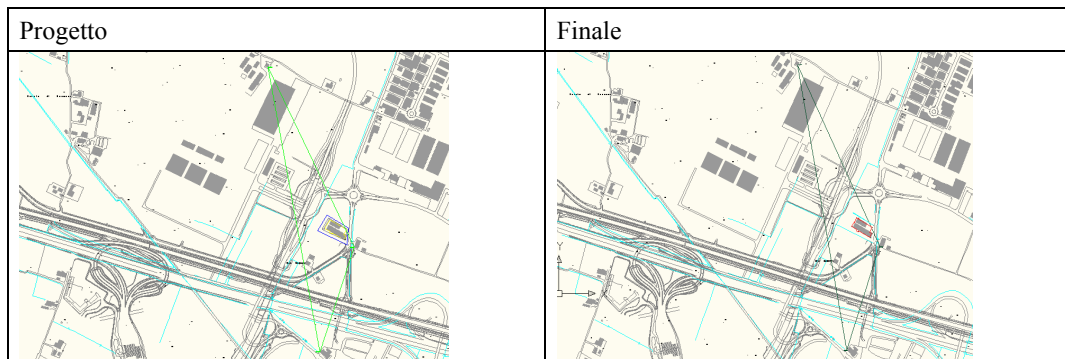
- nell'area della sperimentazione anche con le recenti ulteriori misure topografiche GPS in campagna non abbiamo notato "deformazioni locali" significative nella posizione dei Punti fiduciali afferenti l'area di sperimentazione; tutto ciò premesso, il "caso_2" non ha prodotto particolari diversità di inserimento nella BTU rispetto al "caso_1";

Viste le premesse generali, abbiamo ritenuto opportuno redigere i tre casi richiesti, nelle due fonti informative [Progetto e Finale] sullo stesso esempio di progetto [foglio 47, mappale 225, primo tecnico Barbieri Srl]; avevamo però in precedenza preparato altri due esempi che mettiamo in coda ai primi sei casi; per semplicità li abbiamo trattati solo nella modalità del "caso 1".

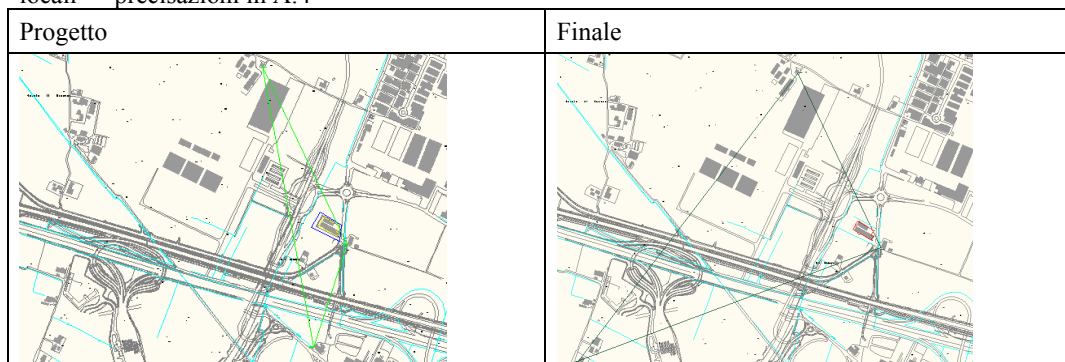
Al punto successivo alcune figure schematiche per i casi "BTU_sperimentazione" selezionati per la sperimentazione lo scorso 2 febbraio 2011.

8. La attività sperimentale svolta

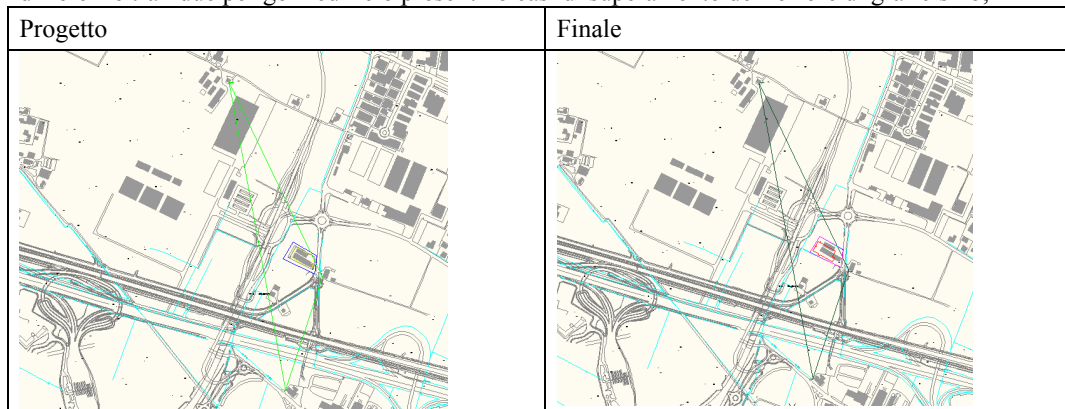
Modalità A - Edificio 1: utilizzati gli stessi punti fiduciali per il disegno di Progetto e Finale, con il disegno georeferenziato in modo corretto;



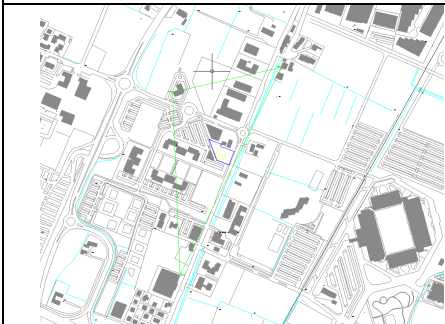
Modalità B - Edificio 1: utilizzato un punto fiduciale diverso per il disegno di Progetto e Finale, con il disegno georeferenziato in modo corretto; ciò nonostante non abbiamo notato “deformazioni locali” – precisazioni in A.4



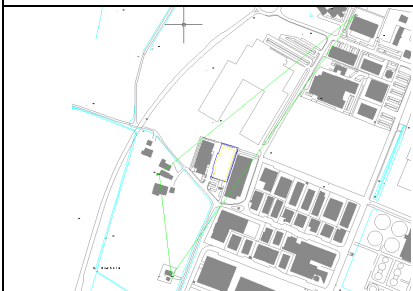
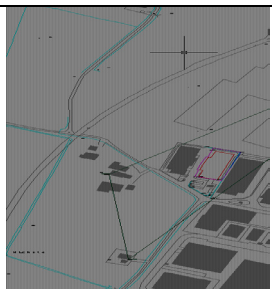
Modalità C - Edificio 1: Modalità: utilizzati gli stessi punti fiduciali per il disegno di Progetto e Finale, con uno dei due disegni georeferenziato in modo errato. Abbiamo spostato l’inserimento nella carta tecnica del disegno di Progetto in modo che nella sovrapposizione con il Finale le differenze tra i due poligoni edificio presentino casi di superamento dell’errore di graficismo;



Modalità A - Edificio 2

Progetto	Finale
	

Modalità A - Edificio 3

Progetto	Finale
	

9. Possibili sviluppi tecnici e normativi

In estrema sintesi si possono pensare **tre passi**, molto importanti per “dare gambe” al MUDIC senza intervenire sul piano della completa attuazione della legislazione nazionale vigente e disattesa:

- 1) la misura precisa e certificata delle coordinate dei Punti fiduciali (a livello regionale);
- 2) un accordo con l’Agenzia del Territorio per la “proiezione locale” sulle coordinate precise dei Punti fiduciali di mappe catastali e DB Topografico Comunale/Regionale (a livello di ogni Regione, viste le diverse caratteristiche del DB Topografico in ciascun territorio regionale);
- 3) la visualizzazione sovrapposta di mappe catastali e DB Topografico Comunale/Regionale, condivisa da Comuni, Regioni e Agenzia del Territorio.

È da sottolineare che, arrivati a questo livello prestazionale, l’elenco dei Fogli e mappali interessati ad un progetto di trasformazione edilizia forniranno anche la definizione precisa del lotto in ambito DB Topografico Comunale/Regionale.

Possiamo poi pensare anche a un **quarto passo** di miglioramento del MUDIC sperimentato a Reggio Emilia. Si può infatti ipotizzare che, in un contesto più maturo (di un “MUDE” regionale, ad esempio) potremmo chiedere al professionista di fornire oltre alla “copia integrale” del PREGEO anche le coordinate planimetriche dei punti fiduciali utilizzati espresse in ambito DB Topografico.

Nel caso di Reggio Emilia, per tutti i possibili sviluppi sopra elencati, si può fare temporaneamente riferimento alla BTU, in attesa della messa in esercizio del DB Topografico

Non ci possiamo nascondere che, viste le difficoltà incontrate dalla Commissione ministeriale (trilaterale) per l'attuazione del MUDE, il passo relativo all'accordo con l'Agenzia del Territorio potrebbe essere "bloccante", ma siamo fiduciosi nell'immaginare che l'Agenzia vorrà collaborare con Comuni e Regioni nella definizione di un accordo dai contenuti squisitamente tecnico-cartografici, certamente fattibile anche in un contesto di MUDE "non definito".

È evidente che i quattro step sopra elencati necessitano di alcune attività tecniche e che tali attività, implicando anche operazioni di campagna che richiedono risorse e tempi di realizzazione rilevanti.

È però da sottolineare che le operazioni di campagna potrebbero essere condotte in collaborazione tecnico-economica fra i diversi soggetti coinvolti. La PA (Comuni, Regioni e Agenzia del Territorio) da una parte e i professionisti (soprattutto i Geometri con il supporto organizzativo dei loro Collegi provinciali e della Fondazione regionale) insieme ai gestori delle stazioni permanenti coinvolti nel processo MUDIC, dall'altra, tenendo presente che questi ultimi sarebbero fortemente avvantaggiati, anche sul piano economico, nelle loro attività professionali di rilevamento "a regime".

Una attività condotta in collaborazione fra la PA e i Geometri garantirebbe, oltre che una qualità tecnica adeguata, anche una tempistica accettabile per operazioni di campagna che richiederebbero un massiccio dispiegamento di risorse umane e strumentali.

Oltre ad affrontare attività tecniche "topografico-informatiche" sopra evidenziate è parimenti necessario mettere in atto alcuni "aggiustamenti" normativi di livello regionale e, di conseguenza, anche a livello di regolamenti "urbanistico-edilizi" comunali.

A livello di legislazione regionale è in particolare necessario definire:

- I "contenuti cartografici" del "MUDE regionale" nelle diverse fasi del "procedimento edilizio"
- I contenuti cartografici dell'Anagrafe Comunale degli Immobili (ACI)
- Il ruolo dei professionisti nell'aggiornamento del DB Topografico comunale/regionale

A livello di regolamentazione comunale possiamo dire che in generale è necessario definire le strutture organizzative del Comune preposte alla "pratica MUDIC". È infatti a tutti noto che, nella quasi generalità dei Comuni, non operano "strutture cartografiche" propriamente intese. I Comuni, peraltro, non hanno, al momento, alcuna funzione cartografica se si esclude quella già citata, ad oggi "virtuale", definita dal DPR 112/1998 relativa alle funzioni catastali, comprese ovviamente quelle relative all'aggiornamento delle mappe.

In questo contesto oggi la "pratica edilizia" definita nei regolamenti comunali non ha quasi mai al suo interno, sia in fase di presentazione della pratica sia in fase di conclusione dei lavori, alcun contenuto cartografico correttamente inteso. Il regolamento comunale dovrà quindi prevedere, nel contesto normativo regionale sopra delineato, un flusso di dati cartografici nell'ambito delle pratiche edilizie e, di conseguenza, occorrerà poi che si identifichi nell'organizzazione una struttura con "competenze cartografiche".

10. Conclusioni

Dal punto di vista operativo si ritiene che la procedura qui suggerita non crei ai professionisti particolari complessità operative nella redazione del progetto edilizio; inoltre frequentemente già ora essi realizzano in fase di predisposizione del progetto edilizio una verifica geomatica di rilevamento sul terreno della consistenza del lotto.

Dal punto di vista tecnico, considerato che nei rilevamenti geomatici di aggiornamento i professionisti nel medio periodo adotteranno prevalentemente procedure NRTK che determinano coordinate riferite primariamente al frame italiano dato dalla RDN, risulta opportuno continuare la

sperimentazione per individuare modalità idonee ad inquadrare nello stesso frame i punti fiduciali catastali e per poi riadattarvi le cartografie comunali e catastali.

Dal punto di vista organizzativo invece, per rendere operativo il MUDIC a normativa MUDE nazionale “ferma”, le attività che sarebbe necessario mettere in atto appaiono abordabili, anche dal punto di vista economico e temporale.

È da notare inoltre che, per perseguire gli scopi di semplificazione amministrativa previsti dal MUDE, potrebbe essere necessario anticipare la fase di Accatastamento rispetto quella della Fine Lavori ed includere in questa – oltre al DOCFA – anche un PREGEO che può così essere considerato definitivo. Per fare questo sarà probabilmente necessario modificare questi adempimenti per l’Agenzia del Territorio anche tecnologicamente per fare sì che il PREGEO possa contenere anche gli opportuni aggiornamenti cartografici in maniera coerente con gli aggiornamenti cartografici comunali, permettendo così ai Comuni di effettuare una unica verifica di classamento sui DOCFA ed aggiornamento cartografico tramite i PREGEO.

Il risultato sarebbe straordinario, in quanto, come ricordato, avremmo - finalmente - la possibilità di “integrare” le mappe catastali con il DB Topografico e tutte le trasformazioni edilizie del territorio potrebbero essere meglio progettate, eseguite e monitorate.

E’ evidente a tutti che occorrerà la volontà “positiva” dei molti attori coinvolti, ma il MUDIC è a nostro avviso un piccolo ma obbligato passaggio per la modernizzazione della “rappresentazione” cartografica del Paese.

Riferimenti Bibliografici

- Benati F, Artioli GP, Mandrile L, Aziani E, Linardi G (2010), “Studio di fattibilità MUDE versione beta”, Progetto ELICAT
- Benati F, Artioli GP, Gavaruzzi R, Piccinini L, Poli S, Guareschi E, Montanari M, Morani M (2011), “Studio di fattibilità MUDIC”, Progetto FEDFIS
- ELICAT-ELIFIS-FEDFIS: www.eli.catasto-fiscalita.anci.it
- SIGMATER: www.sigmater.it
- Legge 10 gennaio 2006 n. 80 - <http://www.parlamento.it/parlam/leggi/060801.htm>
- Decreto Legge 7 marzo 2005 n. 82 e successive modifiche - <http://www.digitpa.gov.it/amministrazione-digitale/CAD-testo-vigente>
- D.P.R. 380/2001 http://www.legislazionetecnica.it/dett_blt.asp?id_dett=1716
- circolare catastale 2/88
<http://def.finanze.it/DocTribFrontend/getPrassiDetail.do?id={684E5970-5B3F-4401-8F08-83CB97D9FD39}>
- Data Base Topografici “a grande scala” (DBT)
1- <http://www.digitpa.gov.it/altre-attivita/C3%A0/specifiche-tecniche-approvate-dal-comitato>
2- http://www.centrointerregionale-gis.it/CNIPA/Comitato_dati_territoriali.asp

Primi risultati delle sperimentazioni del CISIS-CPSG volte alla realizzazione dei DBT Regionali secondo le Specifiche di Contenuto per i DB Geotopografici: utilizzo degli strumenti GeoUML per la realizzazione ex-novo e per l'adeguamento dei DBT esistenti

Massimo Attias, Leonardo Donnaloia, Claudio Mazzi, Pierpaolo Milan

CISIS, Centro Interregionale per i sistemi informatici, geografici e statistici, Via Piemonte, 39
00187 ROMA, Tel. 06 4815595, e-mail: m.attias@cisiss.it, a.rotundo@cisiss.it

Nell'ambito del progetto denominato "Applicazione degli strumenti GeoUML nel processo di produzione del Database geotopografico", il gruppo di supporto del CISIS-CPSG è stato costituito con il preciso scopo di fornire supporto, alle Regioni ed alle Province Autonome partecipanti al progetto, nell'applicazione delle metodologie e degli strumenti GeoUML (GeoUML Methodology e GeoUML Tools), per la realizzazione dei Database geotopografici (di seguito DBT) partendo o da nuove produzioni o recuperando dati esistenti.

Parallelamente il gruppo di supporto si occupa di promuovere presso le regioni l'adozione delle nuove specifiche tecniche per i DBT¹ fornendo criteri ed indicazioni puntuali per la migrazione dalla specifica precedentemente adottata.

Gli strumenti GeoUML, realizzati dal Politecnico di Milano² (PoliMI) per conto del CISIS-CPSG, sono destinati a coprire le necessità degli Enti sia per il processo di produzione dei dati territoriali, sia per la gestione e l'aggiornamento di tali dati all'interno delle proprie strutture.

Tutti gli strumenti fanno riferimento al linguaggio di modellazione GeoUML (Geographic Unified Modeling Language) e sono stati progettati in modo da garantire l'implementazione del modello mediante gli strumenti tecnologici attualmente disponibili, l'aderenza agli standard ISO19100 e l'indipendenza dagli strumenti GIS adottati.

I principali strumenti sviluppati nell'ambito del progetto sono il **GeoUML Catalogue** ed il **Validator**; entrambi operano sulla base della definizione della **Specifica di contenuto**, o Schema Concettuale, composta da un insieme di costrutti suddivisi in due categorie:

- gli Elementi Informativi, che costituiscono tutti i componenti utilizzabili per definire la struttura dei contenuti informativi della specifica; in particolare si tratta dei seguenti costrutti: Classe, attributo (non geometrico), cardinalità, dominio enumerato, dominio gerarchico, associazione, ereditarietà, componente spaziale, attributo della componente spaziale, chiave primaria, strato topologico;
- i Vincoli di Integrità, che si applicano agli elementi informativi e definiscono le proprietà che i dati dovranno soddisfare; sono state previste due tipologie di vincoli di integrità spaziale: i vincoli topologici e i vincoli di composizione.

Per mezzo del GeoUML Catalogue è possibile definire in modo formale e quindi processabile automaticamente da strumenti software, i singoli elementi che costituiscono la Specifica di Contenuto, nonché di modificarla e di adattarla alle specifiche esigenze dell'Ente (es. aggiunta di

¹ Le nuove specifiche tecniche per i DBT sono state sviluppate nell'ambito dell'attività del Gdl 2 "Dati Geotopografici" del Comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle P.A. che le ha approvate in data 27 Aprile 2010. A partire da quella data è stato predisposto un apposito DPCM, tutt'ora in attesa di promulgazione.

² SpatialDBgroup del Dipartimento DEI

nuove Classi, di nuovi Attributi, di particolari istanze di Attributi tipiche della Regione, ecc.). Una volta definito e personalizzato la Specifica, il GeoUML Catalogue può generare i modelli fisici di struttura dati che si intende utilizzare per la produzione e la gestione dei dati territoriali. Si può inoltre esportare la specifica in linguaggio naturale (in formato RTF), per allegarla ad un capitolato in modo che le ditte partecipanti ad un appalto possano leggerla ed analizzarla.

Il Validator consente di verificare se le informazioni territoriali contenute nei dati prodotti secondo la Specifica di Contenuto nel modello implementativo prescelto, rispettano le regole ed i vincoli in essa definiti, producendo quindi dei report che indicano le eventuali incongruenze ed errori e che consentono di effettuare correzioni puntuali dei contenuti delle strutture dati.

La figura seguente schematizza il ruolo e la funzione degli strumenti GeoUML iniziando dal Catalogue che, partendo dalla definizione della specifica di contenuto (SCS), genera sia la struttura dati prescelta per la produzione (Modello implementativo Shape-flat) che quella scelta per la gestione (Modelli implementativi SQL: PostGIS, Oracle Spatial) fino a prevedere la possibilità di costituire, partendo dai DBT regionali, un DBT interregionale che contenga le informazioni previste nel National Core (NC).

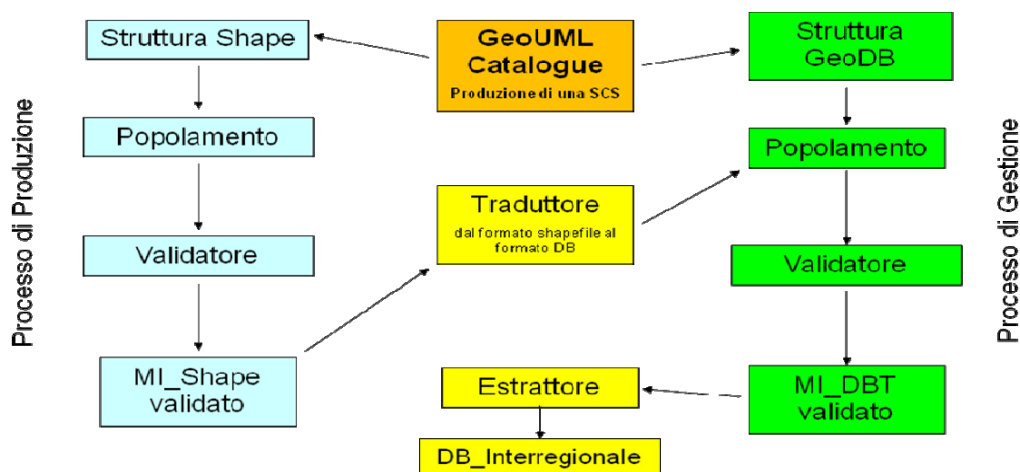


Figura 1 – Schematizzazione del funzionamento degli strumenti GeoUML.

Generalizzando, le sperimentazioni in oggetto hanno come elemento comune l'utilizzazione, con modalità operative differenti, della GeoUML Methodology per la realizzazione di DBT conformi e coerenti alle Specifiche Nazionali di riferimento. Il punto di partenza comune a tutte le regioni aderenti al progetto è stata la consapevolezza della complessità dello strumento DBT, sia con riferimento alla produzione dei dati, sia con riferimento all'implementazione fisica della struttura nei diversi ambienti di sviluppo in uso presso gli uffici regionali deputati alla produzione e alla gestione dei dati territoriali. È tale consapevolezza che ha determinato l'avvio delle sperimentazioni in oggetto; in sintesi, l'esigenza prevalente nelle regioni è rappresentata dalla necessità di essere supportate in fase di realizzazione dei propri DBT da strumenti automatizzati che facilitino sia la gestione della specifica, sia la produzione/validazione dei dati territoriali di riferimento. Con tali premesse, l'obiettivo principale del CISIS-CPSG è stato quello di mettere a fattor comune le esigenze regionali con le potenzialità offerte dalla GeoUML Methodology; in particolare, tale obiettivo è stato perseguito mediando tra le istanze territoriali (regioni) e quelle prettamente informatiche (PoliMI), producendo un sostegno multidisciplinare che necessariamente deve essere mantenuto, almeno in questa fase iniziale, a livello centrale.

Con tali premesse, le sperimentazioni avviate nella prima metà del 2011 (alcune delle quali ancora in corso) utilizzano la GeoUML Methodology per il superamento delle criticità di progetto con modalità operative differenti, quali:

1. Testare la procedura di produzione validazione dati e DBT utilizzando risorse interne (in house);
2. Verificare la procedura di produzione validazione dati e DBT affidando all'esterno la loro realizzazione;
3. Testare la procedura per la produzione di allegati tecnici di gara.

Entrando nel merito delle esperienze svolte (o in corso), le prime regioni coinvolte nel progetto sono le seguenti:

- Regione Lazio – aderisce alla modalità operativa indicata al punto 1, in particolare la fase di test avviata su un'area campione della regione Lazio, è funzionale alla produzione dettagliata e “consapevole” di allegati tecnici e procedure utili ad una successiva gara pubblica per l'estensione all'intero territorio regionale della metodologia;
- Regione Veneto – aderisce alla modalità operativa indicata al punto 2, delegando ad una ditta esterna l'applicazione della metodologia per la parte produttiva;
- Regione Piemonte – aderisce alla modalità operativa indicata al punto 2, delegando ad una ditta esterna l'applicazione della metodologia, con riferimento ad un approccio topologico del DBT;
- Regione Umbria – aderisce alla modalità operativa indicata al punto 3, personalizzando la specifica di riferimento e producendo gli allegati tecnici utili ad una successiva gara per la realizzazione del DBT regionale.

Prima di entrare nel merito tecnico di ogni singolo progetto, è opportuno evidenziare i soggetti coinvolti, a vario titolo, nelle sperimentazioni, evidenziandone i ruoli coperti da ciascuno.

Il gruppo CISIS, oltre a gestire la parte amministrativa, ha assunto un ruolo di coordinamento tecnico del progetto, realizzando il punto di contatto tra le esigenze regionali e l'implementazione delle stesse nella GeoUML Methodology da parte del PoliMI. Le istanze rappresentate dal CISIS vanno, ovviamente, oltre la risoluzione della singola criticità regionale, guardando, in prospettiva, all'estensione sistematica della procedura a tutte le Regioni e Province Autonome italiane; in altre parole, le sperimentazioni in oggetto rappresentano un test applicativo necessario alla diffusione degli strumenti prodotti nell'ambito della convenzione con il PoliMI. Lo SpatialDBgroup del PoliMI, rappresenta la componente progettuale del modello concettuale e della strumentazione informatica in grado di gestirlo; in particolare, continuando il lavoro svolto nella definizione della GeoUML Methodology, ha svolto il ruolo di progettazione ed applicazione pratica della metodologia ideata. Si tratta della prima applicazione pratica e sistematica delle componenti software previste nell'ambito della GeoUML Methodology, soprattutto con riferimento al GeoUML Validator. Il principale obiettivo dello SpatialDBgroup è quello di testare la metodologia, prima della definitiva diffusione delle componenti software agli enti interessati.

Le regioni rappresentano “l'utilizzatore finale”, in altre parole hanno il ruolo di indirizzare la metodologia sugli aspetti concreti della progettazione e gestione del sistema nei propri ambienti di sviluppo, considerando anche il lato economico del progetto. Sempre con riferimento alle regioni, è opportuno evidenziare l'attenzione mostrata con riferimento alla possibilità di personalizzare (in conformità e coerenza rispetto allo standard di riferimento) la Specifica di Contenuto Nazionale in considerazione delle peculiarità e delle esigenze del territorio di competenza. In particolare, le regioni coinvolte hanno definito un proprio “Regional Core” (di cui il National Core rappresenta un sotto-insieme) ampliando i contenuti della specifica nazionale.

Di seguito, una descrizione sintetica dei singoli progetti regionali, con riferimento alle produzioni di DBT ex-novo.

Regione Lazio

Senza entrare nel merito della gestione amministrativa del progetto, Regione Lazio ha attivato, per un periodo di circa tre mesi, due laboratori, trattando separatamente la produzione dati e l'implementazione fisica del DBT nell'ambiente di sviluppo regionale. In particolare i laboratori, pur mantenendo separate le proprie funzioni, hanno lavorato in stretto contatto per l'intera durata del progetto avendo come riferimento comune la Specifica Regionale gestita nel GeoUML Catalogue.

In sintesi, le funzioni svolte dai suddetti laboratori, fanno riferimento alle seguenti attività.

1. Laboratorio Dati – ha prodotto, per conversione della CTRN 5k vettoriale preesistente, un set di dati relativi all'area campione del Comune di Cerveteri in conformità al modello implementativo Shape-flat definito dallo SpatialDBgroup del PoliMI. Più in dettaglio, nell'arco temporale di attività, sono state prodotte le seguenti azioni:
 - analisi approfondita del dato in input (CTRN 5k vettoriale);
 - adeguamento del GeoUML Catalogue e definizione di una specifica di contenuto regionale;
 - produzione automatica della Specifica Regionale in linguaggio naturale, del mapping fisico in linguaggio naturale nella struttura Shape-flat, Shapefile/Classe vuote e relative tabelle di dominio;
 - conversione della CTRN 5k vettoriale in file intermedi (detti "grezzi");
 - popolamento sistematico degli Shapefile/Classe vuoti con i dati "grezzi" indicati al punto precedente;
 - integrazione della Specifica Regionale con riferimento a contenuti utili all'implementazione di servizi specifici (es. concessioni demaniali con finalità turistico ricreative, permessi di ricerca per l'energia geotermica, ecc.);
 - definizione di servizi ad hoc, con riferimento a procedure amministrative legate ai dati territoriali;
 - invio dei dati prodotti allo SpatialDBgroup e validazione degli stessi attraverso il geoUML Validator;
 - eventuali correzioni (report di validazione) e rinvio dei dati.
2. Laboratorio GeoDB – ha prodotto uno studio di fattibilità con riferimento all'implementazione fisica del DBT regionale in precisi ambienti di sviluppo. In particolare, l'approccio seguito ha considerato sia l'ambiente di sviluppo proprietario attualmente in uso in Regione Lazio (ORACLE monogeometria + ESRI), sia la possibilità di utilizzare un ambiente di sviluppo open-source (PostGIS monogeometria). Entrambi le analisi, sono state sviluppate utilizzando il generatore di schema proprio del GeoUML Catalogue.

Il dettaglio delle conclusioni della sperimentazione Regione Lazio, saranno presentati formalmente in un seminario organizzato ad hoc dal CISIS. In questa sede è opportuno evidenziare che i risultati, nonostante le numerose difficoltà accorse, sono stati positivi soprattutto con riferimento alla produzione/validazione dei dati, generando due ricadute immediate, quali:

- possibilità di testare il GeoUML Validator, correggendo alcune funzionalità dello stesso in corso d'opera;
- produrre un DBT (anche se su una porzione limitata del territorio regionale) completo ed integrato.

In particolare Regione Lazio ha potuto valutare la risoluzione di due criticità, quali: lo sviluppo di servizi territoriali associati al DBT già in fase di realizzazione del sistema, stima di massima sui costi di realizzazione.

Regione Veneto

La Regione Veneto ha proceduto alla produzione e alla validazione del DBT affidandone all'esterno la realizzazione estendendo un appalto già in corso relativo a parte del territorio della Provincia di

Vicenza. Il DBT in questione è stato realizzato ex-novo da un rilievo fotogrammetrico finalizzato alla produzione di dati alla scala 1:5000.

L'attività svolta preliminarmente alla produzione del DBT ha riguardato la predisposizione, mediante il GeoUML Catalogue, della Specifica di Contenuto inserendo tutti i contenuti previsti dal National Core 1:5000 (NC5) della Specifica di Contenuto nazionale definita nel "Catalogo dei Dati Territoriali" approvata dal Comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle Pubbliche Amministrazioni.

Successivamente, si è provveduto allo svolgimento delle seguenti azioni:

- produzione del mapping fisico della Specifica Concettuale e quindi nel modello implementativo Shape_flat, il tutto sempre mediante il GeoUML Catalogue;
- popolamento sistematico degli Shapefile vuoti con i dati provenienti dal nuovo rilievo;
- validazione dei dati prodotti attraverso il GeoUML Validator;
- produzione dei report di errore (report di validazione) e rinvio dei dati fino al conseguimento del prodotto conforme alla Specifica di Contenuto definita.

Tale processo ha riguardato inizialmente un'area di 1200 ha ca. scelta appositamente in modo che fosse un campione rappresentativo degli oggetti territoriali presenti nel lotto oggetto dell'appalto. Ciò ha permesso la realizzazione di un prototipo in tempi brevi che ha consentito di sperimentare efficacemente il processo produttivo, dal rilievo all'implementazione, così da ottimizzarlo prima di estenderlo alla produzione dell'intero lotto.

Il DBT prodotto all'interno del processo descritto, gestito mediante un'attenta supervisione delle varie fasi operata congiuntamente dai tecnici del CISIS, dello SpatialDBgroup del PoliMI, della ditta incaricata e della Regione Veneto, ha permesso di raccogliere indicazioni operative molto utili ai fini della sperimentazione condotta.

In particolare si è potuto mettere a punto gli strumenti software della GeoUML Methodology (il GeoUMLCatalogue destinato alla produzione e gestione della Specifica Concettuale oltre che alla produzione del mapping fisico, e il GeoUML Validator finalizzato alla validazione intrinseca dei dati implementati).

Inoltre sono emerse indicazioni puntuali utili alla formulazione di proposte di integrazione e/o modifica della Specifica di Contenuto sia per gli aspetti relativi ai contenuti informativi sia per quanto concerne i vincoli di integrità spaziale.

Regione Umbria

Cogliendo l'occasione dell'imminente uscita di una gara per la produzione del DBT regionale (con riferimento ad una porzione del territorio regionale attiguo all'asta del Fiume Tevere), la Regione Umbria ha aderito alla GeoUML Methodology per la produzione degli allegati tecnici di riferimento. In particolare, in questa fase iniziale, la GeoUML Methodology è stata applicata limitatamente alla componente GeoUML Catalogue, in vista di una successiva completa applicazione della stessa in fase di produzione dei dati da parte della ditta aggiudicataria. In altre parole, la componente GeoUML Validator sarà utilizzata in fase di direzione lavori e collaudo del DBT in oggetto.

Anche con riferimento alla Regione Umbria, la sperimentazione in oggetto costituisce un esempio innovativo a livello nazionale con riferimento alla produzione di DBT; si tratta, infatti, del primo caso in cui la GeoUML Methodology è indicata esplicitamente nei capitolati di gara.

Regione Piemonte

La sperimentazione del Piemonte è stata curata dalla Regione stessa tramite il supporto tecnico fornito dal CSI Piemonte. La peculiarità di questa sperimentazione sta nell'adozione di un Modello implementativo che utilizza una strutturazione topologica delle geometrie a differenza del Modello implementativo Shape-flat che utilizza una rappresentazione della geometria ad oggetti; il Modello implementativo Shape-topo si basa sull'idea di rappresentare le componenti spaziali delle classi in

particolari strutture dette Insiemi Topologici ognuno dei quali viene a sua volta rappresentato da un certo numero di Shape file.

La sperimentazione si svolge sempre all'interno del quadro generale gestito nell'ambito dell'applicazione delle metodologie e degli strumenti GeoUML (GeoUML Methodology e GeoUML Tools).

Attualmente la regione Piemonte ha in corso di realizzazione il DBT, su Modello implementativo Shape-topo, sul territorio di un piccolo comune.

Terminata la fase di supporto alle regioni che applicano la GeoUML Methodology per la realizzazione di DBT ex-novo, il CISIS avvierà le azioni necessarie ad assistere le regioni che già dispongono di un proprio DBT realizzato secondo le Specifiche IntesaGIS 2004 e 2006, quindi, non conformi alla Specifica Nazionale approvata ad aprile 2010 dal Comitato regole tecniche sui dati territoriali della Pubblica Amministrazione. Tale attività, necessariamente ritardata al fine di testare praticamente le componenti software previste dalla GeoUML Methodology, riguarda le seguenti regioni:

- Regione Abruzzo, che ha ultimato la conversione della propria CTRN in scala 1:10.000 in un DBT secondo le specifiche 2004, e che intende realizzare un prototipo di adeguamento alle Specifiche 2010 per valutare le risorse necessarie all'adeguamento dell'intero DBT;
- Regione Autonoma della Sardegna, che dispone di un DBT realizzato secondo le specifiche 2006 e che intende realizzare un prototipo multiscala, conforme alle Specifiche 2010, integrando il DBT Regionale in scala 1:10.000 con i DBT Comunali, già esistenti o in corso di ultimazione, alle scale di 1:2.000 o di 1:1.000.

Sviluppi futuri

Le Regioni e le Province Autonome che utilizzano o intendono utilizzare gli strumenti GeoUML per la produzione e la gestione dei propri dati territoriali, costituiranno una base comune utile a integrare ed armonizzare le proprie informazioni con quelle delle Regioni confinanti. Inoltre, la partecipazione ad un progetto comune, basato su strumenti "aperti" come quelli GeoUML, fa sì che, qualora una Regione abbia la necessità di inserire un nuovo tema all'interno del proprio DBT, la logica di tale inserimento possa essere discussa con le altre Regioni ed inserita nelle Specifiche condivise; in questo modo tutte avranno la possibilità di inserire il nuovo tema tra le proprie informazioni territoriali secondo uno schema condiviso, evitando che ogni Ente gestisca le informazioni relative a tale tema arbitrariamente, rendendone così molto complesso (talvolta impossibile) la gestione su scala sovranregionale o nazionale.

La produzione o l'adeguamento delle informazioni secondo uno schema condiviso, ed in particolare secondo le Specifiche Nazionali, che prevedono come obbligatorie tutte le classi di oggetti facenti parte del National Core, fa sì che la realizzazione di un DBT Nazionale sia enormemente più facile che in passato. In particolare, le Regioni che condividono la GeoUML Methodology ed utilizzano gli strumenti GeoUML, produrranno automaticamente tutte le informazioni appartenenti al National Core, che potranno essere automaticamente estratte ed esportate verso il DBT Nazionale.

A questo proposito, tra le attività del Gruppo di Supporto CISIS-CPSG previste per il 2012, è prevista l'analisi e la valutazione delle opzioni per la realizzazione e la gestione del DBT Interregionale.

Informazione geografica, Regioni e metadati: il contributo del CISIS nell'implementazione del Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali

Massimo Attias, Antonio Rotundo

CISIS - Centro Interregionale per i sistemi informatici, geografici e statistici - Via Piemonte, 39
00187 Roma, Tel. 06 4815595, e-mail: m.attias@cisis.it, a.rotundo@cisis.it

Riassunto

Le Regioni e le Province Autonome italiane stanno mettendo in campo, ormai da anni, un impegno considerevole, sia in termini economici che tecnologici che di risorse umane, per rendere conoscibile e disponibile, attraverso i servizi di ricerca basati sui metadati, il grande patrimonio informativo relativo ai dati territoriali di propria competenza.

Nonostante ciò, però, la situazione delle varie realtà regionali rimane ancora alquanto disomogenea. Per questo, per superare le criticità riscontrate, il CISIS, attraverso il Comitato Permanente Sistemi Geografici, nell'ambito del Piano di Attività 2010/2011, ha portato avanti una specifica linea di azione volta a fornire un adeguato supporto per raggiungere un omogeneo livello di partecipazione al popolamento del RNDT, non appena il relativo Regolamento sarà emanato e diventerà così cogente, e, quindi, addivenire alla corretta applicazione delle norme comunitarie e nazionali in tema di metadati dell'informazione geografica.

Abstract

The Italian Regions and Autonomous Provinces are putting on the field, for years, a substantial effort, both in terms of economics and technology and human resources, in order to make known and available, through discovery services based on metadata, the own great wealth of spatial data.

Despite this, however, the situation of the various bodies is still very uneven. For this, CISIS, through the Permanent Committee of Geographical Systems, within the Activity Plan 2010/2011, has carried out a specific course of action in order to provide an adequate support to achieve a homogeneous level of participation to the project of RNDT, as soon as its Regulation will be issued and will become mandatory, and, therefore, to reach the correct application of European and national rules of geographic information metadata.

ooo

Nel campo dell'informazione geografica, il ruolo delle Regioni e delle Province Autonome appare essere sempre più strategico, attese le loro competenze in tema di governo e gestione del territorio e, soprattutto, in virtù delle conseguenti molteplici iniziative e dei consistenti impegni di risorse economiche che, ormai da anni, stanno assumendo, in particolare nell'implementazione di sistemi di gestione dei dati territoriali e relativi servizi per rendere il patrimonio informativo dei dati territoriali accessibile e disponibile.

Tale impegno ha come quadro di riferimento le iniziative comunitarie e nazionali (INSPIRE e Comitato ex art. 59 del Codice dell'Amministrazione Digitale, in primis), finalizzate alla

realizzazione di un'infrastruttura dei dati territoriali tesa a far superare i problemi relativi alla disponibilità, alla qualità, all'organizzazione, all'accessibilità e alla condivisione delle informazioni geografiche.

Nel contesto delineato, le Regioni hanno offerto un contributo fattivo nell'implementazione del progetto del Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali (RNDT), istituito con l'art. 59 del CAD presso DigitPA, in riferimento al quale esse hanno partecipato alla definizione delle regole tecniche (in quanto componenti del già citato Comitato) e alla fase di sperimentazione del funzionamento dell'applicazione software che DigitPA ha, nel frattempo, sviluppato.

Per questo, nell'ambito del Piano di Attività 2010/2011 "*Applicazione degli strumenti GeoUML nel processo di produzione del Database geotopografico*", avviato dal CISIS, attraverso il Comitato Permanente Sistemi Geografici, e a cui hanno aderito 13 Regioni oltre alla Provincia Autonoma di Trento, una specifica linea di azione ha riguardato proprio l'implementazione del Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali (RNDT). Nonostante l'oggetto circoscritto del Piano, l'attività relativa al Repertorio non è stata riferita alla sola documentazione dei DB Geotopografici, ma ha riguardato tutte le tipologie di dati territoriali di cui all'allegato 1 dello schema di Regolamento del Repertorio stesso.

È stata, innanzitutto, effettuata una rilevazione, prodromica alle attività di supporto del CISIS inquadrata nella linea di azione di cui sopra, tesa a definire lo stato dell'arte sulla disponibilità, l'organizzazione e le caratteristiche dei metadati nelle infrastrutture regionali e, quindi, calibrare le stesse attività di supporto in modo da rendere più omogeneo possibile il livello di partecipazione delle Regioni e Province Autonome al RNDT. Per tale motivo, la rilevazione e il supporto offerto dal CISIS sono stati estesi anche a quegli Enti che non hanno aderito al Piano di attività.

L'analisi è stata rivolta a ottenere informazioni relative a:

- standard utilizzati nel trattamento dei metadati;
- strumenti applicativi implementati e/o resi disponibili;
- conoscenza e utilizzo dei servizi sviluppati da DigitPA all'interno dell'applicativo del RNDT;
- rappresentazione delle esigenze specifiche di ciascun Ente e delle proposte operative per rispondere a tali esigenze.

Le risultanze dell'analisi svolta sono state descritte nel documento "*Informazione geografica: Regioni italiane e metadati – STATE OF PLAY 2010*", scaricabile dal sito¹ del Comitato Permanente Sistemi Geografici del CISIS.

In riferimento alle informazioni raccolte, nella tabella 1 viene rappresentato l'utilizzo degli Standard relativi all'informazione geografica da parte delle Regioni.

Gli Standard a cui si è fatto riferimento sono:

- per quanto riguarda il contenuto, ISO 19115 (*Geography Information – Metadata*), ISO 19119 (*Geography Information – Services*), ISO 15836 (*Information and documentation – The Dublin Core metadata element set*);
- per quanto riguarda l'encoding ISO TS 19139 (*Geography Information – Metadata – XML Schema Implementation*);
- per quanto riguarda i servizi di catalogo OGC Catalogue Services Specification (*ISO19115/ISO19119 Application Profile for CSW 2.0*).

¹ www.centrointerregionale-gis.it

Come si evince dalla tabella, gli Standard sono utilizzati in modo disomogeneo nella produzione e gestione dei metadati all'interno delle infrastrutture regionali dei dati territoriali.

Alcune Regioni utilizzano, per esigenze specifiche, anche altri Standard in aggiunta a quelli citati.

REGIONI	STANDARD	Contenuto			Encoding	Servizi di catalogo	Altro
		ISO 19115	ISO 19119	Dublin Core	ISO 19139	OGC CS-W	
Abruzzo		✓	✓	-	✓	✓	-
Basilicata		✓	✓	-	✓	✓	Z39.50, ISO 23950
Calabria		✓	-	-	✓	-	-
Campania		✓	✓	-	✓	-	-
Emilia Romagna		✓	✓	✓	✓	in test	-
Friuli Venezia Giulia		✓	✓	-	-	✓	-
Lazio		-	✓	-	✓	✓	-
Liguria		✓	✓	-	✓	-	-
Lombardia		✓	-	-	✓	-	-
Marche		-	-	-	-	-	-
Piemonte		✓	-	✓	-	-	-
Puglia		✓	✓	-	✓	-	-
Sardegna		✓	✓	✓	✓	-	ISO 19110
Sicilia		-	-	-	-	-	-
Toscana		✓	-	-	✓	✓	ISO 19110
Umbria		✓	-	-	✓	✓	-
Valle D'Aosta		✓	-	-	✓	-	-
Veneto		✓	✓	-	✓	✓	-
P.A. Trento		✓	✓	✓	✓	✓	OAI-PMH, Z39.50, GeoRSS server, GEO OpenSearch server, WebDAV harvestingz

Tabella 1 – Regioni e Standard.

Quanto al RNDT, la tabella 2 riporta le informazioni circa la conoscenza e l'utilizzo, da parte delle Regioni, dei servizi disponibili all'interno dell'applicazione del RNDT e la partecipazione delle stesse alla fase di sperimentazione.

DigitPA ha, infatti, sviluppato un applicativo con tecnologia open-source che offre alcuni servizi necessari per corrispondere a quanto indicato dalle norme relative ai metadati, avviando anche una fase di sperimentazione per testare il funzionamento organizzativo e tecnologico del sistema e, nel contempo, avviare il popolamento del Repertorio.

A tale fase hanno partecipato anche alcune Regioni.

L'applicativo sviluppato, secondo quanto indicato nell'allegato 2 allo schema di Regolamento, comprende:

- un editor, strumento per l'acquisizione e l'aggiornamento dei metadati, che, attraverso la compilazione di "form" guidate, crea automaticamente un file XML conforme agli schemi XSD;
- servizi di validazione, che verificano la conformità dei file XML agli schemi XSD;

- servizi di trasmissione, che permettono di trasmettere a DigitPA, per la successiva pubblicazione, i file XML di metadati, previa verifica di conformità agli schemi XSD e alle indicazioni contenute nel decreto.

REGIONI	RNDT	Conoscenza	Utilizzo servizi			Partecipazione sperimentazione
			Navigazione e ricerca	Editor	Validazione e upload	
Abruzzo		✓	✓	✓	✓	✓
Basilicata		✓	-	-	-	-
Calabria		✓	-	-	-	✓
Campania		-	-	-	-	-
Emilia Romagna		✓	-	-	-	✓
Friuli V. Giulia		-	-	-	-	-
Lazio		✓	-	-	-	-
Liguria		✓	-	-	-	-
Lombardia		✓	-	-	✓	✓
Marche		✓	-	-	-	-
Piemonte		✓	✓	-	✓	✓
Puglia		✓	✓	✓	✓	✓
Sardegna		✓	✓	-	✓	✓
Sicilia		-	-	-	-	-
Toscana		✓	-	✓	-	✓
Umbria		✓	✓	✓	✓	✓
Valle D'Aosta		-	-	-	-	-
Veneto		✓	-	-	-	-
P.A. Trento		✓	-	-	-	-

Tabella 2 – Regioni e RNDT.

Nonostante quanto rappresentato, tuttavia, la situazione che è risultata è ancora, come ci si poteva aspettare, alquanto disomogenea. Tale disomogeneità si riscontra nei sistemi applicativi adottati, nel livello tecnologico raggiunto, nella rappresentazione dell'informazione resa disponibile, sia per quanto riguarda l'interfaccia dei servizi implementati che il contenuto, sebbene ci sia una comune dichiarazione di conformità agli Standard, alle norme e alle regole tecniche vigenti o in corso di emanazione.

Proprio per superare dette criticità, soprattutto nella direzione del raggiungimento di un comparabile livello di partecipazione delle Regioni all'implementazione del RNDT e, quindi, nella corretta applicazione delle norme comunitarie e nazionali in tema di metadati, è risultata importante l'azione intrapresa dal CISIS, avvalorata dal fatto che è avvenuta in una fase di transizione tra l'applicazione della norma italiana di recepimento della direttiva INSPIRE (D. Lgs. 32/2010) e l'emanazione del Regolamento del RNDT stesso.

Tale azione non poteva non essere efficacemente calibrata se non partendo dalle esigenze rappresentate, nella rilevazione, dagli Enti fruitori del supporto offerto. Tali esigenze possono essere riassunte nelle seguenti:

- verifica e validazione dei file XML dei metadati prodotti dai vari sistemi adottati ed utilizzati dalle Regioni per accertarne la conformità agli Standard e alle regole tecniche vigenti;
- istruzioni nella compilazione dei metadati relativi a dati e servizi territoriali;

- formazione su Standard e regole tecniche del Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali;
- coordinamento delle attività di integrazione dei cataloghi regionali con il Repertorio Nazionale.

Le stesse Regioni hanno indicato anche alcuni strumenti, tecnologici ed organizzativi, utili per soddisfare le esigenze rappresentate; tra gli altri:

- predisposizione di linee guida, specifiche per ciascuna tipologia tematica, per avere uno strumento agile di indirizzo nella compilazione dei metadati relativi a dati e servizi territoriali;
- organizzazione di workshop, seminari e riunioni tecniche sul funzionamento organizzativo, normativo e tecnologico del Repertorio, soprattutto relativamente alle modalità di fornitura di metadati dalle Regioni e di raccolta dei metadati dagli Enti sub-regionali e locali.

L'attività di supporto del CISIS, quindi, prendendo avvio da tali indicazioni, si è concretizzata, in particolare, nella verifica e validazione dei file XML dei metadati, prodotti dalle singole Regioni, per accertarne la conformità agli Standard e alle regole tecniche vigenti negli ambiti INSPIRE e nazionale.

In ambito INSPIRE, a giugno 2010, è stata rilasciata la versione 1.2 delle linee guida per l'implementazione del Regolamento CE 1205/2008 sui metadati attraverso l'utilizzo degli Standard ISO 19115 e 19119². Sulla base di tali linee guida, sul geoportale INSPIRE sono stati sviluppati:

- un editor di metadati (European Open Source Metadata Editor – EUOSME³), una web application per creare i metadati conformemente alla Direttiva INSPIRE e al Regolamento europeo sui metadati;
- un prototipo di validatore⁴ per testare la conformità dei file XML al citato Regolamento europeo.

In ambito nazionale, l'allegato 2 allo schema di Regolamento del RNDT definisce le regole tecniche per l'alimentazione del Repertorio. Nell'applicazione open source sviluppata da DigitPA, inoltre, sono disponibili, come già ricordato, un servizio di editor, tramite il quale è possibile produrre e scaricare file XML negli schemi di riferimento, e un servizio di validazione dei file stessi.

Avendo come riferimento le regole, le indicazioni e gli strumenti indicati, sono state, quindi, condotte le seguenti attività:

- validazione dei file rispetto agli schemi XSD;
- verifica del file rispetto al Regolamento INSPIRE (utilizzando il validatore disponibile sul geoportale);
- verifica del file rispetto allo schema di Regolamento del RNDT (utilizzando i servizi di validazione e caricamento disponibili sull'applicazione sviluppata da DigitPA).

A valle di queste attività, sono state fornite le indicazioni di eventuali difformità e conseguenti modifiche da apportare nei file (e, di conseguenza, nei sistemi e/o applicazioni) per garantire la piena conformità.

Dall'analisi svolta sui file XML relativi ai dati e servizi territoriali, si possono evidenziare alcuni elementi di criticità che possono anche rappresentare considerazioni conclusive, seppure parziali, dell'attività descritta.

² http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Metadata/INSPIRE_MD_IR_and_ISO_v1_2_20100616.pdf

³ <http://www.inspire-geoportal.eu/index.cfm/pageid/342>

⁴ <http://www.inspire-geoportal.eu/index.cfm/pageid/48>

La versione dello schema di Regolamento relativo al RNDT, in corso di emanazione, è complessivamente conforme al Regolamento CE 1205/2008 sui metadati, avendo recepito tutte le indicazioni previste da quest'ultimo. A tale proposito, nell'allegato 2 allo schema di Regolamento è presente la tabella di corrispondenza tra i metadati RNDT e i metadati INSPIRE.

La conformità viene confermata anche nella implementazione pratica che si attua nella creazione dei metadati e nella compilazione dei file XML. Tale assunto è valido, ovviamente, nel caso si faccia riferimento agli schemi XSD definiti dallo Standard ISO TS 19139. Se, invece, si fa riferimento agli schemi "adattati" del RNDT, allora viene meno tale conformità. La differenza sostanziale tra i due profili sta, infatti, nelle classi di applicazione dei metadati. Oltre a serie, dataset e servizio, previsti da entrambi, nel RNDT è contemplato anche il livello di sezione (*tile*), definita come "sottoinsieme di un dataset", comunque definita dallo Standard ISO 19115, ma che non rientra tra le classi di applicazione del Regolamento INSPIRE. In questa differenza risiede anche la principale motivazione degli adattamenti apportati dal RNDT agli schemi XSD ISO. Soprattutto in questo caso, quindi, nello spirito dell'art. 4⁵ dello schema di Regolamento, dovrà essere il RNDT a provvedere alla conversione dei file nella struttura derivante dallo schema ISO per consentirne l'interoperabilità all'interno dell'infrastruttura europea dei dati territoriali.

Stante quanto innanzi detto, le difformità riscontrate tra quanto previsto e/o implementato nel contesto nazionale e quanto previsto nel contesto INSPIRE, consistono nella differenza di codifica XML per alcuni elementi di metadati. Le due differenti codifiche, però, non rappresentano difformità anche rispetto agli schemi XSD, proprio perché lo Standard ISO permette l'implementazione di diverse strutture XML.

C'è da evidenziare, del resto, come peraltro dichiarato esplicitamente, che i metadati previsti da INSPIRE non garantiscono comunque la totale conformità a ISO 19115.

Appare necessario, quindi, poter disporre di indicazioni utili per l'implementazione del modello concettuale dei metadati, attraverso la predisposizione di istruzioni dettagliate per la compilazione dei metadati richiesti per i dati e i servizi territoriali al fine della corretta applicazione delle norme e delle regole tecniche di INSPIRE e del RNDT, come, tra l'altro, richiesto da alcune Regioni.

A tale proposito, occorre ricordare che DigitPA ha predisposto un documento di linee guida generali, valide, cioè, per tutte le tipologie di dati territoriali, e un documento di linee guida specifico per la metadocumentazione dei DBT.

Si tratta ora di procedere alla verifica della congruità dei documenti redatti da DigitPA rispetto all'ultima versione delle linee guida INSPIRE, nonché alla predisposizione di ulteriori documenti di linee guida per le tipologie di dati mancanti e per i servizi, fornendo le indicazioni utili atte a superare le seppur lievi difformità presenti tra i due profili e tra questi e lo Standard.

⁵ L'art. 4 comma 1 dello schema di Regolamento del Repertorio prevede che *"La pubblicazione dei metadati nel Repertorio (...) assicura il rispetto degli adempimenti di cui al Regolamento (CE) n. 1205/2008 della Commissione e al decreto legislativo n. 32 del 2010"*.

Dalla conoscenza alla conservazione: il Pianoro della Civita di Tarquinia

Giovanna Bagnasco Gianni (*), Susanna Bortolotto (**), Nelly Cattaneo (***),
Piero Favino (****), Andrea Garzulino (**), Franco Guzzetti (***), Matilde Marzullo (*),
Raffaella Simonelli (**)

(*) Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze dell'Antichità, 20122 Milano, Via Festa del Perdono 7
0250312323, Fax 0250312521, giovanna.bagnasco@unimi.it, matilde@infinito.it

(**) Politecnico di Milano, Dipartimento di Progettazione dell'Architettura, Laboratorio di Diagnostica per la
Conservazione e il Riuso del Costruito, 20158 Milano, Via Durando 10, Tel. 0223995825, Fax 0223995836
susanna.bortolotto@polimi.it, raffaella.simonelli@polimi.it, andreagarzulino@hotmail.com

(***) Politecnico di Milano, Dipartimento BEST (Building Environment Science and Technology), 20133 Milano
Via Bonardi 3, Tel. 0223996531, Fax 0223996550, franco.guzzetti@polimi.it, nelly.cattaneo@yahoo.it

(****) Politecnico di Milano, Dipartimento di Progettazione dell'Architettura, Laboratorio di Macroubanistica,
Paesaggio e Cartografia tematica, 20158 Milano, Via Durando 10, Tel. 0223995823, Fax 0223995836,
piero.favino@polimi.it

Abstract

Il presente contributo è volto a illustrare il metodo interdisciplinare di lettura del territorio dell'antica Tarquinia sul Pianoro della Civita, nelle sue connessioni con il contesto circostante, che si sta mettendo a punto grazie alla collaborazione fra l'Università degli Studi di Milano e il Politecnico di Milano nell'ambito del progetto "Mura tarquiniesi" (PRIN 2008, responsabile Giovanna Bagnasco Gianni).

Da tale collaborazione sta emergendo un sistema di "consultazione/comunicazione" informatizzata, in grado di mettere in relazione fra di loro i dati archeologici, i manufatti architettonici e la relativa documentazione cartografica e fotografica, i contenuti scientifici scaturiti da ricerche pregresse e realizzate nel corso del progetto.

In particolare il *database* cartografico, messo a punto attraverso un GIS dal Politecnico, andrà a sistematizzare e catalogare la cartografia storica, moderna e contemporanea, la documentazione esistente relativa ai vincoli di tutela del sito, nonché tutti i materiali che si sono elaborati *ad hoc* per la ricerca, al fine di creare un "fondo documentario" unitario che potrà essere implementato e aggiornato costantemente. Novità dell'indagine è la lettura integrata delle aerofotogrammetrie storiche e il rilievo LiDAR realizzato nel 2010.

Il territorio della Civita è particolarmente congeniale alla sperimentazione di un *database* cartografico che permetta di sviluppare da un lato la conoscenza del sito archeologico e dall'altro strumenti per l'individuazione di "buone pratiche" finalizzate alla tutela e alla valorizzazione. Tali acquisizioni saranno eventualmente disponibili per implementare il *Master Plan* UNESCO (2004). La banca dati cartografica, consentendo la localizzazione georeferenziata di ogni informazione sul territorio, offrirà la possibilità di interfacciare i dati pervenuti dagli enti pubblici coinvolti nella ricerca e permetterà di attuare letture sistemiche complesse in grado di fare scaturire nuove intuizioni e percorsi di indagine per la conoscenza dei caratteri territoriali del sito.

Abstract

The aim of our contribution is to present an interdisciplinary approach in reading the territory of the ancient Etruscan city of Tarquinia, in connection with its surroundings, held in cooperation between the Università degli Studi di Milano and the Politecnico di Milano within the project "Mura tarquiniesi" (PRIN 2008, coordinated by Giovanna Bagnasco Gianni).

Such a cooperation is producing a system of "consultation/communication" able to integrate archaeological data, artifacts and architectural buildings, cartographic and photographic documentation, and scientific contents achieved in the past and implemented during the project.

In the case in point the cartographic *database*, developed through a GIS by the Politecnico di Milano, will systematize and catalog the historical, modern and contemporary maps; existing documentation relating to the constraints of the protection of the site and all materials that are drafted specifically for research in order to create a "documentary fund" unit that can be implemented and constantly updated. A new goal of the research is the integration between the historical aerial photography and LiDAR (Light Detection And Ranging) survey, conducted in 2010. The territory of the ancient Tarquinia (Civita) is particularly suitable to test a cartographic *database* to implement both our knowledge of the archaeological site and valuable tools to identify "best practices" to protect and promote the area. This bulk of documentation is going to be ready to implement the UNESCO *Master Plan* (2004). The cartographic *database*, allowing the location of each geo-referenced information on land, will offer the opportunity to interface the data received by the public bodies involved in research and implement complex systems of reading leading to new insights and routes to assess the territorial features of the site.

1. La ricerca integrata per la Civita etrusca

Il pianoro della Civita di Tarquinia (Viterbo) è stato oggetto di scavi sistematici fin dal XIX secolo, ma solo nella prima metà del secolo scorso l'archeologo Pietro Romanelli ne ha messo in luce il profilo di città etrusca, scoprendo le mura, con alzato fino a tre metri, la porta monumentale, i resti di edifici dell'abitato e l'imponente tempio dell'Ara della Regina.

Il tempio con le sue grandiosi proporzioni (della decorazione del suo frontone restano pochi frammenti in terracotta tra cui la famosa lastra dei Cavalli Alati) dà la misura dell'importanza di Tarquinia e del suo santuario sul pianoro della Civita nell'Etruria intera. A tal proposito fanno eco le fonti letterarie che raccontano di Tarconte, il fondatore della città: arando una zolla di terra tarquiniese egli ne vede scaturire Tagete, il fanciullo nato vecchio, dal quale riceve i fondamenti della religione etrusca. È così che la città assume un ruolo di primo piano per la cultura del popolo etrusco, definito da Tito Livio "il più religioso degli uomini".

Operare a Tarquinia significa, dunque, trovarsi nel vivo della vicenda etrusca e in un territorio ancora pressoché intatto, dove si eleva il pianoro della Civita, che punta verso il mare, visibile fra due quinte collinari. Su quella verso la costa si estende la necropoli dei Monterozzi, con le sue straordinarie tombe dipinte, divenuta sito UNESCO nel 2004. Al suo estremo più settentrionale sorse nel Medioevo la città di Corneto, che ha assunto in epoca moderna il nome di Tarquinia, sottraendolo alla città etrusca lasciata disabitata sul pianoro della Civita.

L'Università degli Studi di Milano è presente dal 1982 con scavi e ricerche iniziate da Maria Bonghi Jovino (fino al 2005) e attualmente dirette da Giovanna Bagnasco Gianni¹.

Il "complesso monumentale" sul pianoro occidentale della Civita, il santuario dell'Ara della Regina e il "cantiere pilota" della cinta muraria sono i capisaldi di un'indagine a tutto campo su cui convergono molteplici settori disciplinari applicati all'archeologia, quali le scienze geologiche e naturalistiche, le archeometriche, le architettoniche e quelle informatiche. Grazie a ciò, le acquisizioni sulla storia di Tarquinia, e nel campo degli studi di carattere etruscologico in genere, sono considerevoli e riconosciuti a livello internazionale.

Il "complesso monumentale" si configura come la più antica area sacra finora individuata in Etruria, dalle fasi di costruzione in negativo nella roccia e in materiale deperibile (terra cruda), fino alla costruzione di strutture in pietra, che richiamano le esperienze architettoniche del vicino oriente.

Per ciò che attiene alle mura, la collaborazione in atto con il Politecnico di Milano è volta a completare il quadro dell'estensione della città antica sul Pianoro della Civita in rapporto alle sue altimetrie e al suo contesto, rinvenendone l'infrastrutturazione, il palinsesto dei segni in chiave storica e il rapporto con le fasi insediative successive.

Lo studio si svolge attraverso metodi tradizionali coniugati con moderne strategie di indagine territoriale che hanno l'obiettivo di recuperare i dati acquisiti nelle ricerche pregresse ed elaborarli alla luce di tutte le attuali conoscenze sullo sviluppo della città antica, valorizzandone tutti gli aspetti.

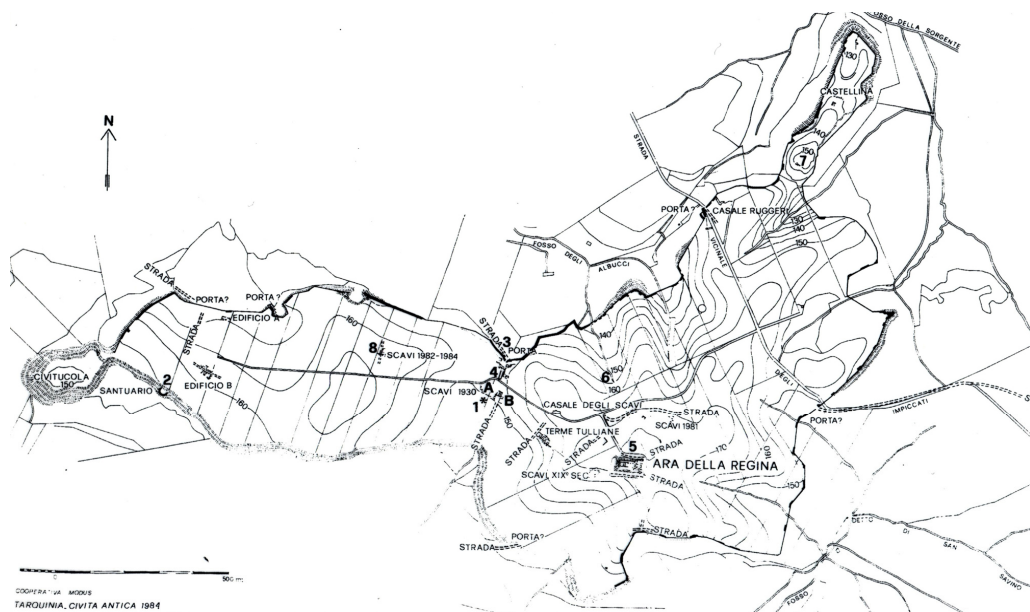


Figura 1 – Localizzazione e datazione degli scavi effettuati nell'area della Civita e ricostruzione del perimetro della cinta muraria secondo P. Romanelli (prima metà del XX secolo)- Rilievo Società Cooperativa MODUS².

2. Il sistema informativo territoriale: il metodo

L'area dell'antica città etrusca di Tarquinia (Pian di Civita e Pian della Regina) è zona sottoposta a vincolo sia archeologico, sia ambientale e costituisce riserva naturale (SIC) destinata alla preservazione e al ripopolamento di diverse specie animali (in particolare uccelli) e vegetali. Inoltre le tombe dipinte della necropoli dei Monterozzi costituiscono sito UNESCO dal 2004.

Le numerose evidenze monumentali ("complesso monumentale", santuario dell'Ara della Regina, Porta Romanelli, Mura, Necropoli delle Morre con monumento funerario) si trovano su terreni di proprietà collettiva della cittadinanza e sono gestiti dall'Università Agraria di Tarquinia, organo elettivo competente per quanto riguarda lo sfruttamento e gli aspetti economici e giuridici. L'area quindi si presenta con un enorme potenziale dal punto di vista della ricchezza di interessi e gode di uno statuto vantaggioso (proprietà collettiva e tutela ambientale e culturale).

Sul pianoro parallelo, tra la Civita e il mare, si estende la necropoli dei Monterozzi; all'estremità del pianoro sorge il centro storico della moderna Tarquinia, corrispondente all'antica Corneto medievale. Riunificare il centro storico medievale e le tombe dipinte con le aree archeologiche e naturalistiche del pianoro della Civita è ormai di interesse prioritario nell'ambito del *Master Plan* del sito UNESCO (nell'ambito di un progetto di gestione di siti complessi, interazioni urbanistiche e di tutela). Il territorio oggetto di studio è storicamente contraddistinto da un'orografia ad andamento irregolare che presenta parti pianeggianti verso il mare e in rilievo ad est verso il comune di Monte Romano. La formazione della pianura è legata alla presenza dei fiumi che sfociano nel Tirreno e collegata all'entroterra da pianori e poggi. Tra questi emerge il rilevato che ospitava il nucleo di antica formazione della città di Tarquinia, la Civita, "propaggine" di un sistema che si estende ancor più verso l'interno, andandosi a collegare ai rilievi dei monti della

Tolfa. L'intero territorio è caratterizzato dalla presenza di acque sotto forma di torrenti e fiumi (Arrone, Marta e Mignone), fossi (Valfrigida, Gesso, Pantanaccio, degli Albucci, della Vignaccia, Legno, del Cazzatella, delle Cavalline, dei Due Ponti, dei Bufalini, ecc.), fontanili e sorgenti (del Buligname, della Pagnotta, della Torre, ecc.); si segnala inoltre la presenza di saline nella zona costiera e di aree sottoposte a bonifica. La ricerca si pone l'obiettivo di creare un Sistema Informativo Territoriale (GIS) che andrà a sistematizzare e a catalogare le fonti cartografiche, iconografiche e la documentazione esistente sul sito, nonché i materiali che si elaboreranno *ad hoc* per la ricerca stessa, al fine di creare un "fondo documentario" che implementi il *Master Plan* del sito UNESCO. Tale strumento accoglierà al suo interno anche tutte le "informazioni" pervenute dagli enti pubblici coinvolti nel progetto (Soprintendenze, Regione Lazio, Provincia di Viterbo, Consorzi di Bonifica, Enti Parco, Amministrazioni Comunali, Fondazioni), nonché il materiale fornito dagli enti di ricerca quali Università e Centri culturali locali. La disponibilità offerta da programmi informatici che rendono possibile associare banche dati, testi e immagini ad una base cartografica, permette soluzioni adeguate alla creazione di un archivio informatizzato che, oltre alla documentazione catalogata, può essere implementato e aggiornato costantemente.

Il database cartografico, consentendo la localizzazione georeferenziata di ogni "dato" sul territorio, offre la possibilità di interfacciare le informazioni inserite in altri analoghi sistemi (Sistema Informativo Territoriale della Regione Lazio, Sistema Informativo Beni Ambientali della Regione Lazio, Sistema Informativo per la Bonifica, ecc.), facendoli dialogare su una piattaforma comune.

Il Sistema Informativo Territoriale, inteso come un atlante di lettura diacronico, sarà costruito pensando ad una struttura di facile accesso e consultazione, attraverso l'identificazione e l'organizzazione dei vari tematismi in sezioni:

- *Area di Studio*: inquadramento del territorio.
- *Basi cartografiche*: cartografia in serie storica³.
- *Iconografie storiche della Civita e foto aeree*⁴.
- *Geologia*: principali elementi della lettura geomorfologica (paleovalle, argini, scarpate, ecc.) del terreno e delle trasformazioni legate agli interventi di bonifica⁵.
- *Idrografia*: delimitazione dei comparti di scolo e dei relativi bacini idrici, dei reticoli irrigui di apporto e drenaggio e dei principali corsi d'acqua naturali ed artificiali, individuati attraverso la lettura della cartografia consorziale⁶.
- *Altimetria*: andamento altimetrico del terreno attraverso la definizione delle isoipse e la costruzione di un *Digital Elevation Model* dell'intera area.
- *Toponomastica*: rilievo dei toponimi presenti sulla Carta Tecnica Regionale (2002) e verifica della loro preesistenza alle varie soglie storiche con collegamento a schede di dettaglio⁷.
- *Archeologia*: raccolta e sistematizzazione delle informazioni relative ai ritrovamenti effettuati e alle ricognizioni, attraverso schede di *survey* (con descrizione, datazione, localizzazione e georeferenziazione) relative a ciascun sito "areale" e "puntuale"⁸.
- *Vincoli*: la sezione individua le aree sottoposte a vincolo a livello regionale, provinciale e locale, a cui si aggiunge il *Master Plan* del sito UNESCO di Cerveteri e Tarquinia⁹.
- *Analisi cartografica - Lettura delle permanenze*: palinsesto dei segni infrastrutturali (viabilità storica) e dell'urbanizzato alle soglie storiche utilizzate (IGM XIX e XX secolo, CTR 2002).
- *Edifici di culto*: catalogazione dei manufatti di matrice medievale¹⁰.
- *Destinazione d'uso del suolo*: ricostruzione storica dell'utilizzo del suolo in rapporto allo sviluppo del reticolo idrografico, attuata mediante la "lettura" delle soglie storiche analizzate (IGM XIX e XX secolo, CTR 2002) e valutazione delle trasformazioni culturali del paesaggio agrario.
- *Censimento dei beni culturali*: beni architettonici e paesistici vincolati dalle vigenti leggi di tutela.
- *Light Detection And Ranging (LiDAR)*: nel 2010 nell'area della Civita è stata realizzata una lettura con *laser scanner* aereo. Il rilievo LiDAR è una tecnologia innovativa che si sta consolidando anche in ambito archeologico. Tale tecnica si avvale di sistemi di misurazione montati su velivoli che durante la ricognizione scansano il territorio sorvolato. I dati grezzi - primo prodotto di *output* del rilievo aereo - si presentano come una ricostruzione dell'andamento del terreno e degli elementi in

esso presenti (vegetazione, edifici, ecc.) attraverso una “nuvola” di punti disposti secondo lo *scanning pattern* dello strumento; di questi punti sono note le coordinate planimetriche, la quota e l'intensità di riflessione. La successiva elaborazione produce le seguenti rappresentazioni digitali: il *Digital Elevation Model* (DEM), l'ortofoto e la lettura all'infrarosso. Il primo, in particolare, è utile per la descrizione tridimensionale delle superfici, trattandosi di una immagine *raster* in cui ad ogni *pixel* è associato il valore di quota effettivo che ne permette la visualizzazione tridimensionale. Specifiche esplorazioni della nuvola di punti verranno svolte per meglio avvalorare tridimensionalmente i caratteri peculiari della Civita e dei suoi “segni” di permanenza.

- *Mappatura rilievi architettonici*: durante la campagna archeologica condotta nei mesi di settembre-ottobre 2010 è stata avviata un'attività di rilevamento con stazione totale *laser* delle mura poste a nord della Civita; anche questa documentazione, con le letture delle tecniche murarie, è stata inserita nel GIS¹¹.

La visualizzazione incrociata di tutti questi tematismi permetterà di attuare letture sistemiche complesse in grado di fare scaturire nuove intuizioni e percorsi di indagine per la conoscenza dei caratteri territoriali.

La sperimentazione di una metodologia di studio e di analisi che raccolga e gestisca una pluralità di dati e materiali eterogenei (relativi ai vari settori che concorrono a definire il territorio in esame) - attraverso letture “verticali ed orizzontali”, diacroniche e sincroniche, anche grazie ad interfacce ed aggiornamenti con altre discipline - è da considerarsi necessaria per la conoscenza e la comprensione del territorio quale palinsesto/ sommatoria di stratificazioni di segni, di assenze e di presenze, al fine di una consapevole attività di tutela, valorizzazione e gestione.

Gli strumenti di pianificazione comunale e sovracomunale potranno recepire i risultati dello studio ed utilizzarli per prevedere progetti di conservazione e valorizzazione paesistica.

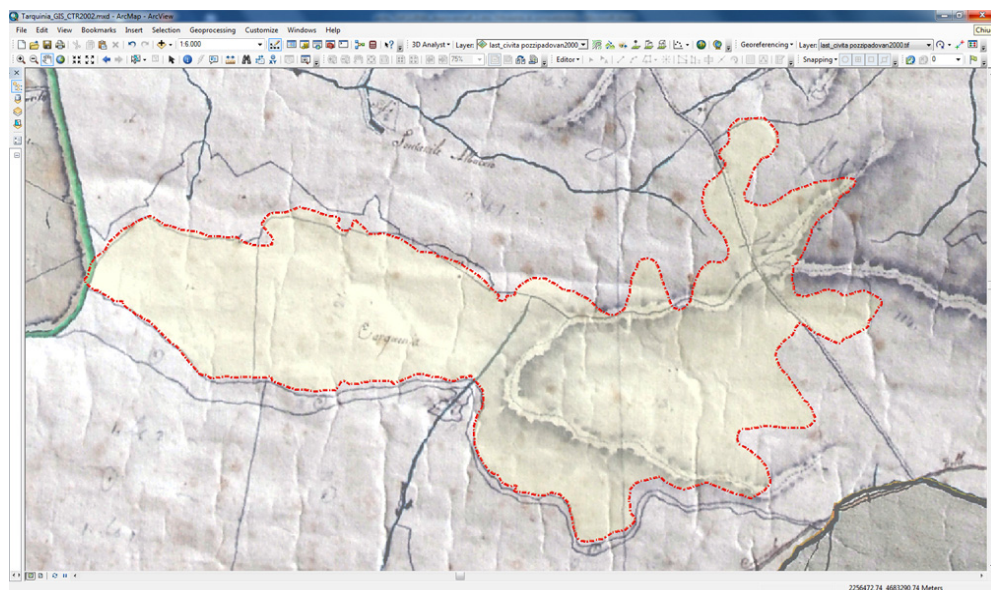


Figura 2 – Un esempio di utilizzo della cartografia storica nel GIS: perimetrazione del Pian della Civita sulla base del Catasto Gregoriano, 1816.

3. Aspetti e problematiche dell'applicazione pratica di una tecnologia innovativa: LiDAR

L'applicazione in ambito archeologico del *laser scanner* terrestre e della tecnologia LiDAR si è consolidata rapidamente all'estero e si sta affermando anche in Italia. In breve, il *laser scanner* terrestre, usato per rilievi di oggetti e manufatti, è costituito da uno *scanner* che aziona, dirige e

registra in modo automatico gli impulsi del telemetro *laser* annesso; questo telemetro determina la distanza tra il punto di emissione dell'impulso e il punto di riflessione, che appartiene alla superficie dell'oggetto intercettato. Essendo nota la posizione dell'origine dell'impulso, ed essendone registrati l'angolo di direzione e la distanza percorsa, l'insieme dei punti intercettati (nell'ordine di oltre 100.000 al secondo) è una nuvola di punti che ricostruisce una sorta di "calco digitale" delle superfici scansate. Per rilievi di ampie porzioni di territorio si ricorre all'uso della tecnologia LiDAR, in cui un *laser scanner* con particolari caratteristiche è installato su un velivolo. In questo caso, per conoscere la posizione del punto di emissione dell'impulso *laser*, è necessario integrare un sistema GPS che ne ricostruisca la traiettoria; inoltre bisogna disporre di un sistema inerziale che permetta di ricostruire in ogni istante l'orientamento del *laser scanner* e pertanto la direzione nello spazio del raggio da esso emesso. Essendo i tre strumenti sincronizzati è possibile collocare in uno spazio georeferenziato il punto intercettato dall'impulso *laser* in ogni istante poiché sono noti: le coordinate nel sistema UTM-WGS84 del punto sorgente, l'orientamento nello spazio del raggio da esso emesso e la sua lunghezza in termini di distanza percorsa.

A tale strumentazione si abbina, qualora non sia già integrata nello strumento, una camera fotogrammetrica digitale. Un volo con tecnologia LiDAR offre il vantaggio di acquisire molto velocemente una gran quantità di punti quotati a terra. Questo vantaggio è accentuato dal fatto che la presenza di vegetazione ostacola solo in parte il percorso verso terra dell'impulso: la sua traccia a terra infatti ha un diametro non trascurabile (ad esempio, se la divergenza del raggio è pari a 0,22 mrad e il volo avviene a quota relativa 1000 metri, l'impronta a terra risulta di 22 cm), e questo aumenta la probabilità che almeno una porzione dell'impulso trovi un varco attraverso la vegetazione e intercetti il terreno.

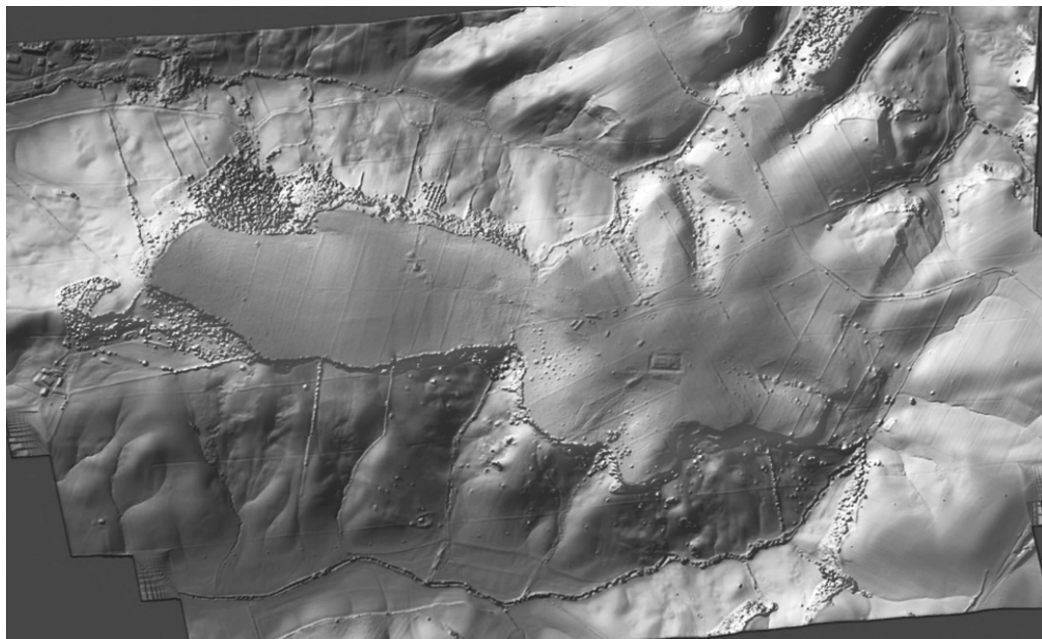


Figura 3 – Rilievo LiDAR 2010: ricostruzione del DEM, Digital Elevation Model.

In questo caso verranno riflessi e registrati due ritorni, o eco, dell'impulso: il primo individuerà la posizione in quota della vegetazione, il secondo quella del terreno.

Tramite appositi algoritmi e opportuni criteri di selezione, basati su parametri geometrici quali pendenza massima ammissibile e/o scarti in quota accettabili, è possibile estrarre dalla nuvola di

punti solo le informazioni appartenenti alla superficie del terreno: tutti i punti che appartengono a tale superficie genereranno il DTM (*Digital Terrain Model*), gli altri verranno scartati.

Con una grande densità di punti a terra è possibile avere un DTM di alta precisione, e proprio questo tipo di prodotto si è rivelato estremamente proficuo nell'ambito del censimento delle emergenze archeologiche su aree vaste. È importante precisare subito che il DTM utile a questo tipo di lavoro ha alcune peculiarità che lo distinguono dagli altri: è infatti necessario che l'algoritmo utilizzato per scartare i punti non appartenenti al terreno non sia troppo selettivo, dal momento che l'emergenza archeologica e i piccoli manufatti d'interesse il più delle volte presentano proprio le caratteristiche geometriche che porterebbero a scartarli. La modalità di lavoro consolidata prevede quindi il mantenimento di tutte le rugosità del terreno (al netto ovviamente dei manufatti di grandi dimensioni che sono già visibili nel *Digital Elevation Model* e della bassa vegetazione), che verranno poi analizzate e interpretate caso per caso da un operatore, avvalendosi se necessario dell'esplorazione diretta della nuvola di punti. La definizione geometrica di queste rugosità del DTM aumenta, ovviamente, all'aumentare della densità di punti a terra.

Il rilievo del sito dell'antica Tarquinia etrusca è stato eseguito dalla società Geotechnos srl utilizzando un aereo bimotore su cui è stato montato l'Airborne Laser Scanner "LEICA ALS 60"¹² ed una camera metrica digitale "RCD105" 39MP.



Figura 4 – Rilievo LiDAR 2010: lettura del terreno attraverso la "nuvola di punti" (particolare dell'area degli scavi).

Per un caso di lavoro come quello in oggetto si può considerare ottimale una densità di 8-10 punti a metro quadro. La densità nelle aree di interesse è intorno ai 5 punti a metro quadro per quanto riguarda la piana, ma aumenta lungo la fascia perimetrale dove si concentra l'interesse del progetto. Tuttavia neanche qui si raggiunge la densità ottimale in modo omogeneo a causa del limite fisico-naturale costituito dalla presenza di macchia mediterranea: se infatti la vegetazione arbustiva e arborea sono ostacoli facilmente "superabili" e riconoscibili, la vegetazione tipica della macchia mediterranea si presenta particolarmente fitta, o troppo vicina ai punti terreno e quindi non distinguibile dal rumore di fondo o addirittura dalle rugosità.

In questa fase del lavoro si sta cercando di recuperare il maggior numero di punti lungo la fascia di interesse, in modo da migliorare il più possibile la ricchezza di dettaglio del DTM. Questo è fondamentale per il passaggio successivo, che consiste nell'interpretazione del DTM stesso avvalendosi delle funzioni di analisi delle superfici note come *shading* o *hillshading*, disponibili nei software GIS, oppure dell'esasperazione della terza dimensione, o utilizzando il parametro noto come *Sky View Factor* (SVF). Tutte queste modalità servono a raggiungere lo scopo di rendere chiaramente leggibile l'andamento del terreno, evidenziare la morfologia dei piccoli e grandi rilievi e mettere in luce le forme da esso assunte.

Il parametro SVF, applicabile utilizzando il software GIS *open source* SAGA, si è dimostrato essere lo strumento più idoneo per raggiungere questo obiettivo. Esso applica un principio semplice, ma di grande efficacia, che consiste nell'attribuire a ciascuna cella del *raster* DTM una gradazione di grigio proporzionale alla percentuale di cielo che l'andamento dell'intorno gli permette di vedere (per intenderci il nero corrisponderebbe ad una percentuale pari a zero). Il vantaggio rispetto alle tecniche di visualizzazione in *shading* consiste nell'evidenziare le geometrie complete delle concavità e delle convessità del terreno, come se si prendesse il meglio dalle ombre provenienti simultaneamente da tutte le direzioni.



Figura 5 – Rilievo LiDAR 2010: aerofotogrammetria del sito dell'Ara della Regina.
Si noti il livello di dettaglio dell'immagine.

Un'applicazione diffusa del DTM, utilissima anche nel caso in oggetto, consiste nell'ortorettifica dei fotogrammi aerei. L'ortofoto generata è di alta qualità, poichè si basa su un DTM di elevata precisione e garantisce un GSD (*Ground Sample Distance*) inferiore ai 10 cm. La scala nominale dell'ortofoto è quindi 1:1000, utile ad una prima mappatura e all'inquadratura dei rilievi di dettaglio. Si ricorda inoltre la possibilità di gestire l'immagine dell'ortofoto all'infrarosso falso colore, in modo da riuscire a vedere anche informazioni che l'occhio umano non percepisce nel campo del visibile.

La nuvola di punti in sé continua ad essere un riferimento nell'interpretazione ogni volta che si rende necessario superare delle ambiguità o approfondire l'analisi del DTM. La società Geotechnos srl, consapevole della scarsa "maneggevolezza" dei dati LiDAR, invece di fornire solo il dato, ha reso

disponibile anche uno strumento di uso molto semplice per interagire con la nuvola di punti in remoto, tramite un normale collegamento internet. Questo applicativo si chiama *Laserweb* © e per la sua efficienza e velocità rende agevoli sopralluoghi e percorsi virtuali che occorre effettuare in alcune fasi del lavoro. All'interno dello stesso applicativo sono presenti degli strumenti che permettono di estrarre in formato vettoriale *dxf* i profili lungo le linee di sezione tracciate sul DTM o sul DEM, anch'essi visualizzabili attraverso *Laserweb*©. Queste sezioni e le letture in 3D si rivelano particolarmente utili nello studio di dettaglio del rapporto tra la piana della Civita, le mura con i rilevati, le diverse altimetrie nella fascia perimetrale/contestuale e nell'interpretazione dei rapporti di causa/effetto delle soluzioni insediative e costruttive rispetto alla morfologia naturale dei luoghi¹³.



Figura 6 – Localizzazione di un tratto delle mura sul Pian della Civita durante la ricognizione del maggio 2011 e individuazione su foto aerea.

4. Risultati ed azioni future

La ricerca ha messo a punto uno strumento utile all'analisi e al riconoscimento del palinsesto insediativo della Civita etrusca e delle sue mura. Il *database* cartografico GIS, grazie a tutte le sue interfacce (geologiche, storiche archeologiche), alla lettura della permanenza dei segni delle cartografie storiche, all'analisi dell'uso del suolo, unitamente all'utilizzo di tecnologie innovative (LiDAR) per le interpretazione dei segni con DTM ha permesso di "strutturare" successive ricognizioni *in situ* mirate alla riconoscibilità delle evidenze e alla valutazione della loro permanenza sul territorio. Le elaborazioni dei dati hanno permesso di prevedere sia futuri ambiti di ricerca, sia di indirizzare interventi di conservazione/riqualificazione delle aree archeologiche e naturalistiche del Pianoro della Civita, al fine di renderne effettiva la loro tutela, valorizzazione e fruibilità e di consentire così una pianificazione consapevole dei prossimi cantieri di ricerca archeologica sul sito. Tali acquisizioni potranno contribuire alla stesura di "linee guida" per la riqualificazione delle aree interessate dal *Master Plan* del sito UNESCO.

Sviluppo del progetto, pertanto, sarà istituire un programma organico di riqualificazione del Pianoro della Civita affinché diventi un "bene" integrato nei percorsi turistici e culturali attualmente limitati al circuito della necropoli delle tombe dipinte e del Museo Nazionale di Tarquinia.

Si prevedranno azioni concrete quali: progettazione di un accesso e di un'area accoglienza/parcheggio con *Info Point* al Pian di Civita, unitamente ad una sistemazione e manutenzione continua delle strade bianche da adibire al passaggio di escursionisti a piedi, a cavallo o in bicicletta; conservazione programmata dei monumenti archeologici con la predisposizione di un sistema di informazione tramite pannelli esplicativi integrati con le nuove tecnologie ICT (*Information Communication Technology*); pianificazione di interventi continui di manutenzione, pulizia ed eliminazione della vegetazione infestante; sistemazione dei luoghi di interesse naturalistico, paesaggistico e dei geositi, con indicazione dei possibili itinerari contestuali alle aree archeologiche¹⁴.

¹ Si veda la *Collana Tarchna* fondata da M. Bonghi Jovino, diretta da M. Bonghi Jovino e G. Bagnasco Gianni (L'Erma di Bretschneider).

² Bonghi Jovino M., Chiaramonte Trerè C. (1997), *Tarquini. Testimonianze archeologiche e ricostruzione storica. Scavi sistematici nell'abitato (campagne 1982-1988)*, L'Erma di Bretschneider, Roma.

³ Riferimenti cartografici utilizzati:

- Catasto Gregoriano, 1816;
- Catasto Rustico 1873 (e aggiornamenti successivi);
- Catasto anni '50;
- Catasto attuale;
- IGM serie 25V (foglio 142-I° NO) 1879;
- IGM serie 25V (foglio 142-I° NO) 1951;
- IGM serie 25V (foglio 142-I° NO) 1970;
- IGM serie 25V (foglio 350-III°) 2001 (produzione e volo del 1994);
- IGM serie 50.000 (foglio 354, 1971 produzione);
- CTR 2002 Regione Lazio (base raster scala 1:5000).

⁴ Riferimenti aerofotogrammetrici utilizzati:

- Foto aerea (bn): F.lli Nistri 1938;
- Foto aeree (bn): RAF 1943, 1944, 1945;
- Regione Lazio, foto aeree (bn.) 1998-2000;
- Foto Infrarosso (col) AGEA Roma 2008.

Rilievi:

- Rilievo A. Mandolesi, 1990;
- Rilievo Cavità e pozzi G. Padovan, 2000;
- Rilievo MODUS, 2005;
- Rilievo LiDAR, 2010.

⁵ Sezione a cura del prof. M. Cremaschi e del dott. A. Zerboni, Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio".

⁶ Sistema Informativo Territoriale del Consorzio di Bonifica della Maremma Etrusca.

⁷ Perego L.G. (2005), *Il territorio tarquiniese. Ricerche di topografia storica*, Ed. LED, Milano.

⁸ Bagnasco Gianni G. (2008), "The T.Arc.H.N.A. project: aspects of the research", *Bridging Archaeological and Information Technology Culture for community accessibility* (Milan, July, 10-11, 2007), Roma, 29-36.

⁹ Riferimento agli strumenti urbanistici e gestionali vigenti:

- PTPR 2007 Regione Lazio tavola A (base raster CTR scala 1:10000);
- PTCP 2006 Provincia di Viterbo;
- PRG 1976 Comune di Tarquinia, tavv. 9, 9B, 9C, 10, 10B, 10C;
- Piano di Gestione sito UNESCO di Cerveteri e Tarquinia, 2004.

¹⁰ Sezione a cura della dott.ssa B. Casocavallo.

¹¹ La campagna di rilievo è stata condotta sul campo dal Politecnico di Milano, Laboratorio di Diagnostica per la Conservazione e il Riuso del Costruito, prof. S. Bortolotto, arch.tti F. Bariani, A. Caligaris, A. Garzulino.

¹² Il Laser Scanner "LEICA ALS 60" registra fino a 4 ritorni dell'impulso (primo, secondo, terzo e ultimo).

¹³ KOKALJ Z., ZAKŠEK K., OŠTIR K. (2010), *Archaeological Application of an Advanced Visualisation Technique Based on Diffuse Illumination*, EARSeL Symposium, Parigi

SHAN J., TOTH C.K. (2009), *Topographic Laser Ranging and Scanning*, CRC Press, Boca Raton (USA)

FORTE M. (2002), *I Sistemi Informativi Geografici in archeologia*, I Quaderni di MondoGIS, Roma.

¹⁴ Responsabile della sezione archeologica: Giovanna Bagnasco Gianni, insieme a Matilde Marzullo; responsabile sezione LiDAR, Franco Guzzetti, insieme a Nelly Cattaneo; responsabile formazione Sistema Informativo Territoriale: Piero Favino, con Andrea Garzulino; responsabile coordinamento rilievi e restituzione/interpretazione dati: Susanna Bortolotto con Raffaella Simonelli.

Immagini ad alta ed altissima risoluzione per l'aggiornamento della cartografia dell'Aquila

Valerio Baiocchi (*), Raffaella Brigante (**), Donatella Dominici (***), Francesca Giannone (*),
Fabio Radicioni (**), Elisa Rosciano (***)

(*) Area Geodesia e Geomatica, DICEA, "Sapienza" Università di Roma, e-mail: valerio.baiocchi@uniroma1.it

(**) Università di Perugia – Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale. e-mail: topos@unipg.it

(***) Università dell'Aquila - DAU, e-mail: donatella.dominici@univaq.it

Riassunto

In recenti lavori è stato mostrato come gli effetti causati da un evento sismico su edifici possono essere identificati usando gli algoritmi di *change detection* e di classificazione su immagini multispettrali (Ajmar et al., 2010). I principali algoritmi di *change detection* possono non essere sempre efficaci per l'identificazione di un edificio danneggiato dal sisma dato che in alcuni casi il tetto di un edificio presenta una radiometria molto simile a quella del terreno creando così un'errata classificazione, oppure un edificio crollato per il sisma presenta la stessa radiometria dell'edificio non danneggiato. In questo contributo si vuole studiare l'utilità di affiancare alle tecniche di *change detection* e di classificazione per immagini multispettrali, l'analisi di DSM estratti da coppie di immagini satellitari ad alta risoluzione.

In questo lavoro l'approccio combinato di DSM e *change detection* è stato testato per i danni conseguenti allo sciame sismico dell'Aquila; il DSM della zona d'interesse è stato ottenuto con una coppia di immagini EROS-B che non costituiscono una vera stereocoppia (non disponibile ai tempi della sperimentazione) ma sono 2 immagini singole con particolare geometria di acquisizione che permettono di simulare le caratteristiche geometriche di una stereocoppia (che chiameremo "pseudo stereocoppia"); le operazioni di classificazione sono state eseguite su un'immagine multispettrale ad otto bande, monoscopica acquisita dalla piattaforma *WorldView2*.

Infine, per minimizzare le "false detection" e gli "effetti di bordo" è stato estratto dalla cartografia digitale un DEM contenente solo i tetti degli edifici.

Il lavoro è da considerarsi preliminare ma già a questo stadio si possono valutare i vantaggi della combinazione delle tecniche di *change detection* e di estrazione di DSM.

Abstract

Earlier experimentations showed that some of the effects of a seismic event on buildings can be identified using change detection and multispectral classification algorithms (Ajmar et al., 2010). The main change detection algorithms, are not always effective where there are new buildings because there is the possibility that ground with the same radiometry of a roof is classified as a building and also the opposite is possible: a collapsed building after a seismic event may have the same radiometry of an un-damaged building. In this work a new approach was tested on the effects of L'Aquila earthquake where an actual satellite stereopair of the whole area interested by the event is still not available. For this reason a "pseudo stereopair" EROS-B was used to extract height information, while multispectral classification was performed on a monoscopic WorldView2 image. To evaluate correctly height difference due to the eventually collapsed buildings, a DSMs of the roofs was extracted from digital cartography excluding all the remaining parts of the territory. The work has to be considered as a "work in progress" but some methodological considerations on the advantage of combining the two techniques can be done

Introduzione

I recenti eventi sismici che hanno interessato il territorio italiano, hanno evidenziato la necessità di avere una rapida analisi della situazione nell'immediato post-sisma per la gestione dell'emergenza; a questo scopo è stato studiato un metodo semi-automatico di analisi delle immagini satellitari, in grado di fornire informazioni riguardanti i crolli di edifici causati dal sisma.

Il caso studiato in questo lavoro riguarda la città dell'Aquila ed in particolare gli effetti dell'evento sismico avvenuto nell'Aprile 2009 (Mw 6.3) che ha causato danni significativi agli edifici del centro storico della città e più di 300 vittime.

Lo scopo del lavoro è: a) valutare la possibilità di estrarre un DSM da due immagini EROS-B monoscopiche con delle opportune caratteristiche di presa che permettono di simulare una stereocoppia ("pseudo stereocoppia"); b) l'analisi del DSM estratto da cartografia, ottenuto applicando un modello specifico che permette di selezionare solo le informazioni dei tetti degli edifici. Il DSM ottenuto da cartografia è confrontato con il DSM estratto dalle pseudo stereocoppie con lo scopo di valutare edifici collassati; c) l'analisi dell'immagine multispettrale *WorldView2*, la cui caratteristica più innovativa è la disponibilità di otto bande spettrali.

Metodo

Attualmente non sono disponibili stereocoppie ad alta risoluzione che ricoprano interamente il centro storico della città dell'Aquila acquisite dopo il terremoto, ma la piattaforma EROS-B ha acquisito cinque differenti immagini monoscopiche (Tab. 2) nell'immediato post-sisma che ricoprono completamente l'intero territorio del centro storico dell'Aquila.

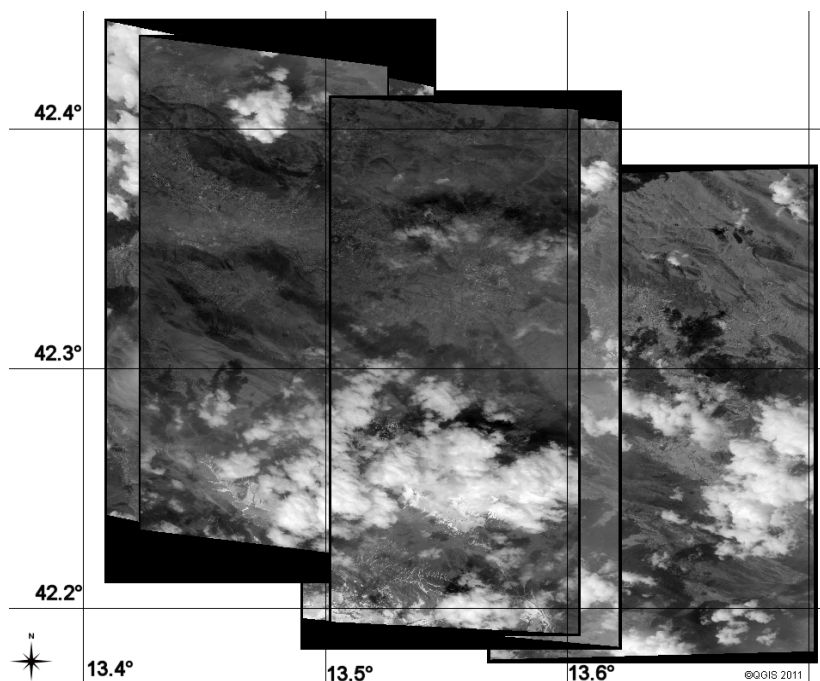


Figura 1 – Le cinque immagini EROS-B; in primo piano da ovest verso est: “geo_MBT1-e2166574” e “geo_MBT1-e2166575”, in secondo piano da ovest verso est: “geo_MBT1-e2165298”, “geo_MBT1-e2165297” e “geo_MBT1-e2165296”.

Tali immagini sono state acquisite in giorni differenti, dal 17 al 24 aprile 2009, pochi giorni dopo l'evento sismico principale (6 Aprile 2009, 3:32 a.m. ; $M_l=5.8$, $M_w= 6.2$) della sequenza sismica che ha incluso centinaia di *aftershocks* (di cui più di trenta con M_l compresa tra 3.5 e 5) (INGV, 2009). Come detto le immagini non possono considerarsi stereocoppie perché tutte sono state acquisite in giorni differenti, ma alcune di esse presentano una geometria di acquisizione assimilabile a quella di stereo coppie "*across track*" e quindi si può valutare la possibilità di estrarre un DMS da queste immagini (che chiameremo: *pseudo stereocoppie*). Si ricorda che in un caso d'emergenza, come un post-sisma, in genere non è detto che siano immediatamente disponibili delle stereocoppie ed è quindi interessante anche valutare quali informazioni è possibile estrarre con dei dati che non siano ottimali ma che potrebbero essere gli unici disponibili in tempo reale.

ID	Nome	gma_s	gma_e	GSD [m]	GSD (across) [m]
Im74	MBT1-e2166574	30,4	28,6	0,77	1,00
Im75	MBT1-e2166575	25,5	25,8	0,75	0,90
Im96	MBT1-e2165296	36,2	35,1	0,83	1,30
Im97	MBT1-e2165297	35,3	35,5	0,83	1,20
Im98	MBT1-e2165298	38,4	39,2	0,87	1,40

Tabella 2 – Principali caratteristiche delle 5 immagini EROS-B, la ".74" e la ".98" sono usate utilizzate come "*pseudo-stereocoppia*".

Il principale svantaggio delle pseudo stereocoppie è che le condizioni di illuminazione delle cinque immagini non sono le medesime e quindi le ombre e le condizioni radiometriche dell'immagine possono essere molto differenti e causare problemi per il *matching* automatico. Un secondo problema è la differente copertura nuvolosa delle due immagini che comporta la riduzione della porzione di immagine utilizzabile per l'estrazione del DSM alle sole aree visibili in entrambe le immagini.

Per l'orientamento delle immagini e l'estrazione del DSM è stato usato il software *Orthoengine* dove è implementato il modello rigoroso sviluppato da Dr. Thierry Toutin (Toutin, 2004). I punti di controllo a terra (GCPs e CPs) sono stati estratti dalla cartografia numerica della regione Abruzzo scala 1:5000 (accuratezza attesa: 1m in planimetria e 1.8m in altimetria). La stessa cartografia è stata utilizzata per estrarre il DEM necessario per ortorettificare l'immagine multi spettrale. Si deve quindi sottolineare che l'accuratezza del DEM ottenuta dalla mappa è idonea (Toutin, 2004) mentre utilizzare punti di controllo ottenuti dalla cartografia non garantisce la massima accuratezza per questo tipo d'immagini; sfortunatamente un rilievo diretto sul posto per poter acquisire i GCPs e CPs direttamente con tecniche GNSS non è ancora possibile perché, a due anni dall'evento, gran parte del centro storico non è accessibile.

In questa fase della sperimentazione il DSM estratto dalla pseudo-stereocoppia ha fornito un'informazione altimetrica discontinua (Fig. 3) dove sono presenti molti *pixel* sui quali l'estrazione del DSM non è riuscita ("*failure pixels*"). Ovviamente molti dei "*failure pixels*" corrispondono a porzioni delle immagini su cui è presente copertura nuvolosa in una o in entrambe le immagini utilizzate; è comunque possibile valutare la restante parte del DSM ("*successful pixels*") è sufficientemente ampia per effettuare un confronto con il dato da cartografia.

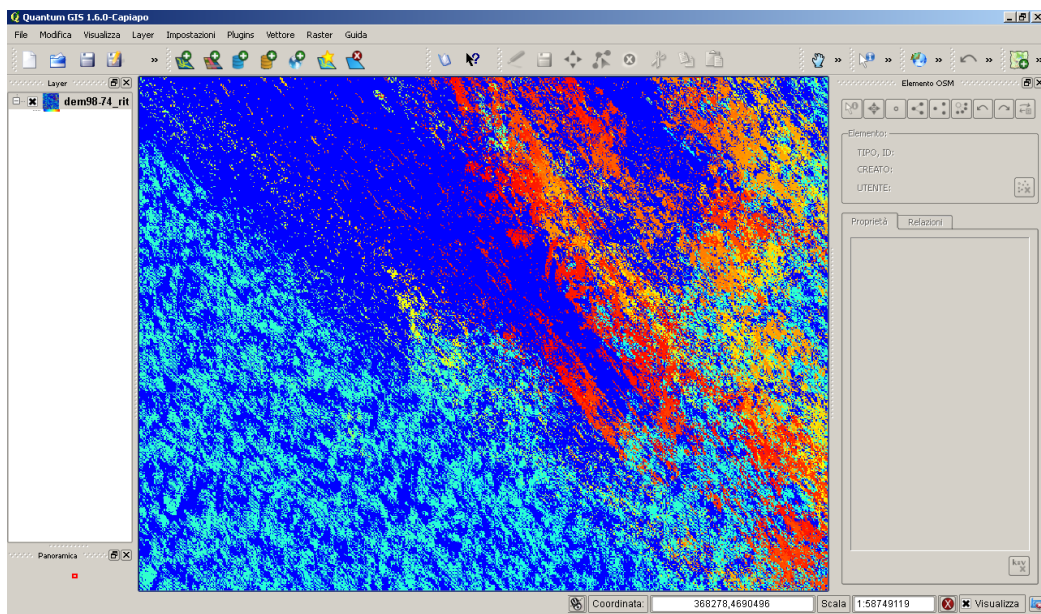


Figura 3 – Ritaglio del DSM ottenuto da pseudo stereocoppie (larghezza approssimativa 1Km); in blu “failure pixels”.

La cartografia 1:5000 della Regione Abruzzo è stata utilizzata per ottenere un modello digitale della situazione pre-sisma; per limitare “effetti di bordo” e falsi positivi riscontrati in precedenti sperimentazioni (Baiocchi et al., 2010) si è deciso di realizzare un DSM che contenesse solo i tetti degli edifici; quest’operazione è stata eseguita in ambiente GRASS.

Il centro storico dell’Aquila è contenuto in 4 elementi della cartografia tecnica regionale scala 1:5000; la prima operazione eseguita è stata quella di filtrare le informazioni contenute nei file “.shp” in modo da ottenere dei file contenenti solo gli elementi di interesse per l’estrazione di un modello digitale dei tetti; in particolare i file “.shp” contenenti le polilinee sono stati filtrati in modo da selezionare solo le tre classi di curve di livello: “principali”, “intermedie” e “ausiliare”. I file “.shp” contenenti i punti sono stati filtrati in modo da eliminare tutte le classi tranne quella denominata “quote in gronda”.

Il comando del modulo GRASS utilizzato per filtrare i dati è *v.extract* che è in grado di operare delle query su un layer vettoriale.

Il modello digitale della superficie contenente solo le quote dei tetti, è stato calcolato usando il modulo di GRASS *v.surf.rst*; con questo comando si può operare un’interpolazione su punti partendo da punti quotati o curve di livello; l’algoritmo applica il metodo dell’interpolazione *Spline*, regolarizzato con una parametro di tensione.

La sintassi è la seguente:

```
v.surf.rst [-ctd] input=name [layer=integer] [zcolumn=string] [where=sql_query] [elev=name]
[slope=name] [aspect=name] [pcurv=name] [tcurv=name] [mcurv=name] [maskmap=name]
[tension=float] [smooth=float] [scolumn=string] [segmax=integer] [npmin=integer] [dmin=float]
[dmax=float] [zmult=float] [devi=string] [cvdev=name] [treefile=name] [overfile=name]
[theta=float] [scalex=float] [--overwrite] [--verbose] [--quiet]
```

Il parametro di tensione funziona come parametro di “*rescaling*” cioè tensioni alte aumentano le distanze tra i punti e riducono il *range* d’influenza di ogni punto. Al contrario tensioni basse diminuiscono le distanze tra i punti e ne aumentano il *range* d’influenza. Il parametro di *smoothing* controlla lo scostamento tra il singolo punto e la superficie risultante ed è molto efficace nella riduzione di eventuale rumore nei dati preservando però le proprietà geometriche della superficie. L’utente può inoltre definire una mappa raster, detta *maskmap*, che potrà essere usata per indicare all’algoritmo di non utilizzare le celle che presentano valore zero o NULL nella maschera stessa.

Da questa sperimentazione sembrerebbe che GRASS non possa implementare i poligoni rappresentanti gli edifici come “*Break Lines*”; questa sarebbe una limitazione nella corretta estrazione di un “modello dei tetti” poiché si potrebbero verificare delle erronee correlazioni tra quote di tetti adiacenti (Fig. 4).

Nella figura 4 è anche possibile osservare che, probabilmente, sono presenti degli errori di *database* nella cartografia numerica originale: ad esempio alcuni poligoni classificati come edifici sono troppo estesi per rappresentare dei singoli fabbricati ma probabilmente rappresentano interi isolati con una singola primitiva.

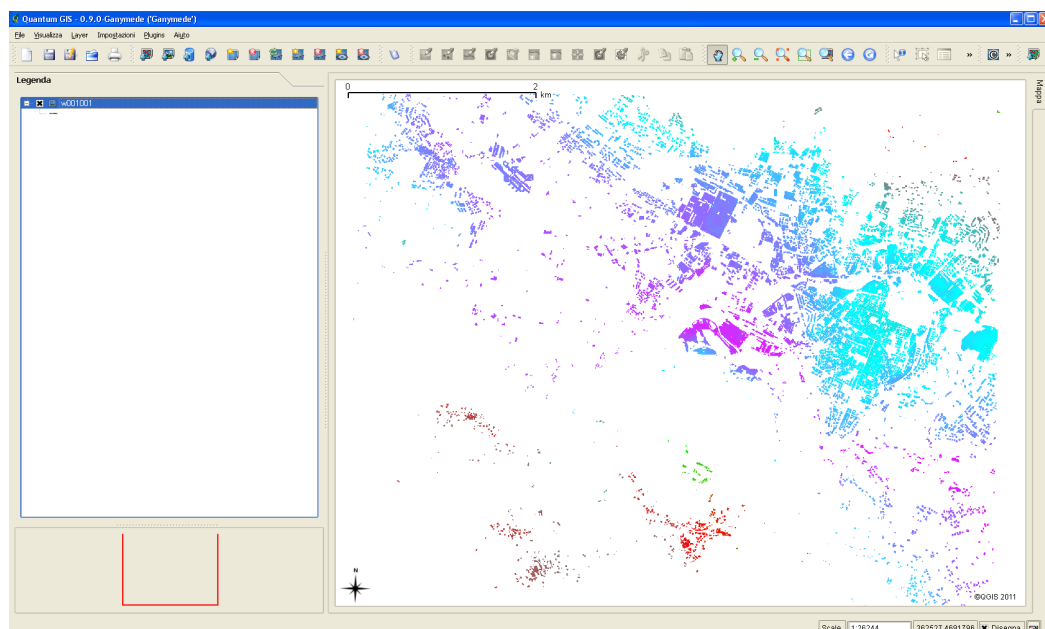


Figura 4 – Ritaglio del “modello digitale dei tetti” ottenuto.

Per quanto riguarda la classificazione multispettrale è stata, invece, utilizzata un’immagine multispettrale *WorldView 2* con le seguenti caratteristiche:

- risoluzione geometrica pancromatica: 0.5 m
- risoluzione geometrica multispettrale: 1.8 m
- 8 bande spettrali: oltre alle classiche bande *RED*, *GREEN*, *BLU* e *NIR*, sono presenti anche le bande *COASTAL BLUE*, *YELLOW*, *RED EDGE* e *NEAR INFRARED-2*

Le nuove quattro bande sono state introdotte per migliorare, in particolare, l’identificazione della vegetazione e della presenza di acqua, ma anche nel nostro caso si sono dimostrate utili ad una migliore discriminazione delle varie classi di interesse.

Le elaborazioni sono state effettuate sull'immagine pansharped (0.5 m di risoluzione) ottenuta con il software Envi ed è stata eseguita una classificazione multispettrale supervisionata con l'algoritmo di massima verosimiglianza implementato sempre in Envi 4.8 (Fig. 5).



Figura 5 – Area del centro storico dell'Aquila dove è stata eseguita la classificazione (ampiezza 1Km²).

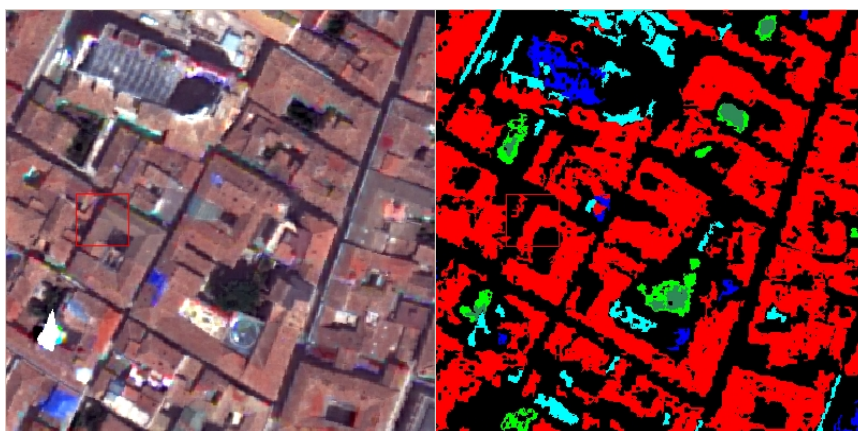


Figura 6 – Dettaglio del tetto collassato della chiesa in Piazza Santa Maria Paganica (nell'immagine a sinistra in blu).

Sono state create differenti ROI: strade, piazze, ombre, vegetazione e tre differenti classi di tetti in funzione della risposta radiometrica ("tetti chiari", "tetti scuri" e "tetti rossi").

Nell'area investigata sono presenti edifici gravemente danneggiati ma non tutti sono stati correttamente identificati dalla classificazione multispettrale (Fig. 6); questo risultato è probabilmente causato dal tipo particolare di danno che il terremoto ha prodotto nel centro storico della città: la maggior parte dei danni non interessa la copertura (visibile sulle immagini) ma le strutture interne degli edifici.

In precedenti sperimentazioni l'applicazione di simili tecniche (Ajmar et al., 2010), (Baiocchi et al., 2010) ha permesso l'identificazione di un maggior numero di stabili danneggiati probabilmente per le differenti caratteristiche del tipo di danno subito dagli edifici (rispetto alla situazione del centro storico dell'Aquila sono presenti un numero maggiore di edifici effettivamente crollati).

Risultati

Il modello digitale dei tetti ottenuto dalla cartografia 1:5000 (Fig. 4) è stato confrontato con il DSM ottenuto dalle pseudo stereocoppie in modo da ottenere un modello digitale che rappresenta le differenze di quota dei tetti prima e dopo l'evento sismico (Fig. 7).

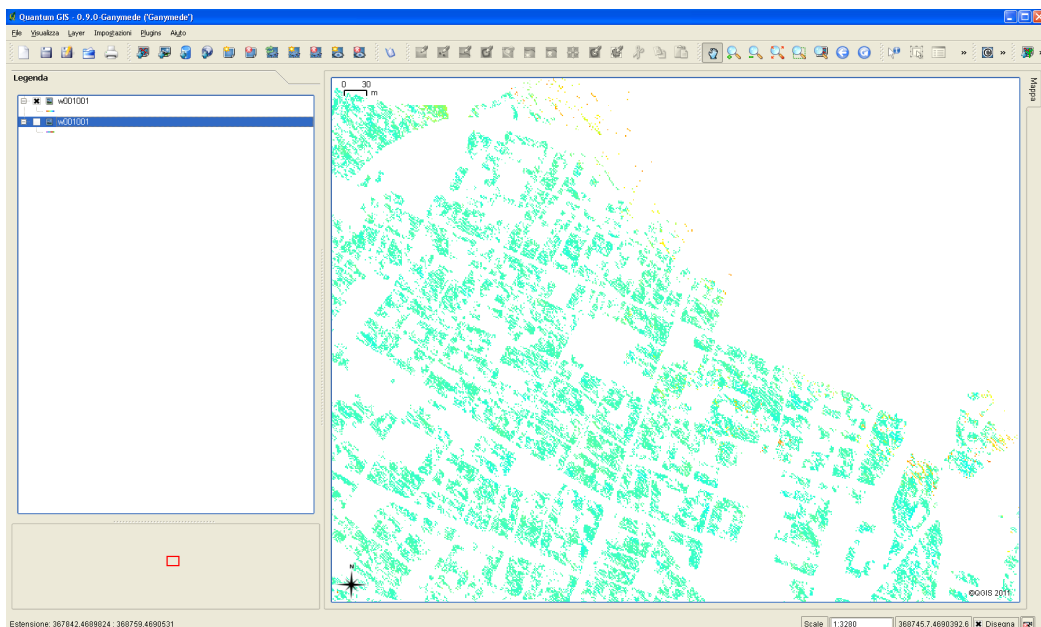


Figura 7 – Dettaglio del modello digitale ottenuto differenziando le quote dei tetti estratte da cartografia e quelle estratte dalla pseudo stereocoppia. Si noti che il crollo della chiesa in Piazza Santa Maria Paganica non è osservabile in quanto gli edifici religiosi non sono rappresentati nella cartografia regionale.

Ovviamente la differenza è stata calcolata solo per i *pixel* che presentano un valore di quota in entrambi i modelli, mentre nel modello finale delle differenze sono stati riportati come “no data value” i *pixel* corrispondenti ai “no data value” o “failure pixels” in uno od entrambi i modelli di partenza.

Con questo metodo sono stati identificati alcuni edifici crollati, anche se non in gran numero, ma bisogna ricordare, ancora una volta, che l'evento sismico dell'Aquila ha causato danni, anche gravi, a molti edifici, ma pochi di questi sono effettivamente crollati. Ciò probabilmente è dovuto allo specifico tipo di urbanizzazione caratteristico dei centri urbani.

Conclusioni e sviluppi futuri

Il risultati di questo lavoro sono da considerarsi preliminari; la metodologia applicata per l'analisi degli edifici crollati dell'Aquila è già stata utilizzata per altre aree interessate da eventi sismici ottenendo dei risultati significativi (Baiocchi et al., 2010).

Le pseudo stereocoppie EROS-B hanno prodotto un DSM discontinuo ma sicuramente l'analisi di tali immagini va ulteriormente approfondito, ad esempio è assolutamente necessario effettuare un mascheramento della copertura nuvolosa allo scopo di risolvere i problemi di correlazione e per ridurre il tempo di estrazione del DSM che attualmente è di circa 2 giorni.

L'uso della cartografia digitale per creare un modello delle quote "prima dell'evento" sembra risolvere alcune problematiche incontrate in precedenti sperimentazioni, come ad esempio rappresentare correttamente le strade nei centri urbani, data la loro ridotta ampiezza.

La classificazione ottenuta con l'immagine multispettrale ad otto bande sembra offrire nuove possibilità per l'identificazione automatica degli edifici crollati e delle macerie.

Tuttavia è corretto sottolineare che attualmente entrambe queste metodologie non producono risultati ottimali in questo tipo specifico di centro urbanizzato per l'identificazione dei danni dovuti ad un evento sismico dove la maggior parte degli edifici non sono crollati.

Sicuramente la tecnica descritta in questo lavoro verrà applicata ad altre zone della città dell'Aquila (ad esempio la frazione di Onna) dove sono stati riscontrati un maggior numero di edifici crollati.

Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare "IPT s.r.l." per avere fornito le immagini EROS-B.

Bibliografia

Ajmar A., Boccardo P., Giulio Tonolo F., Veloso C. (2010), "*Earthquake damage assessment using remote sensing imagery. The Haiti case study.*", In: Geoinformation for Disaster and Risk Managment. Examples and best practices, Altan O., Backhaus R., Boccardo P., Zlatanova S., jb gis (dnk), pp. 7.; 31- 37, ISBN: 9788790907884.

Baiocchi V., Brigante R. and Radicioni F. (2010). "Three-dimensional multispectral classification and its application to early seismic damage assessment." *Italian Journal of Remote sensing*, vol. 42; p. 1-17, issn: 1129-8596

INGV (Italian National Agency for Geophysics and Vulcanology) (2009), The L'Aquila seismic sequence - April 2009, www.ingv.it

Toutin T., 2004. "Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods" (review paper). *International Journal of Remote Sensing*, 25 (10): 1893-1924.

Individuazione della linea di costa mediante immagini satellitari multispettrali ad alta risoluzione

Valerio Baiocchi (*), Raffaella Brigante (**), Donatella Dominicin (***), Fabio Radicioni (**)

(*) DICEA – Dipartimento Ingegneria Civile Edile ed Ambientale, Area di Geodesia e Geomatica, “Sapienza”

Università di Roma, Via Eudossiana 18, I-00184 Roma, valerio.baiocchi@uniroma1.it

(**) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Perugia, topos@unipg.it

(***) Dipartimento di Architettura e Urbanistica, Università degli Studi dell'Aquila, via Gronchi 12

Zona industriale di Pile, 67100, L'Aquila, donatella.dominici@univaq.it

Riassunto

La sperimentazione in oggetto è volta alla definizione di una metodologia di individuazione della linea di costa, o linea istantanea di riva, tramite delle immagini riprese dal satellite WorldView 2, con 8 bande spettrali, aventi risoluzione geometrica pari a 0.5 m per l'immagine pancromatica e 1.8 m per quella multispettrale. In particolare viene utilizzata una metodologia di classificazione *pixel based* con la quale si identificano i vari tipi di copertura del suolo, oltre ad effettuare combinazioni tra le 8 bande disponibili.

Le 8 bande in cui è ripresa l'immagine consentono di ottenere buoni risultati sia nel processo classificativo sia nella combinazione tra bande, tramite gli algoritmi NDVI, NDWI, SAM, FM, riguardo alla identificazione delle varie coperture del suolo e in particolare della linea di separazione sabbia asciutta-sabbia bagnata. Sicuramente risultati migliori possono essere ottenuti utilizzando dati altimetrici (modelli di geoide e modelli digitali del terreno) unitamente a quelli radiometrici presenti sulle immagini.

Abstract

In the present paper is shown a methodology for coastline identification from WorldView 2 images, available in 8 spectral bands, with 0.5 m of spatial resolution for panchromatic image and 1.8 m for the multispectral image. In particular, a "pixel based" multispectral classification was used to identify various types of land cover. The 8 bands allow to get good results both in the classification process and with NDVI NDWI, SAM, FM algorithms, for the identification of various land cover and in particular to separate dry sand and wet sand. Better results surely can be obtained by using elevation data (geoid models and digital terrain models) as well as those present on the radiometric image.

Introduzione

L'ambiente costiero rappresenta la fascia di transizione tra le terre emerse ed il mare. Si tratta di una risorsa naturale ed economica di straordinario valore, sottoposta però ad una continua ed incessante trasformazione. L'ambiente costiero è infatti un sistema altamente dinamico dove i fenomeni di erosione, e quindi di arretramento o di avanzamento della linea di costa, sono controllati da numerosi fattori meteorologici, geologici, biologici ed antropici (si pensi alla crescente urbanizzazione del territorio costiero a partire dal secondo dopoguerra, legata allo sviluppo socio-economico, con il continuo incremento di attività industriali, commerciali e turistico-ricreative con la necessità di nuove strutture a supporto). Molti studiosi sia oggi che in passato si sono occupati delle problematiche relative alla definizione e alla restituzione della linea di costa, argomento piuttosto complesso a causa delle numerose incertezze che emergono sia nell'individuare una

definizione chiara e universalmente accettata di linea di costa, sia nel definire idonei metodi di monitoraggio del litorale e dei suoi cambiamenti. Attualmente il telerilevamento sta divenendo uno dei metodi più utilizzati per studi di questo tipo, grazie agli enormi vantaggi rappresentati da questa tecnica (possibilità di riprendere aree vaste in un'unica immagine, alta risoluzione geometrica dei sensori montati a bordo dei satelliti di ultima generazione, capacità di riprendere la scena in più bande spettrali,...).

Modificazioni dell'ambiente costiero

Con il termine "dinamica costiera" si indica il complesso dei fenomeni che governano l'evoluzione della fascia costiera nel tempo. La descrizione dell'evoluzione della linea di costa richiede l'analisi delle dinamiche sia fluviali che marine; dalle terre emerse le coste ricevono, infatti, attraverso i fiumi, gran parte dei sedimenti che alimentano le spiagge. Il mare, mediante l'azione delle onde e delle correnti, contribuisce in modo determinante a modellare la conformazione della costa, svolgendo una triplice azione di erosione, trasporto e accumulo dei sedimenti costieri. Tale opera modellatrice del mare può portare o all'arretramento della linea di costa, quando prevalgono i suoi effetti erosivi, o ad un avanzamento, nel caso siano preponderanti i processi di accumulo, spesso con entrambi i fenomeni agenti contemporaneamente in settori costieri contigui. In Italia si alternano due principali tipologie morfologiche costiere naturali:

- coste alte e rocciose (costa morfologicamente accidentata e articolata, con pareti molto ripide, spesso subverticali, parallele alla linea di riva) per circa il 34% del totale;
- coste basse e sabbiose (spiaggia più o meno ampia a debolissima pendenza, con eventuale presenza di sistemi dunali) per circa il 58%.

Il restante 8% è costituito da foci e coste banchinate.

L'ampiezza della fascia costiera può essere condizionata, talvolta in modo significativo, dai fenomeni di *subsidenza* ed *eustatismo*. La *subsidenza* è un processo a lungo termine di lento abbassamento del terreno, legato alla naturale costipazione dei sedimenti fini nelle pianure alluvionali, spesso acuito dall'estrazione di acqua e idrocarburi dal sottosuolo. Con il termine *eustatismo* si indicano invece le modificazioni a lungo termine, sia positive che negative, del livello del mare, legate a cause climatiche (Antonoli, Silenzi, 2007).

Inoltre, variazioni anche repentine della linea di costa possono essere indotte da movimenti tettonici, per lo più associati a terremoti di forte magnitudo. Un parametro morfologico importante è costituito dalle variazioni storiche subite dalla linea di riva, che consentono di effettuare numerose analisi mirate a definire le naturali tendenze evolutive di un litorale; è possibile in tal modo individuare le zone soggette a fenomeni erosivi o accrescitivi locali dovuti alla realizzazione di opere litoranee, calibrare modelli numerici di evoluzione della linea di riva, stimare il bilancio solido della fascia costiera, ecc.

Individuazione della linea di costa

Elemento chiave nel monitoraggio delle modificazioni dell'ambiente costiero (sia della parte emersa che sottomarina) risulta essere la determinazione della *linea di riva* e la sua *restituzione come linea di costa*. La fascia costiera è infatti quella porzione di territorio emerso e sommerso che contiene la linea di riva (figura 1) ed è sottoposta a processi geomorfologici sia continentali che marini.

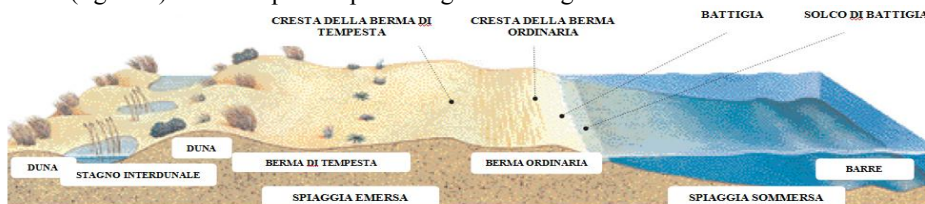


Figura 1 – Battigia: limite tra sabbia asciutta e sabbia bagnata.

La linea di riva è l'espressione più evidente di come questo settore sia particolarmente dinamico registrando in modo più o meno immediato le tendenze evolutive in corso (Cervino et al, 2010).

La valutazione della posizione e dei cambiamenti della linea di costa è una considerazione importante per scienziati, ingegneri, e coloro che sono impegnati nella gestione delle coste anche nel campo della progettazione e dell'ingegneria. La posizione del litorale e del suo cambiamento storico è in grado di fornire informazioni importanti per la progettazione di opere di protezione delle coste, piani per lo sviluppo costiero, e la taratura e la verifica dei modelli numerici (Klein et al, 2006). Alla continua crescita di interesse a cui è soggetta l'area costiera si aggiunge la preoccupazione del rischio e delle conseguenze della crescente pressione antropica (sulla costa si concentrano più dei due terzi della popolazione mondiale). Da qui la necessità di supportare la pianificazione della fascia costiera con il *monitoraggio della linea di riva* con rilievi ravvicinati nel tempo al fine di correggere le variabilità stagionali o le singolarità indotte da mareggiate intense e quindi la necessità di individuare dei metodi sempre più efficienti per la sua estrapolazione che risultino un buon compromesso tra accuratezza, costi e tempi. Un monitoraggio efficace presuppone lo sviluppo di tecnologie idonee a fornire conoscenze nel tempo utili alla salvaguardia, alla prevenzione, all'intervento e alla gestione. Non esiste un unico metodo per la modellazione di litorale, che è stato ampiamente accettato dalle comunità costiere, anche se negli ultimi dieci anni si è assistito ad un grande progresso nella tecnologia di *mapping* che va dallo sviluppo di nuove e sempre più precise apparecchiature GPS (Global Positioning System), alla messa in orbita di satelliti ad alta ed altissima risoluzione, fino allo sviluppo di dispositivi particolarmente efficienti per la valutazione della topografia costiera come il LIDAR (Light Detection And Ranging) (Tarig, 2003).

Tecniche di rilievo

In questa sede non verranno trattati i metodi di acquisizione della spiaggia sommersa, ma ci si soffermerà maggiormente sulle tecniche di rilievo della spiaggia emersa. Tra i più comuni metodi attualmente in uso si ricordano (Ivaldi, Surace, 2010):

- Indagini topografiche tradizionali (livellazione, rilievi con stazioni totali) e GPS (modalità RTK): consentono di ottenere precisioni elevate (precisioni millimetriche per quanto riguarda la livellazione geometrica, centimetriche con stazioni totali e sistemi di posizionamento GPS), ma forniscono un rilievo “per punti”;
- Immagini aeree: hanno la necessità di essere ortorettificate (mediante la conoscenza di un DSM) e mosaicate, ma forniscono un rilievo non puntuale come le tecniche precedenti, rappresentando l'intera area di studio al momento della ripresa; le precisioni ottenibili sono centimetriche-subdecimetriche, ma i costi sono elevati;
- Airborne Videografia: tecnica simile alla fotogrammetria, in cui la camera fotogrammetrica è sostituita da una telecamera. A causa di una non elevatissima risoluzione geometrica dei dati acquisiti, tale tecnica consente di effettuare un'analisi di tipo qualitativo dei cambiamenti più che quantitativo;
- Sistemi video: consentono di effettuare rilievi ad elevata frequenza (in genere ogni ora diurna) per mezzo di sistemi composti da 4-5 telecamere installati su punti prominenti del paesaggio o su supporti appositamente posizionati, che coprono una vista di 180° e permettono una copertura totale di circa 4-6 chilometri di spiaggia. L'immagine acquisita è obliqua e necessita di una operazione di *ortorettificazione* oltre che di una *georeferenziazione* (Kroon et al, 2007).
- Telerilevamento satellitare: facendo riferimento ai satelliti per il telerilevamento di ultima generazione, si può sicuramente affermare che tale tecnica sta diventando sempre più competitiva rispetto alle altre sopra menzionate. Rispetto alla fotogrammetria aerea consente un'acquisizione dei dati ed un'elaborazione degli stessi più rapida, con precisioni paragonabili data l'alta risoluzione geometrica che consente di riprodurre un dettaglio elevatissimo. Inoltre importantissima è la capacità di riprendere la scena in più bande

spettrali, consentendo di ottenere molte più informazioni rispetto a quelle estraibili indagando la scena solo nel campo del visibile e di creare delle mappe tematiche del territorio mediante classificazione multispettrale. I tempi di rivisitazione molto brevi (qualche giorno) inoltre consentono di effettuare studi di monitoraggio della zona in esame, mettendo in relazione immagini riprese in tempi diversi.

Immagini WorldView 2

Il satellite *WorldView 2*, messo in orbita nell'ottobre 2009, completa la costellazione di satelliti commerciali della società *DigitalGlobe*, già formata dai satelliti *WorldView-1* (lanciato nel 2007) e *QuickBird* (lanciato nel 2001). *WorldView-2* opera ad una quota di 770 km con un'inclinazione di 97.2° per un periodo orbitale massimo di 100 minuti. E' equipaggiato con una strumentazione che consente una grande capacità di raccolta di immagini multispettrali ad alta risoluzione, e una grande efficienza nella ripresa di immagini stereoscopiche. La risoluzione di *WorldView-2* nella banda pancromatica è di 46 cm, mentre nel multispettrale è di 1.8 m, tuttavia la distribuzione e l'uso di immagini con risoluzione maggiore di 50 cm nel pancromatico e 2 m nel multispettrale è soggetta all'approvazione del governo degli USA. L'elevata *risoluzione spaziale* permette la discriminazione dei dettagli, come i veicoli, i bassi fondali e i singoli alberi in un frutteto, mentre l'alta *risoluzione spettrale* fornisce informazioni dettagliate su diversi settori quali la qualità del manto stradale, la profondità del mare, e la salute delle piante. Le immagini sono riprese in 8 bande spettrali, infatti, oltre alle 4 bande standard, blu, verde, rosso e infrarosso vicino, *WorldView-2* include 4 nuove bande a 1.8 metri di risoluzione: *coastal blue*, *yellow*, *red edge* e *near infrared-2* (figura 2).

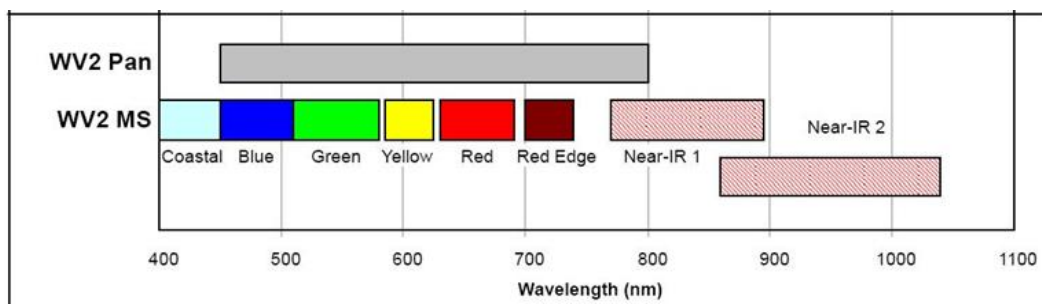


Figura 2 – Bande spettrali del satellite *WorldView 2*.

Queste bande offrono diversi vantaggi agli utenti nell'identificazione di un maggior numero di classi di copertura del suolo (ad esempio più varietà di vegetazione), nell'estrazione di un numero maggiore di *features*, nel monitoraggio dei cambiamenti dell'uso del suolo ed eventuali abusi e violazioni e nella visualizzazione delle immagini più realistica, molto più vicina alla naturale visione umana. Ulteriori informazioni sul satellite *WorldView 2* sono riportate sul sito <http://www.digitalglobe.com>.

Area di studio e materiale a disposizione

L'immagine utilizzata, concessa a scopo di ricerca dalla *Planetek Italia S.r.l.*, è stata ripresa dal satellite *WorldView-2* nella zona della baia di Salvador, capitale dello stato brasiliano di Bahia (figura 3). Salvador si trova sulle coste dell'oceano Atlantico con litorali sabbiosi e rocciosi. La terraferma è prevalentemente pianeggiante con una zona ampiamente edificata dove abitazioni e infrastrutture dominano di gran lunga sugli spazi verdi e liberi.

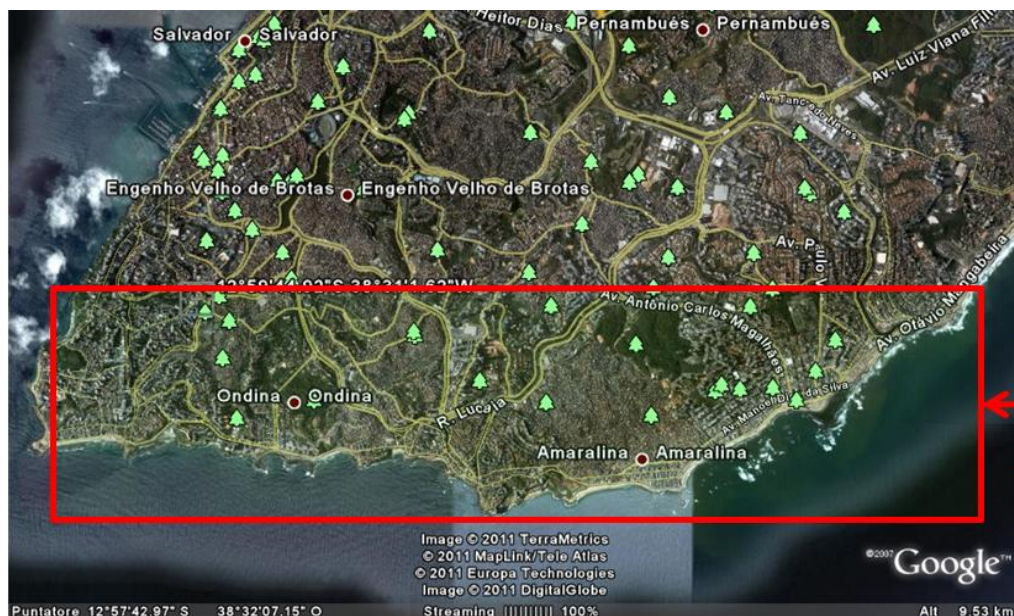


Figura 3 – Area di studio.

In questa sperimentazione si vogliono testare le potenzialità di tale immagine per l'individuazione e la restituzione della linea di costa, o meglio della *linea istantanea di riva*; in particolare la ricerca è rivolta all'individuazione di un algoritmo che permetta l'estrazione della linea di costa in modo automatico o semiautomatico. Tutte le elaborazioni sono state condotte utilizzando il software commerciale ENVI 4.7 della ITT specifico per la visualizzazione, l'analisi e la classificazione di differenti tipi di immagini telerilevate.

Analisi singole bande e combinazioni tra bande

La prima operazione effettuata nella sperimentazione in oggetto è stata la creazione dell'immagine *pansharpened* di un ritaglio rappresentativo dell'area di studio (figura 4), attraverso l'algoritmo *Gram-Schmidt*, che consente di integrare il dettaglio geometrico dell'immagine pancromatica a 0,5 m di risoluzione spaziale con l'informazione radiometrica dell'immagine multispettrale a otto bande ma a risoluzione spaziale più bassa (risoluzione di 1,8 m), per produrre un'immagine multispettrale ad elevata risoluzione (figura 5).

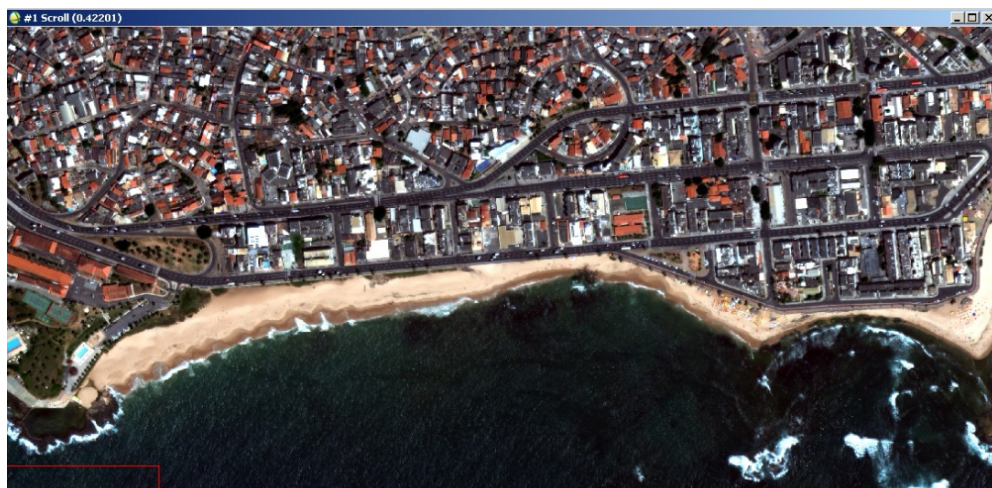


Figura 4 – Ritaglio rappresentativo dell'area di studio.

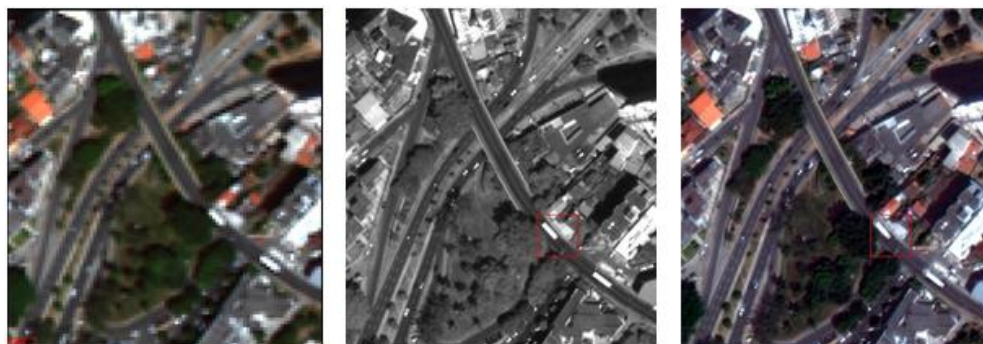


Figura 5 – Immagine multispettrale, pancromatica e pansharpened.

Dapprima sono state eseguite varie prove nelle diverse bande caricate singolarmente e come combinazioni di bande (colori reali e falsi colori) per individuare quale di queste risultasse particolarmente sensibile alla presenza di acqua. Successivamente sono state applicate tecniche di classificazione *pixel-based* e sono stati sfruttati alcuni algoritmi utilizzati nello studio della vegetazione e dell'acqua (come l'indice di vegetazione normalizzato NDVI e l'indice NDWI) in modo da poter evidenziare meglio la collocazione della linea di costa. Tra le 8 bande disponibili, quella che maggiormente evidenzia il contrasto tra sabbia asciutta (molto chiara) e sabbia bagnata (grigio scuro) è la NRI 2, mentre stessa differenziazione viene messa maggiormente in risalto dalle combinazioni tra le tre bande Yellow-Green-Blue e NR1-NR2-Red Edge. Sono state effettuate anche delle sezioni in cui in ordinata è rappresentato il valore radiometrico dell'immagine, che mette in risalto un brusco cambiamento di pendenza della curva nel passaggio tra sabbia asciutta e sabbia bagnata (figura 6).

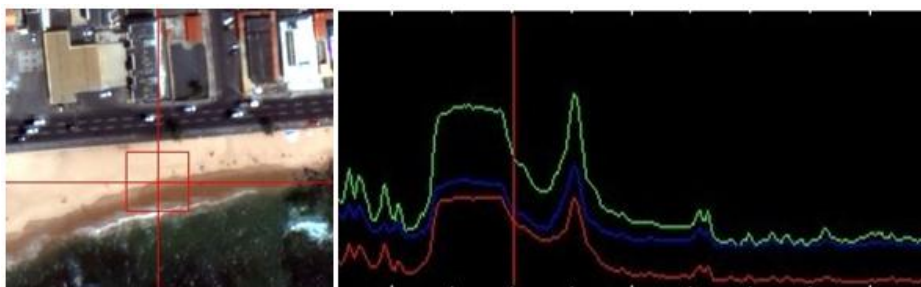


Figura 6 – Profilo dell'immagine nelle bande RGB.

Successivamente si è valutato l'indice di Vegetazione NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), un algoritmo semplice ma altamente affidabile per stimare la densità e lo stato della vegetazione, che sfrutta la diversa risposta della copertura vegetale alle bande spettrali del visibile (rosso) e del vicino infrarosso, e fornisce un valore numerico adimensionale compreso tra -1 e +1. La sua espressione è la seguente:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Quest'indice può essere utilizzato anche per ottenere utili informazioni sulla linea di costa; infatti si è osservato che sull'interfaccia acqua/sabbia l'indice NDVI assume valori compresi tra -0,1 e -0,5. Un altro indice utilizzato per lo studio delle aree coperte d'acqua è il NDWI (*Normalized Difference Water Index*), analogo al NDVI, ma che utilizza la banda del verde al posto del rosso.

$$NDWI = \frac{NIR - G}{NIR + G}$$

In questo caso l'acqua assume valori positivi mentre il terreno e la vegetazione assumono valori negativi; la sabbia asciutta, con alta riflettanza sia nel verde che nel NIR presenta valori positivi ma molto vicini allo zero.

Individuazione automatica della vegetazione e delle masse d'acqua

Il software Envi consente di effettuare una completa analisi sulla presenza e sullo stato di salute della vegetazione presente nell'immagine, sfruttando le informazioni contenute nelle bande del rosso e dell'infrarosso mediante l'algoritmo *vegetation delineation*. Tale algoritmo crea in maniera automatica tre classi di vegetazione (sparsa, moderata e densa) che possono essere utilizzate in una classificazione multispettrale dell'immagine come *Region of interest (ROI)* (figura 7).

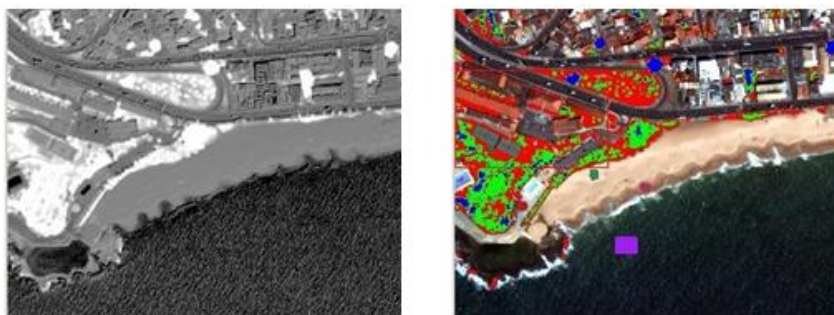


Figura 7 – NDVI e ROI ottenute dall'algoritmo *vegetation delineation* (in rosso vegetazione sparsa, in verde vegetazione moderata e in blu vegetazione densa).

Un processo analogo, sempre utilizzabile in Envi, consente di studiare la presenza di aree coperte d'acqua, sfruttando le informazioni contenute nelle bande del verde, blu, rosso e infrarosso, separandole in *Muddy Water* e *Dark Water*, tramite gli algoritmi MF (*Matched Filtering*), SAM (*Spectral Angle Mapper*) e il rapporto fra i due, che meglio evidenzia la separazione tra sabbia asciutta e sabbia bagnata (figura 8).



Figura 8 – Il rapporto MF/SAM evidenziata con una colorazione molto chiara la sabbia bagnata.

Un profilo effettuato su questa immagine consente di evidenziare delle brusche variazioni della pendenza della curva in prossimità dei passaggi tra sabbia asciutta-sabbia bagnata e sabbia bagnata-acqua. In figura 9 in verde è evidenziata la zona corrispondente alla sabbia asciutta, in giallo la sabbia bagnata e in ciano il mare. In corrispondenza delle frecce rosse si identificano i passaggi tra sabbia asciutta-sabbia bagnata e sabbia bagnata-acqua.

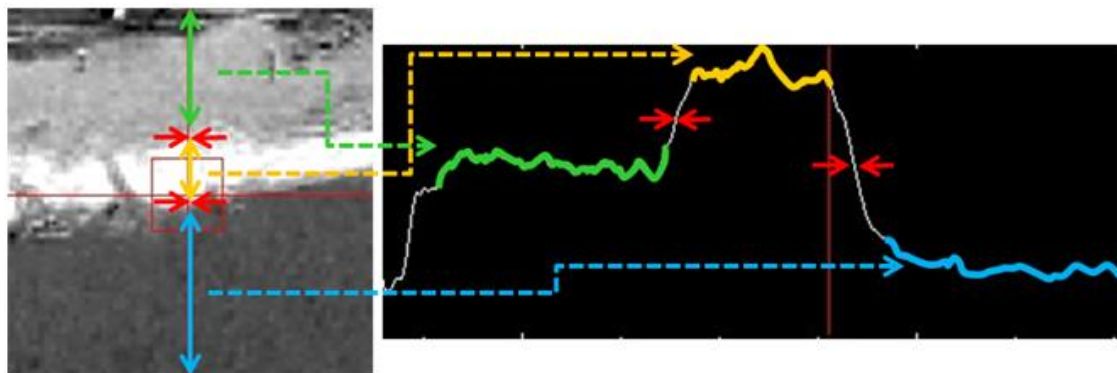


Figura 9 – Passaggio tra sabbia asciutta-sabbia bagnata e sabbia bagnata-acqua sulla curva rappresentativa del rapporto FM/SAM.

In figura 10 sono state sovrapposte tutte le curve ottenute in corrispondenza della stessa sezione rappresentanti gli indici NDVI, NDWI, FM, SAM, FM/SAM. Tutte le curve hanno andamento simile, soprattutto in corrispondenza dei passaggi tra sabbia asciutta-sabbia bagnata e sabbia bagnata-acqua, in cui si nota una brusca variazione di pendenza.

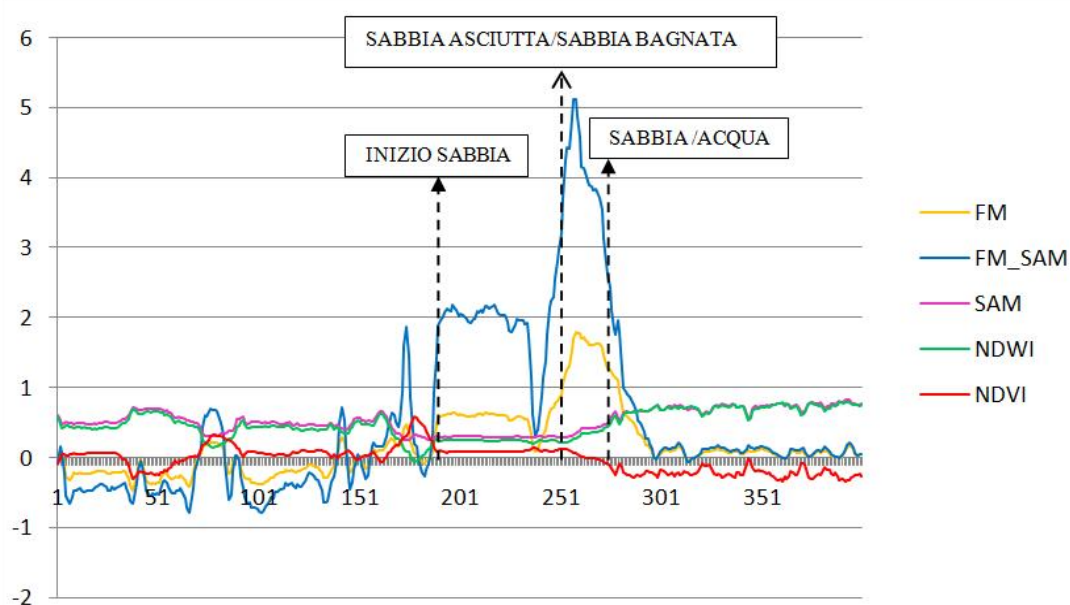


Figura 10 – Andamento NDVI, NDWI, SAM, FM, FM/SAM.

Classificazione multispettrale

In ultima analisi sull'area di studio è stata effettuata una classificazione multispettrale supervisionata mediante l'algoritmo *Maximum Likelihood* (Massima Verosimiglianza). Sono state definite diverse regioni di interesse (ROI) tra cui 4 diversi tipi di edifici, sabbia asciutta, sabbia bagnata, strade, piscine, marciapiedi, ombre, onde, mare e letre classi per la vegetazione individuate automaticamente dallo strumento di *Envi vegetation delineation*. Come risultato si è ottenuta una nuova immagine in cui ad ogni pixel è associato un *digital number* rappresentativo della classe di copertura del suolo corrispondente (figura 11).



Figura 11 – Immagine classificata.

Le classi relative agli edifici e alla vegetazione sono quelle che meglio sono state individuate, come mostrato in figura 12, ma anche in corrispondenza della separazione sabbia asciutta-sabbia bagnata-mare si è ottenuto un buon riconoscimento della copertura del suolo.



Figura 12 – Risultati della classificazione multi spettrale.

Si sono inoltre effettuate ulteriori elaborazioni in modo da evidenziare maggiormente la separazione tra sabbia asciutta e sabbia bagnata, inglobando tutte le classi individuate in due sole categorie (zone in giallo e in marrone in figura 13). La separazione tra queste due classi può essere vettorializzata ottenendo uno *shapefile* (contorno rosso) utilizzabile in successive analisi.

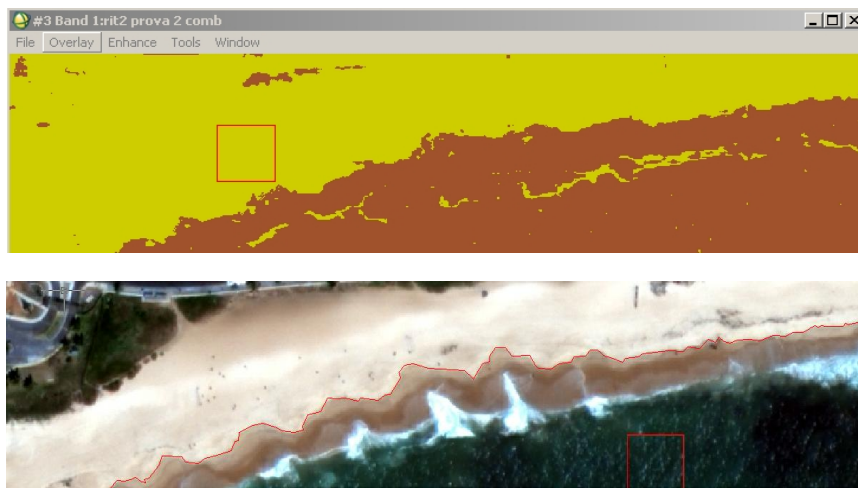


Figura 13 – Separazione sabbia asciutta-sabbia bagnata e settorializzazione.

Problematiche e sviluppi futuri

Al fine di testare l'accuratezza e l'affidabilità delle procedure sperimentate, si dovrà procedere ad un confronto fra la linea di riva estratta dalle immagini satellitari (sia tramite fotointerpretazione che con tecniche di riconoscimento automatico e semiautomatico) e quelle ottenute da cartografia per un controllo grossolano o tramite misure a terra GPS o tradizionali condotte contemporaneamente o a poche ore di distanza dall'acquisizione dell'immagine per un controllo più di dettaglio. Per tale motivo è in corso una nuova sperimentazione su alcune immagini satellitari WorldView 2 per una zona costiera adriatica (Ortona) di cui si ha a disposizione cartografia di riferimento e per la quale sono previsti rilievi topografici tradizionali e GPS da usare per la validazione dei risultati. Per tale area si pensa inoltre di integrare i risultati ottenuti dalle immagini WorldView, puramente planimetrici, con informazioni altimetriche ottenute dall'intersezione tra un modello digitale della superficie (ottenibile da cartografia o da immagini stereo) con un modello di geoidi relativo alla stessa zona.

I risultati ottenuti rappresentano sicuramente uno spunto importante per l'utilizzo di tale metodologia per un possibile *aggiornamento delle carte tecniche regionali* e in particolare per l'aggiornamento delle *linee di costa*. Infatti le tecniche di controllo finora utilizzate, rilievo classico e GPS ed indagini con fotogrammetria aerea, sono sicuramente valide per ciò che concerne la precisione che da esse si può ottenere, tuttavia possono non risultare particolarmente pratiche ed economiche per un monitoraggio continuo della zona costiera. In particolare il telerilevamento offre la possibilità di poter elaborare la stessa scena con una certa cadenza temporale consentendo di utilizzare questo tipo di prodotti per il monitoraggio continuo della linea di costa con tempi più rapidi e a costi più vantaggiosi rispetto ad altre tecniche di rilievo.

Riferimenti bibliografici

Antonioli F. e Silenzi S., 2007, "Variazioni relative del livello del mare e vulnerabilità delle pianure costiere", Quaderni della società geologica italiana, n.2, ottobre 2007.

Cervino R., Ivaldi R., Surace L., 2010, "Il ruolo dell'Istituto lidrografico della Marina nel monitoraggio costiero", Atti del Terzo Simposio *Il monitoraggio costiero mediterraneo: problematiche e tecniche di misura*, Livorno, 15-16-17 giugno 2010.

Klein M., Lichter M., 2006, "Monitoring changes in shoreline position adjacent to the Hadera power station, Israel", *Applied Geography*, 26, pp. 210–226, Elsevier, 2006.

Tarig A., 2003, "New Methods for positional quality assessment and change analysis of shoreline features", Tesi di dottorato, School of the Ohio State University, 2003.

Ivaldi R., Surace L., 2010: "Rapid procedures for coastal environmental assessment: case histories in Liguria and Tyrrhnia littoral", Atti del Terzo Simposio *Il monitoraggio costiero mediterraneo: problematiche e tecniche di misura*, Livorno 15-16-17 giugno 2010.

Kroon A., Davidson M.A., Aarninkhof S.G.J., Archetti R., Armaroli C., Gonzalez M., Medri S., Osorio A., Aagaard T., Holman R.A., Spanhoff R., 2007, "Application of remote sensing video systems to coastline management problems", *Coastal Engineering*, 54, pp. 493–505, Elsevier, 2007

Envi User Guide, 2010

<http://www.digitalglobe.com>

Il rilievo LIDAR del Cenote Pozzo del Merro (Sant'Angelo Romano)

Valerio Baiocchi (*), Rosanna Cazzella (**), Francesca Giannone (*), Loredana Liso (***),
Alberico Sonnessa (*) Mario Vecchio (**)

(*) Area Geodesia e Geomatica, DICEA, "Sapienza" Università di Roma, Via Eudossiana, 18 00184 Roma

Tel. +390644585068, Fax +3906445855515, e-mail, valerio.baiocchi@uniroma1.it

(**) Provincia di Roma, Dip.to V Servizio I "Ambiente (aree protette - parchi regionali)"

Via Tiburtina 691, 00100 Roma

(***) Amministrazione provinciale di Roma, Servizio Tutela Acque, Via Tiburtina 691, 00100 Roma

Riassunto

Il sito denominato "Pozzo del Merro" è secondo alcuni autori classificabile come *Cenote*, secondo altri come cavità carsica allagata, se si vuole considerare come *Cenote* solo una cavità di una certa ampiezza. In entrambi i casi il sito risulta, con i suoi 392 metri di profondità, la cavità carsica allagata più profonda del mondo, ovviamente tra quelle già misurate. Il sito, nonostante la sua vicinanza a Roma, è poco conosciuto e finora rilevato solo in maniera speditiva, in quanto la particolare morfologia dell'area, non ha finora permesso di rilevarne in maniera rigorosa le caratteristiche topografiche e geomorfologiche. Precedenti rilievi con tecniche topografiche integrate hanno permesso di rilevare alcune delle caratteristiche plano altimetriche, ma la notevole copertura vegetale e la complessa struttura dell'interno del pozzo stesso ha suggerito l'impiego di un LIDAR terrestre. Tale rilievo permetterà lo studio geomorfologico da parte dei ricercatori e la "visita virtuale" da parte del pubblico di un sito altrimenti inaccessibile.

Il Pozzo del Merro è sottoposto a tutela, in quanto facente parte della Riserva Naturale Macchia di Gattaceca e Macchia del Barco, istituita con legge Regione Lazio 29/97 la cui gestione è affidata alla Provincia di Roma.

Abstract

The site identified as "Pozzo del Merro" (Well of the "Merro") according some authors is a "Cenote", according to others is a carsic flooded deep, because they consider "Cenote" only a hollow of a certain wideness. In both cases the site, with its 392 meters of deepness, is the deepest carsic flooded hollow in the world; obviously between those already measured. The site, despite its proximity to the city of Rome, it is not very notorious and till now an actual geomatic survey was never performed so also a geomorphologic study was impossible. Earlier surveys with integrated topographical techniques allowed to measure the coordinates of some spot points but the deep coverage of trees and bushes and the complex morphology of the inner of the well suggested a terrestrial LIDAR survey. Such survey will allow the geomorphologic study for the scientific community and its "virtual visit" from the public of a site otherwise inaccessible. The Well of the Merro area is protected, because it's in the area of provincial wildlife park of "Macchia di Gattaceca" and "Macchia di Barco", founded with Region Lazio law no. 22/97. It's protection is under the responsibility of the Provincial administration of Rome.

Inquadramento dell'area

La Riserva Naturale della "Macchia di Gattaceca e Macchia del Barco" si estende per circa 996 ettari nei comuni di Mentana, Monterotondo e S. Angelo Romano in provincia di Roma, tra la valle del Tevere ed i rilievi carbonatici dei Monti Cornicolani.

La riserva, istituita con Legge Regionale n. 29 del 1997, è gestita dall'Amministrazione Provinciale di Roma. L'area è tutelata, sia per l'elevata peculiarità della flora e fauna presente nei suoi boschi che per i numerosi fenomeni carsici che la caratterizzano, quali doline, pozzi, grotte. Tra questi, particolare rilevanza assume il pozzo del Merro: imponente voragine da sprofondamento (Sinkhole) che allo stato attuale rappresenta la cavità allagata più profonda del mondo. (G. Caramanna, M. Gary, 2004).

Il Pozzo del Merro, parte integrante della Riserva Naturale della "Macchia di Gattaceca e Macchia del Barco", ricade nel comune di S. Angelo Romano. Il Pozzo si apre sul piano campagna con una forma subcircolare di circa 150 m di diametro. La morfologia, caratterizzata da un andamento imbutiforme, si restringe progressivamente fino a raggiungere, circa 80 metri più in basso, un diametro inferiore ai 30 m sulla superficie dello specchio d'acqua. (U. Calamita, G. Caramanna, M. Giardini, 2002). La parte allagata del pozzo rimane praticamente inesplorata fino al 1998-1999 quando, ad opera di Caramanna e Malatesta, vengono effettuate le prime immersioni scientifiche. Le indagini proseguono negli anni successivi e con la collaborazione tra Provincia di Roma, Nucleo Sommozzatori e SAF del Comando Provinciale di Roma dei Vigili del Fuoco e l'Università di Roma "La Sapienza" prima e il Dipartimento di Scienze Geologiche di "ROMA TRE" poi, (C. Rosa, 2003); è stata raggiunta nel 2002, mediante l'utilizzo di R.O.V. (Remote Operated Vehicle), quella che sembra la base della struttura allagata a circa -392 dal livello dell'acqua (G. Caramanna, M. Gary, 2004).

Finalità del rilievo

Tutte le iniziative dell'Amministrazione sono rivolte, ad una gestione rispettosa dei valori ambientali ed attenta al mantenimento degli equilibri di un habitat così delicato come quello del Pozzo del Merro, ma anche ad accrescere le conoscenze sul sito; in questa direzione va il presente studio volto a determinare con certezza alcune caratteristiche morfologiche ed altimetriche del pozzo stesso.

In particolare il rilievo geomatico effettuato è stato finalizzato alla ricostruzione della morfologia del Pozzo come supporto agli studi sulla sua formazione e per fornire un modello morfologico metricamente corretto corredato di una coregistrata copertura fotogrammetrica che permetterà di studiare la geomorfologia del sito, di particolare importanza per la ricostruzione geolitologica dell'area. Allo stesso modo ciò renderà possibile la realizzazione di un modello tridimensionale che permetterà la visita virtuale del sito al pubblico, di particolare importanza data la difficile accessibilità del sito stesso.

La progettazione e l'esecuzione del rilievo

Le particolari caratteristiche del sito (Fig.1) hanno reso finora impossibile un accurato rilievo della morfologia del Pozzo del Merro.

Nell'ambito di precedenti comunicazioni è stata esposta la realizzazione di una rete topografica classica per la misurazione di alcuni dettagli notevoli della morfologia del sito stesso (Baiocchi et al., 2010) tra cui in particolare la quota dell'asta idrometrica alla quale dovrebbero essere riferite tutte le misurazioni idrometriche eseguite negli scorsi anni.

La progettazione e l'esecuzione di tale rilievo si sono rivelate molto difficoltose per la presenza di una fitta vegetazione e a causa dell'elevata pendenza delle pareti del pozzo, caratteristiche che rendono problematico l'utilizzo di strumentazione GNSS per l'assenza di segnale all'interno della cavità e praticamente impossibile l'applicazione di tecniche fotogrammetriche a causa dell'elevata copertura vegetale. Il rilievo trigonometrico del Pozzo del Merro ha di conseguenza richiesto l'utilizzo e l'integrazione di differenti metodologie comportando l'utilizzo di stazione totale e, successivamente di ricevitori GNSS per il suo inquadramento nel sistema di riferimento WGS84-ETRF89.



Figura 1 – Panoramica del sito in corrispondenza di uno dei punti usati per appoggiare il rilievo laser.

La pianificazione del Rilievo Laser scanning di un'area così complessa ha richiesto l'individuazione di punti con sufficiente visibilità del sito stesso, con caratteristiche del tutto analoghe a quelle dei punti idonei per una rete di livellazione trigonometrica. Pertanto ci si è appoggiati ad alcuni punti della rete precedentemente rilevata e materializzata.

La strumentazione utilizzata per il rilievo laser scanning terrestre (LMS-Z210ii della Riegl) è caratterizzata da una precisione centimetrica sulla determinazione del punto e dalla presenza di una camera ad alta risoluzione che ha permesso inoltre di acquisire contestualmente l'informazione RGB associata ad ogni punto. Le scansioni sono state effettuate in due giornate differenti dai punti indicati come "Stazione 1" e "Stazione 3" che sono gli unici due punti che permettevano una visibilità adeguata del sito e della sua morfologia (Fig. 2).

Il primo rilievo, inquadrato nel sistema WGS84-ETRF89 appoggiandosi ai punti della rete già rilevata, è stato utilizzato come riferimento, mentre la seconda scansione è stata successivamente coregistrata con la prima calcolando la matrice di rototraslazione su una porzione di rilievo comune ad entrambe le misure, ed applicandola poi al secondo rilievo. Questa procedura si è resa necessaria per l'impossibilità di utilizzare i sistemi di coregistrazione automatica, non essendo stato possibile posizionare target visibili da entrambe le postazioni.

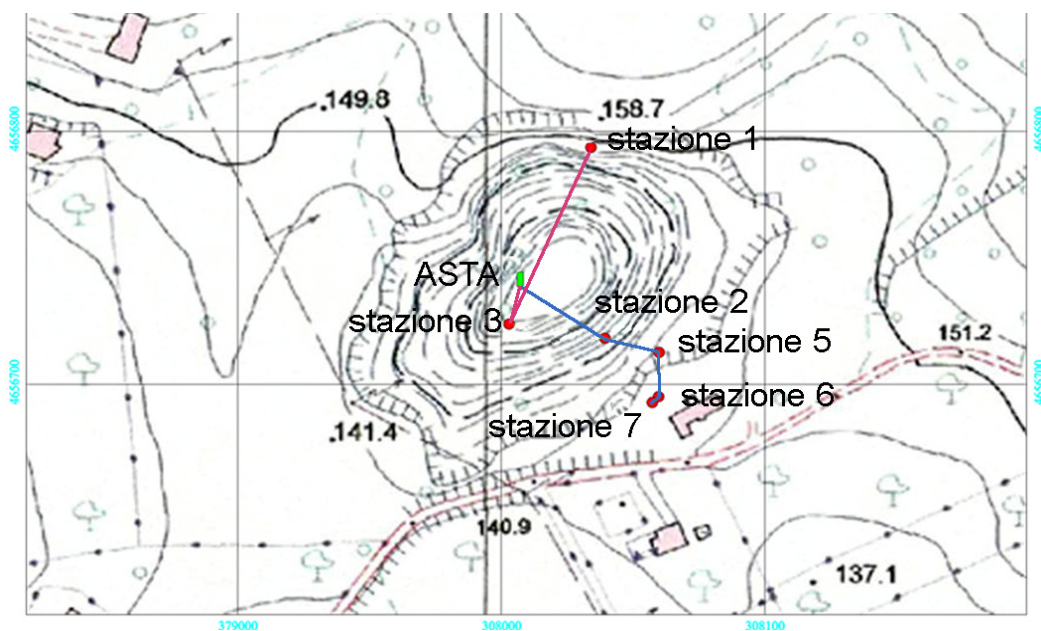


Figura 2 – Schema della rete precedentemente rilevata.

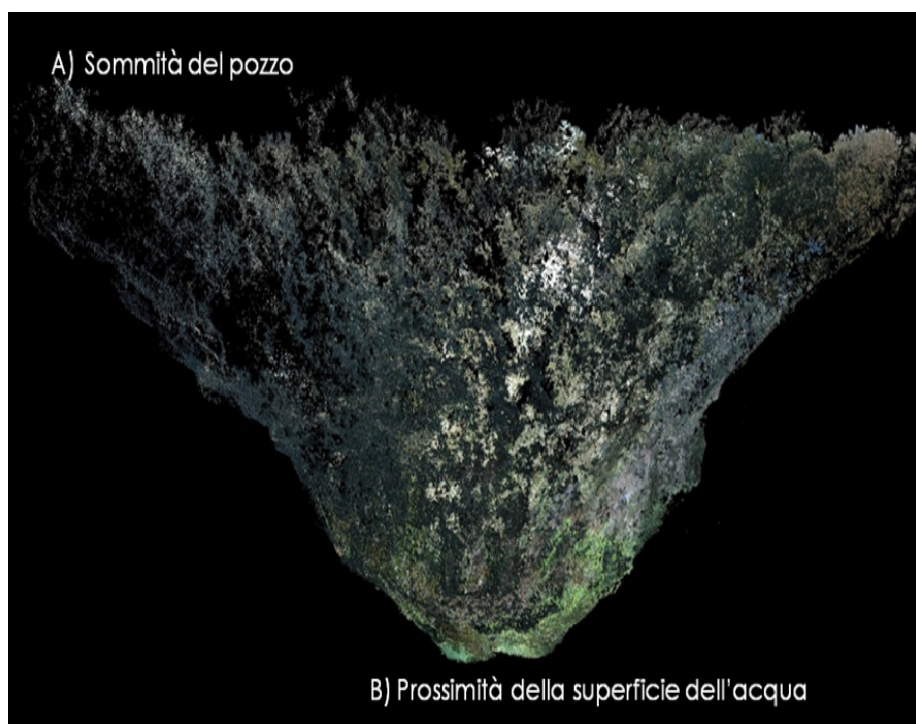


Figura 3 – Il Pozzo del Merro rappresentato come nuvola di punti, la profondità della voragine è di circa 80 metri.

La nuvola di punti ottenuta è stata poi filtrata per separare i punti terreno da quelli relativi alla vegetazione in modo da poter ricostruire con sufficiente precisione la morfologia del pozzo. Tale funzione, non prevista tra le opzioni di base, è stata implementata mediante la differenziazioni di successive scansioni impostate alternativamente su “*first*” e “*last pulse*”. Oltre all’informazione relativa al numero dell’eco, fondamentale è stata la possibilità di utilizzare per il filtraggio anche l’informazione RGB associata alla nuvola (figg 3- 4). I dati ottenuti, dopo un’ulteriore fase di editing, verranno utilizzati per la costruzione di vari modelli tridimensionali del Pozzo del Merro a varie scale in funzioni dei differenti impieghi finali.

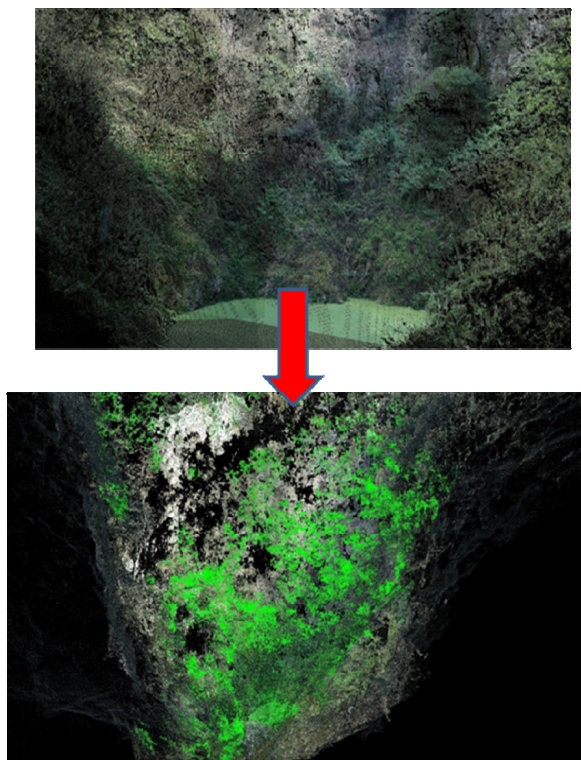


Figura 4 – Classificazione della vegetazione.

Conclusioni e sviluppi futuri

La particolare morfologia del Pozzo del Merro ha richiesto un’attenta progettazione e indagine dei luoghi circostanti; il rilievo eseguito ha permesso di ricostruire un modello tridimensionale dell’area utilizzabile a varie scale sia per la comunità scientifica che per permettere la visita virtuale da parte di personale non specializzato che attualmente non potrebbe accedere al sito data la particolare morfologia. Rimane da studiare una modalità di controllo e validazione dei risultati ottenuti in una situazione così particolare, a tale scopo è allo studio la possibilità di un rilievo mediante esacottero telecomandato che permetterà di confrontare caratteristiche vantaggi e limiti delle due metodologie in un sito così complesso morfologicamente.

Bibliografia

AA.VV. (1970), Carta Geologica d'Italia scala 1:100.000 F. 144 – Palombara Sabina -Poligrafico dello Stato

AA.VV. (2004), Carta Sentieristica “Riserva Naturale Macchia di Gattaceca e Macchia del Barco” - Provincia di Roma

Baiocchi V., Cazzella R., Giannone F., Liso L., Vecchio M.(2010). “Metodologie topografiche integrate per il rilievo di dettaglio del Pozzo del Merro (Sant'Angelo Romano)”. In: Atti 14a conferenza Asita. Brescia, 9-12 novembre 2010, vol. 1, p. 181-186, ISBN: 978-88-903132-5-7

Buccomino G., Capecchi P., Vecchio M., Vinci M., & Cazzella R.(2009) – “Monitoraggio Idrogeologico ed Ambientale del Pozzo del Merro (Roma)”, Atti 2° Workshop Internazionale. I Sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato. ISPRA, 903 – 911.

Calamita U., Caramanna G., Giardini M., (2002) “Il Pozzo del Merro: un gioiello naturale tra Tevere e Aniene.” - XL, settembre 2002, 11.

Caramanna G., Gary M.,(2008) “Applicazioni di metodologie di immersione scientifica e ROV (Remote Operated Vehicle) nello studio comparato dei due sinkholes allagati più profondi del pianeta: Pozzo del Merro (Lazio, Italia Centrale), El Zacaton (Tamaulipas, Messico)”. Atti Primo Seminario. Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio. APAT, pp. 211 – 227.

Giardini M. (2006), “L'incredibile sinkhole del Pozzo del Merro” Tor San Lorenzo Informa /2006 21-25.

Rosa C., (2003) – “Il Pozzo del Merro” - Rivista ufficiale dei Vigili del Fuoco, 11 – 15.

Segre A. G. (1948), “I fenomeni carsici e la speleologia del Lazio.” - Pubblicazione dell'Istituto di Geografia dell'Università di Roma, Serie, A .

www.igmi.org (<http://87.30.244.175/software.php>)

L'analisi tensoriale per il recupero di disegni e cartografie esistenti

Caterina Balletti, Francesco Guerra

Università Iuav di Venezia, SdL Laboratorio di fotogrammetria, Italia

Riassunto

Solitamente il collaudo avviene con lo scopo di controllare il contenuto metrico e semantico di disegni al termine di un rilievo appena eseguito, sia per quanto riguarda la scala cartografica che quella architettonica. Ma difficilmente viene adottato nel reperimento di rilievi esistenti, in considerazione di un loro re-utilizzo in un progetto di conservazione o restauro. Spesso, infatti, ci si trova di fronte a piante, sezioni e prospetti, realizzati in passato, con metodi e strumenti differenti, e ci si domanda quale sia la loro affidabilità e precisione.

Inoltre, nel tentativo di ridurre i costi necessari per un intervento di restauro e conservazione, si riduce al minimo la voce relativa al rilievo, con le conseguenti lacune nel processo conoscitivo dell'architettura in esame.

La qualità e la precisione di questi disegni può essere ri-valutata attraverso una fase di collaudo che impiega strumenti analitici già adottati nello studio del contenuto geometrico di cartografie storica: le trasformazioni piane e l'analisi tensoriale.

Nel caso delle trasformazioni piane, si tratta di adottare un modello analitico di trasformazione (affine o conforme) che consenta di valutare e confrontare un set di punti ricavati dal rilievo esistente e i loro omologhi rilevati direttamente sull'oggetto.

Nel secondo caso, la teoria elastica può fornire importanti informazioni riguardo le differenze geometriche tra due rappresentazioni dello stesso oggetto, ossia tra un disegno "storico" e una serie ridotta di punti rilevati ex novo. Si tratta dunque di ricercare dei parametri di deformazione locale, calcolati in specifiche aree del disegno. Introducendo delle grandezze invarianti e ulteriori trattamenti analitici, si può, in termini quantitativi, offrire una descrizione oggettiva delle alterazioni di un rilievo rispetto ad un altro.

Le procedure di verifica di seguito descritte si muovono in questa ottica: non sempre bisogna intervenire con una campagna approfondita di rilievo, ma si possono ridurre le operazioni di campagna a favore di un recupero della documentazione esistente. Tale approccio consente un notevole taglio nelle spese, ma senza dover rinunciare ad una necessaria conoscenza metrica della fabbrica, attraverso una valutazione in termini di precisione degli elaborati già a disposizione.

Gli autori, per approfondire lo studio sull'analisi tensoriale, hanno scritto un software che consente non solo il calcolo dei parametri della teoria elastica, ma anche di graficizzarne i contenuti, in considerazione della loro applicazione ai disegni di rilievo.

Abstract

Usually testing operations are used with the aim to evaluate the metric and semantic content of drawings of a just realized survey, concerning both cartographic and architectural scale. But hardly testing operations are tackled when we have to consider some existing surveying drawings in terms of their re-use in a conservation project. We have often to work with graphic plans, sections and elevations, that were made in the past and the goal is to understand their accuracy, and if it's possible to use them again, thereby avoiding new surveys campaign.

The quality of existing surveys and their possible accuracy can be estimated by using analytical tools that the authors have already adopted for the geometric knowledge of the historical cartography: the use of plane transformations and strain analysis.

The first method is based on the analyses of conformal plane transformation results, the second one regards strain analysis application. This means to search for local deformation parameters, calculated in specific areas of the drawings. Introducing invariant quantities and more analytical treatments, they may, in quantitative terms, offer a more objective description of changes in the geometric content of a survey compared to another.

Le operazioni di collaudo di rilievi e cartografie esistenti hanno lo scopo di valutare il contenuto metrico e semantico di elaborati grafici di una documentazione facilmente reperibile in funzione del loro utilizzo in un progetto di conservazione.

Spesso, nel tentativo di ridurre i costi necessari per un intervento di restauro e conservazione, si riduce al minimo la voce relativa al rilievo, con le conseguenti lacune nel processo conoscitivo dell'architettura in esame.

Le procedure di verifica di seguito descritte si muovono in questa ottica: non sempre bisogna intervenire con una campagna approfondita di rilievo, ma si possono ridurre le operazioni di campagna a favore di un recupero della documentazione esistente. Tale approccio consente un notevole taglio nelle spese, ma senza dover rinunciare ad una necessaria conoscenza metrica della fabbrica, attraverso una valutazione in termini di precisione degli elaborati già a disposizione.

Trasformazioni piane e analisi dei residui

La procedura di verifica si basa sul confronto tra due set di punti corrispondenti, il primo rilevato sull'architettura in questione, il secondo ricavato dal disegno esistente (pianta o prospetto).

I punti sull'edificio potranno essere rilevati topograficamente per irraggiamento dai vertici della rete principale al fine di ritenerli affidabili a meno degli errori strumentali. La distribuzione dei punti dovrà essere più possibile omogenea per evitare che una concentrazione in una zona influisca negativamente sulla valutazione complessiva della carta.

Le analisi proposte si basano sull'analisi dei risultati di una trasformazione piana conforme e sul confronto tra la distanza tra i punti dei due set il più delle volte tale analisi sono sufficienti per valutare la proprietà metrica dei rilievi esistenti numerizzati.

La prima procedura di collaudo è un confronto tra le coordinate carta e le coordinate terreno: le coordinate carta portate nel sistema di riferimento del rilievo con una trasformazione di similitudine (trasformazione a 4 parametri: rotazione, traslazione lungo gli assi X e Y, variazione di scala) e analizzate quindi sia le differenze di coordinate che il modulo del vettore differenza tra ogni punto sulla carta rototraslato e il corrispondente sul terreno. Tale procedura permette una valutazione generale della carta attraverso i parametri della trasformazione di similitudine nonché una localizzazione e quantificazione puntuale degli errori attraverso le differenze di coordinate.

Il secondo confronto si effettua sulle distanze: da ogni punto della carta e del rilievo vengono calcolate tutte le distanze con gli altri punti del proprio gruppo. Si ottengono così due set di distanze, l'uno sulla carta e l'altro sull'oggetto, che verranno confrontati valutando le differenze tra distanze corrispondenti.

Le due procedure sono complementari: la prima procedura permette di localizzare gli errori, di costituire le mappe di errore, di valutare la direzione degli errori, ma è influenzata dalla distribuzione dei punti sul monumento e può essere soggetta a fenomeni di mascheramento degli errori legato al calcolo ai minimi quadrati usato per la stima dei 4 parametri di trasformazione; la seconda procedura ha il vantaggio di non essere legata a un particolare sistema di riferimento e permette inoltre di valutare gli errori relativi tra zone differenti del monumento; per contro non permette una stima puntuale dell'errore ma ne segnala solo la presenza. L'utilizzo delle due procedure a cascata sugli stessi set di punti dà la possibilità di sfruttare le caratteristiche positive di

entrambe potendo superare le difficoltà: il fenomeno di ridistribuzione e mascheramento degli errori è infatti facilmente individuabile con l'analisi delle distanze. Qualora le due procedure diano risultati analoghi si può ragionevolmente pensare che tali risultati siano veritieri.

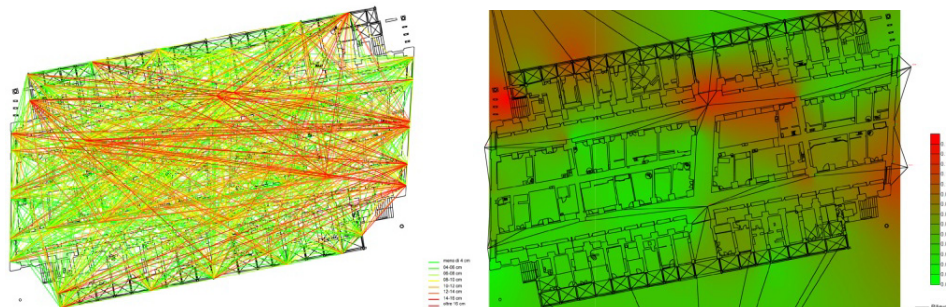


Figura 1 – Collaudo dei rilievi esistenti di Palazzo della ragione attraverso l'applicazione di trasformazioni piane.

Se si presentassero ancora incertezze sulla correttezza di tali rilievi e si volesse svolgere ulteriori accertamenti, si può ricorrere all'analisi tensoriale, nelle modalità di seguito descritte.

L'analisi tensoriale per il confronto geometrico tra carte

Rispetto all'analisi dei residui ottenuti attraverso il best fitting tra cartografia attuale e carte storiche per determinare a quale sistema di riferimento meglio si approssima quello nascosto dalle carte antiche, la teoria dell'elasticità può fornire ulteriori informazioni riguardo le differenze geometriche tra due carte. Si tratta della ricerca di parametri di deformazione locali, calcolati in zone specifiche delle carte. Introducendo delle quantità invarianti e ulteriori trattamenti analitici, si può ottenere, in forma quantitativa, una descrizione più oggettiva delle alterazioni del contenuto geometrico di una carta rispetto all'altra.

Il metodo proposto utilizza come input le differenze di coordinate di elementi geometrici (features) comuni nelle carte dopo aver eliminato le differenze di traslazione, rotazione e scala tra i due set di punti che definiscono le feature, ovvero dopo aver effettuato il best fitting tra i due set utilizzando una rototraslazione con variazione di scala. Le differenze di coordinate sono considerate, in modo astratto, come se fossero le differenze di coordinate di punti di un "corpo" in due diversi stati: uno stato non sollecitato, nel nostro caso la carta di riferimento, e uno sottoposto a tensioni, che nel nostro caso è la carta storica di contenuto proiettivo ignoto.

L'analisi tensoriale, stabilita questa corrispondenza "meccanica", descrive il comportamento di una carta rispetto all'altra indicando così le differenze geometriche.

Figura 2 – Finestra del programma per il calcolo dei parametri elastici con Strain_Map.

Il software Strain_Map

Per effettuare l'analisi tensoriale è stato implementato il software *Strain_Map* che consente il calcolo dei parametri elastici a partire da due triangolazioni su due set di punti omologhi appartenenti a due diverse carte.

Interpolando e mappando i corrispondenti valori è quindi possibile valutare le differenze tra le diverse cartografie. I valori dei parametri ottenuti sono infatti assegnati al baricentro di ogni triangolo; per tutti gli altri punti i valori sono ottenuti mediante interpolazione utilizzando l'algoritmo di Kriging.

Il programma, caricando il file contenente i dati della triangolazione sulle due carte, calcola le incognite del sistema:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & y_{11} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_{12} & y_{12} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_{13} & y_{13} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{11} & y_{11} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & x_{12} & y_{12} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & x_{13} & y_{13} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \alpha \\ \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \beta \end{bmatrix}$$

ossia le derivate parziali $\partial u/\partial x$, $\partial u/\partial y$, $\partial v/\partial x$ e $\partial v/\partial y$ e i valori di α e β . Avendo i valori delle incognite vengono quindi determinati i seguenti parametri tensoriali:

- 1) $E_{\max}$
- 2) $E_{\min}$
- 3) dilatazione $\Delta = E_{\max} + E_{\min}$
- 4) massimo sforzo $\gamma = E_{\max} - E_{\min}$
- 5) deformazione di rotazione $\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right)$
- 6) sforzi di taglio $\gamma_1 = e_{xx} - e_{yy}$ e $\gamma_2 = e_{xy} - e_{yx}$
- 7) azimuth dell'asse di massima tensione $\vartheta = \arctan(\gamma_2/\gamma_1)/2$
- 8) energia di sforzo $W = \Delta^2 + 1/2 \gamma^2$.

I file di output di *Strain_Map* sono:

- una tabella contenente per ogni triangolo le coordinate del baricentro e i valori delle incognite e dei parametri;
- un file .dxf delle triangolazioni effettuate sulle due carte.

Triangolazione di Delaunay

A partire dai punti di controllo l'area della carta viene suddivisa in patch triangolari in modo automatico con opportuni algoritmi di triangolazione; tra questi quello utilizzato in *Strain_Map* è la triangolazione di Delaunay. La triangolazione individuata sui punti della carta storica viene riportata anche sulla carta attuale utilizzando i punti omologhi.

Si tratta di congiungere opportunamente tutti i punti dell'insieme in modo da formare un insieme di triangoli minimizzando le lunghezze dei lati.

Dato un insieme di punti bidimensionali $\{P\}$, una triangolazione di Delaunay consiste in un insieme di triangoli aventi come vertici i punti di $\{P\}$, tali che per ognuno di essi, nessun punto di $\{P\}$, esclusi i vertici, è interno al cerchio circoscritto al triangolo stesso.

Se ci sono solo tre punti in ogni cerchio (i vertici di ogni singolo triangolo), la triangolazione di Delaunay è unica. Se invece si presenta il caso in cui ci sono più di tre punti sul cerchio si può sempre ottenere una triangolazione ma in modo univoco.

L'algoritmo costruisce la triangolazione a partire da un arbitrario triangolo iniziale che include tutti i punti.

Ciascun punto viene introdotto osservando quale triangolo tra quelli presenti ha un cerchio circoscritto che contiene il nuovo punto. Ciò viene determinato dal confronto tra raggio del cerchio circoscritto e distanza tra nuovo punto e il centro del cerchio.

Quei triangoli i cui cerchi circoscritti si intersecano sono cancellati e rimpiazzati da altri nuovi che includono il nuovo punto. Si formano quindi nuovi triangoli a partire dal nuovo punto e da ciascun lato rimanente.

Operando in questo modo per ogni punto introdotto il numero di triangoli aumenta di due. Quando tutti i punti sono stati inseriti, si ottiene la configurazione finale della triangolazione. Tutti i triangoli sono *triangoli di Delaunay*: hanno cioè il cerchio circoscritto che non contiene punti.

Per verificare la bontà del software, prima di applicare tutte le operazioni alle carte è stato effettuato un test. E' stata generata un'immagine di partenza con 28 punti segnalizzati distribuiti omogeneamente. E' stata generata poi una seconda immagine simile alla prima, ma con 3 dei 28 punti ruotati in senso antiorario di $p/6$ ovvero di 0,523

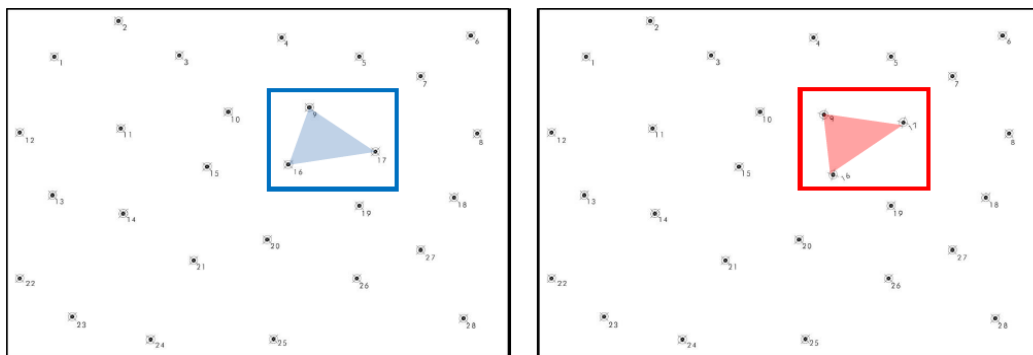


Figura 3 – Immagini usate per verificare il software.

I 2 set di coordinate dei punti delle immagini ottenute sono stati utilizzati come input per il software che ha calcolato i parametri dell'analisi tensoriale ed ha generato un file con le triangolazioni sui set di punti. Dalla sovrapposizione delle 2 triangolazioni si nota con evidenza la rotazione del triangolo indicato in Figura 3.

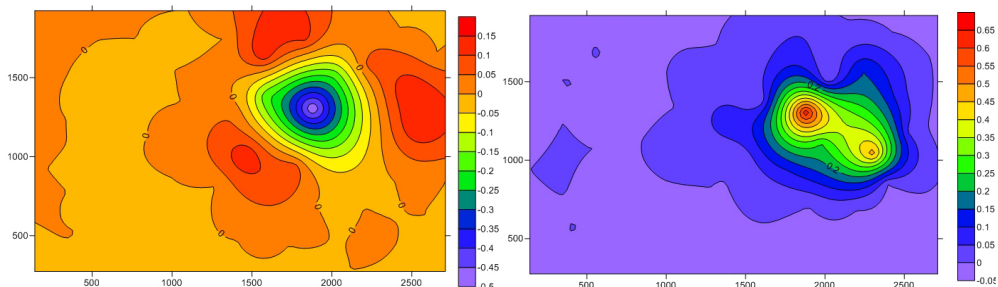


Figura 4 – Sx: la mappatura del parametro w rotazione. Il punto di rotazione massima corrisponde al baricentro del triangolo ruotato. Il parametro calcolato in quel punto è -0,5 che corrisponde a $p/6$ ovvero la rotazione applicata all'inizio.
Dx: mappatura del parametro W energia di sforzo massimo.

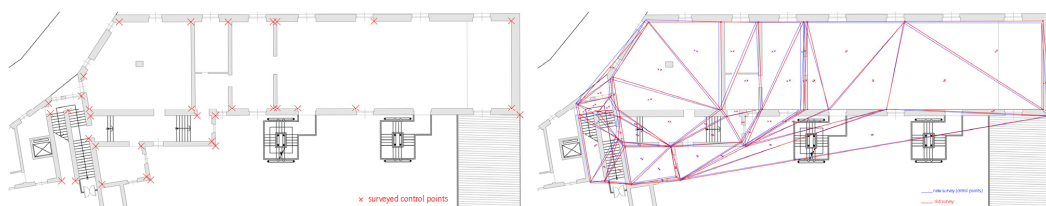


Figura 5 – La triangolazione di Delaunay sui due rilievi confrontati.

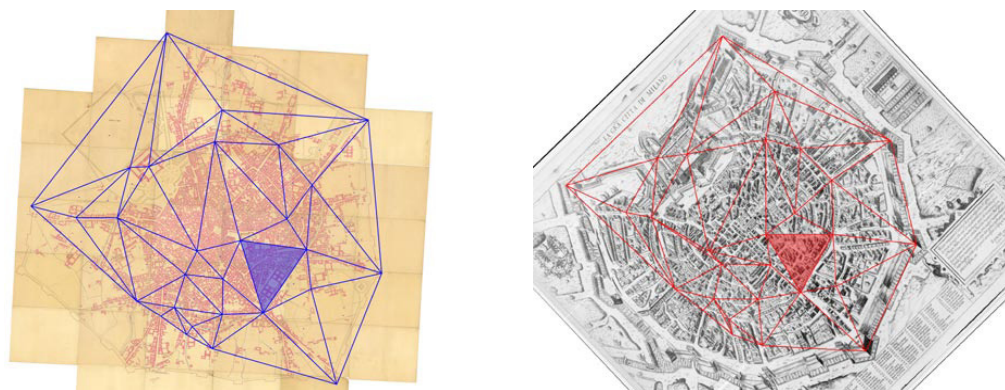


Figura 6 – Le triangolazioni di Delaunay sovrapposte alle due carte oggetto dello studio. A sinistra la Carta degli Astronomi di Brera dopo la georeferenziazione, a destra la Carta di Lafrèry dopo la trasformazione affine.

L'applicazione è stata effettuata tra un rilievo attuale, assunto come carta di riferimento, e un rilievo esistente del complesso dei Tolentini, sede storica della nostra Università, e ad alcune carte storiche, come la veduta prospettica di Milano di Antonio Lafrery (1573), usando come riferimento la Carta degli Astronomi di Brera. Tale applicazione offre delle informazioni ulteriori rispetto all'interpretazione dell'analisi della deformazione basata sulla distribuzione dei residui, in quanto mette ulteriormente in luce le anomalie geometriche puntuali rapportandole inoltre rispetto a tutta la rappresentazione geografica.

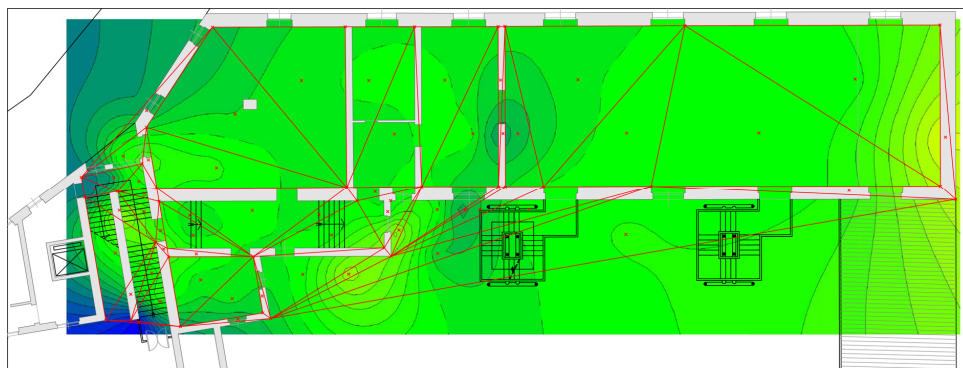


Figura 7 – Rappresentazione a isolinee della parte isotropa della deformazione data dai valori di dilatazione.

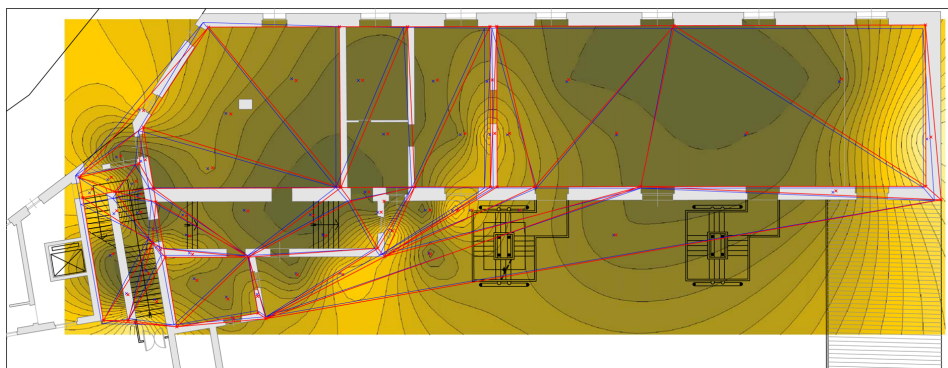


Figura 8 – Rappresentazione a isolinee della parte anisotropa della deformazione data dai valori di massimo taglio γ .

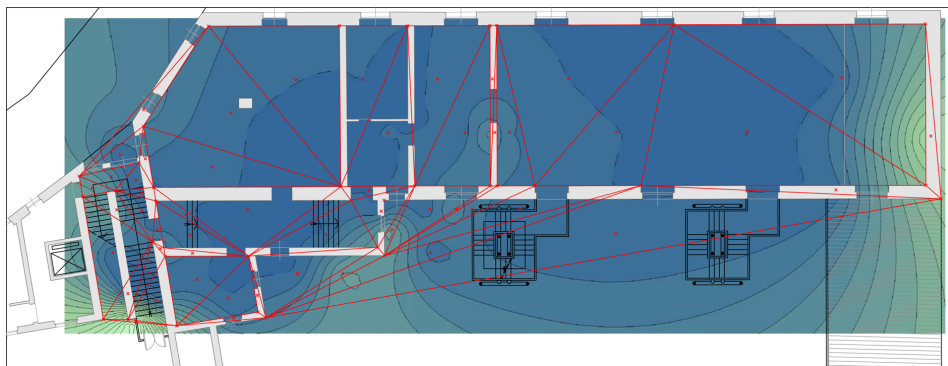


Figura 9 – Rappresentazione dell'energia W che sintetizza le componenti anisotrope e isotrope della sforzo.

Nel caso del rilievo dei Tolentini, vengono così evidenziati le eventuali rotazioni di alcune parti della rilievo esistente (errore tipico di un rilievo eseguito mediante il metodo diretto) rispetto al rilievo attuale.

Eseguita la triangolazione a partire dai punti di controllo e assegnando al baricentro di ciascun triangolo i relativi parametri tensoriali calcolati, si possono disegnare delle isolinee di uguale valore tensoriale (linee iso- Δ per la dilatazione, iso- γ per lo sforzo massimo di taglio, iso- ω per la rotazione e linee iso- W per l'energia dissipata), che indicano, in un certo modo, la variazione dovuta alla diversa geometria delle carte.



Figura 10 – Mappatura del parametro di dilatazione D relativo alla Carta di Lafrery.



Figura 11 – Mappatura del parametro di rotazione w relativo alla Carta di Lafrery.



Figura 12 – Attraverso il parametro di dilatazione D è possibile dimostrare analiticamente che il castello sforzesco è stato disegnato da Lafrèry diminuendo la scala di rappresentazione, presumibilmente per motivi di celebrazione del potere politico.

Conclusioni

Attraverso questa esperienza, si vuole dimostrare che attraverso la valutazione dei risultati delle analisi applicate è possibile non solo verificare l'affidabilità di cartografie storiche e di rilievi esistenti, ma anche impostare una procedura per il loro recupero/restauro geometrico.

Tale sperimentazione è stata svolta dagli autori in maniera approfondita in cartografia, e quindi può essere applicata anche agli elaborati di rilievi, storici o svolti secondo metodologie non rigorose, come descritto in questo articolo.

La "correzione" dei disegni, una volta individuati eventuali localismi nella distribuzione preferenziale dell'errore, può avvenire attraverso una procedura di deformazione locale che si basa sull'uso di algoritmi di warping, ben noti in computer graphic, ma già applicati nel recupero delle carte antiche.

Bibliografia

- Boutoura, C., E. Livieratos (1986): Strain analysis for geometric comparisons of maps. *The Cartographic Journal*, Vol. 23, No. 1, 27-34.
- Dermanis, A., and E. Livieratos (1983), Applications of deformation analysis in geodesy and geodynamics, *Rev. Geophys.*, 21(1), 41-50, 1983.
- Balletti C., Monti C., Guerra F., Galeazzo G. (2000): *Capitolato speciale d'appalto per l'esecuzione del rilievo in forma numerica alla scala 1:50*, CIRCE, QuadernIUAUV, Venezia, ISBN 88-87697-10-8.

Studio integrato di aree minerarie della Sardegna tramite telerilevamento e analisi mineralogiche

Teresa Balvis (*), Francesco Muntoni (*), Alberto Marini (*), Pierfranco Lattanzi (**)

(*) Laboratorio TeleGIS, Dipartimento Scienze della Terra, Università degli Studi di Cagliari
Via Trentino 52, 09127 Cagliari, Tel. 0706757701, balvisteresa@tiscali.it

(**) Dipartimento Scienze della Terra, Università degli Studi di Cagliari, Via Trentino 52, 09127 Cagliari

Riassunto

L'attività estrattiva in Sardegna si è protratta per un lungo periodo, e soprattutto negli ultimi 150 anni con l'avvento delle tecniche di produzione industriali, ha indotto sostanziali cambiamenti nel paesaggio. L'esaurimento delle riserve minerarie ed il sostanziale abbandono di questo tipo di attività industriale negli ultimi vent'anni ha causato la chiusura di quasi tutti i siti, compromettendo in maniera significativa la qualità dell'ambiente per la presenza di scavi, discariche ed abbancamenti di materiali fini di risulta della lavorazioni dei minerali, responsabili di contaminazioni da metalli pesanti nel suolo e nelle acque, con potenziale rischio per l'ecosistema. L'avvento delle nuove tecniche di telerilevamento, in particolare lo studio delle immagini satellitari, offre un nuovo approccio allo studio dei problemi ambientali. I dati telerilevati registrano la riflettanza solare e l'emissione termica in parti specifiche dello spettro elettromagnetico. Poiché la "firma spettrale" che è (in linea di principio) caratteristica per i diversi materiali della superficie, consente varie applicazioni. In particolare è possibile riconoscere diversi gruppi di minerali, come idrossidi, solfati, carbonati e alcuni minerali di alterazione idrotermale. L'informazione può essere integrata con quella di sensori a terra, per meglio caratterizzare il target visualizzato con i sensori in volo, rendendo possibile una migliore comprensione delle informazioni nelle immagini che deve essere ulteriormente integrata dai dati mineralogici e geochimici che meglio caratterizzano le aree minerarie. Scopo del presente lavoro è di contribuire allo sviluppo di metodologie per l'indagine dei fenomeni di inquinamento nelle aree minerarie con un approccio che integra le conoscenze mineralogiche con dati telerilevati. Tale finalità è stata perseguita attraverso lo studio di alcune aree minerarie del distretto minerario piombo-zincifero di Montevecchio-Ingurtosu-Gennamari. L'integrazione tra tutti questi dati ha permesso di trarre delle conclusioni sulle possibili applicazioni dell'interpretazione delle immagini da satellite per il telerilevamento ambientale in aree minerarie.

Abstract

The extractive activity in Sardinia lasted for a long time and in the last past 150 years the industrial productive techniques have substantially changed the landscape. Additionally, in the last 20 years, the exhaustion of mining reserves and the abandonment of this kind of activity caused the closing of most of all the mines, seriously compromising the landscape due to the past excavation activity, dumps, and the build-up of thin materials derived from the mineral processing. This scenario presents risks of heavy metal pollution of soils and waters, therefore involving substantial risks for the environment. The development of Remote Sensing techniques, mainly the analysis of satellite images, offers a brand new approach to study environmental problems. The remote sensing data record the solar reflectance and the thermal emission in specific part of the electromagnetic spectrum. It is important to highlight that the "spectral signature" is, in principle, unique for each different surface's materials and allows many applications. In particular it is possible to use the spectral firm to recognize different groups of minerals, like hydroxides, sulphates, carbonates and

some minerals of hydrothermal change. These data can be integrated with those obtained through the terrestrial sensors, for a better characterization and a full comprehension of information in the images. All these data have to be completed with mineralogical and geochemical data, that are specific of mining areas. The aim of this project is to contribute in the development of methodologies to analyze pollution phenomena in the mining areas with an integrated approach between mineralogical and remote sensing data. This purpose can be achieved through analyzing some case studies in the lead – zinc mining district of Montevecchio, Ingurtosu and Gennamari. The integration of all these data allowed finding some applications of the satellite images interpretation for the environmental Remote Sensing in mining zones.

Introduzione

L'attività mineraria è una tra le attività industriali che maggiormente possono danneggiare, inquinare e modificare il territorio in quanto comporta la creazione di morfologie instabili soggette a frane e crolli (Di Gregorio et al., 1992), ma soprattutto l'esposizione all'ambiente esogeno di vaste aree di rocce mineralizzate e di sottoprodotti di trattamento, che producono importanti variazioni nella chimica dell'ambiente. L'impatto più rilevante è la dispersione nell'ambiente di elementi tossici, principalmente "metalli pesanti", intendendo con questo termine descrittivo elementi come Cu, Pb, Zn, Cd, As, Cr e Ni. La dispersione di questi elementi può essere veicolata per via meccanica (scivolamenti gravitativi, ruscellamento, trasporto eolico) o per via chimica (trasporto in soluzione). Quest'ultima può rappresentare il rischio meno evidente, ma nel lungo tempo si configura come quello più pericoloso e limitante per le attività umane nonché quello più difficilmente eliminabile (es., Plumlee & Logsdon, 1999 e Blowes et al., 2003). Le fonti d'inquinamento sono rappresentate oltre che dalle mineralizzazioni rimaste esposte in sotterraneo, dai materiali di scarto accumulati all'esterno o costituenti la ripiena stessa delle miniere. Un ruolo preponderante è svolto dai fanghi di flottazione, originariamente depositi in bacini: in essi si ritrovano alte concentrazioni di metalli pesanti e la loro lisciviazione da parte degli agenti atmosferici determina un notevole inquinamento nelle aree minerarie. In ogni caso, il circuito delle acque superficiali rappresenta la via preferenziale di dispersione di questi elementi tossici anche a distanze notevoli dalla sorgente.

Il Telerilevamento comprende le tecniche che permettono di trarre informazioni su una realtà posta ad una nota distanza dal sensore, tale tecnica permette la conoscenza delle diverse caratteristiche degli oggetti investigati, mediante l'analisi delle informazioni derivanti dallo spettro delle onde elettromagnetiche. Il principio di base consiste nella capacità di ogni corpo di riflettere, assorbire e trasmettere una radiazione incidente in percentuali differenti, a seconda delle proprie qualità strutturali, chimiche, fisiche. Le informazioni elettromagnetiche vanno convertite, attraverso la creazione di opportuni modelli multidisciplinari, nella stima delle variabili chimiche, fisiche o biologiche investigate. Il successo o il fallimento dell'utilizzo dei dati telerilevati nel valutare le alterazioni ambientali, dipendono quindi da modelli e algoritmi sviluppati e utilizzati per estrarre i parametri ambientali dal *continuum* di dati ottico-spetttrali raccolti dai sensori e dal confronto con elementi di verità a terra (Gommarasca, 2004). I sensori attuali consentono la misura a distanza, basata essenzialmente sul comportamento delle superfici dei corpi relativamente alle onde elettromagnetiche nel visibile, nell'infrarosso e nelle microonde; tali misure sono indirizzate al riconoscimento indiretto della struttura degli elementi territoriali o al rilevamento di alcune caratteristiche fisiche. Ciò ha consentito al telerilevamento, di accrescere il suo ruolo nella pianificazione territoriale e nella gestione delle risorse terrestri per lo studio e la comprensione di fenomeni non investigabili in altro modo e per il controllo delle dinamiche naturali.

Inquadramento geografico dell'area

Le aree oggetto di studio fanno parte del distretto minerario di Montevecchio – Ingurtosu – Gennamari (Sardegna sud-occidentale) e ricadono nei comuni di Guspini e Arbus individuabili nella tavoletta alla scala 1:25.000 della carta d'Italia dell'IGM, foglio 546 sezione I e IV, sezioni

“Montevecchio” e “Punta S’acqua durci”, nelle carte CTR scala 1:10.000 sezioni : 546-030, 546-040, 546-060 e 546-070. Nella carta Geologica d’Italia dell’IGM in scala 1:100.000, l’area di studio è compresa nei fogli 224-225 Capo Pecora-Guspini.

Oggetto specifico del presente studio è il cantiere di Levante di Montevecchio ed in particolare il bacino di sterili di flottazione facente capo alla Laveria Principe Tommaso, nota comunemente come “bacino di Piccalinna” che si trova a est rispetto al villaggio di Montevecchio. Quest’ultimo è una frazione del comune di Guspini, a cui è collegato da una strada asfaltata. L’altra area oggetto di studio è il bacino idrografico del Rio Naracauli a sud-ovest del villaggio di Montevecchio, caratterizzato da grandi quantità di materiali provenienti sia dagli scavi in sotterraneo e sia dagli impianti di pre-arricchimento e di flottazione.

Materiali e metodi

I dati utilizzati in questo studio sono essenzialmente di tre tipi: immagini satellitari Aster, dati di riflettanza a terra acquisiti mediante spettroradiometro da campo modello Macam e composizione mineralogica (ottenuta per diffrazione dei raggi X) del substrato su cui è stata effettuata la lettura spettrale.

1.1. Immagini satellitari

Le immagini utilizzate in questo studio sono quelle del sensore Aster collocato sul satellite TERRA, tali dati presentano una risoluzione spaziale e spettrale utili in questo tipo di studi. L’immagine utilizzata è quella acquisita il 29 luglio del 2000. Aster è il sensore con risoluzione geometrica maggiore tra quelli presenti sulla piattaforma TERRA: l’area ricoperta dai pixel varia da 15 a 90 m². Le bande utilizzate in questo lavoro sono quelle del visibile, del vicino e medio infrarosso cioè gli intervalli spettrali utilizzati negli studi geologico-mineralogici. L’intervallo spettrale del VNIR, 0,520-0,860 µm (bande 1-3), permette l’identificazione di minerali in cui sono presenti i metalli di transizione in particolare il ferro. L’intervallo spettrale di SWIR, 1,656-2,400 µm (bande 4-9), permette l’identificazione di minerali come carbonati, solfati, ossidi e idrossidi.

1.2. Acquisizione dei dati con lo spettroradiometro

L’acquisizione dei dati di riflettanza a terra è stata fatta con lo spettroradiometro da campo modello Macam SR-9050, in grado di acquisire sia valori di riflettanza e/o d’irradianza in un intervallo di 400-2500 nm.

La campagna di acquisizione dati con lo spettroradiometro nel distretto minerario di Montevecchio – Ingurtosu – Gennamari è stata condotta nei mesi di giugno, settembre, ottobre e novembre 2005. L’acquisizione dei dati è stata condizionata dalla scelta di aree facilmente accessibili e sicure, infatti tra i fattori che maggiormente hanno influenzato il lavoro di rilevamento vi sono senza dubbio la particolare topografia dell’area e, di non secondaria importanza, la sicurezza precaria o del tutto assente dei siti abbandonati. Molte delle discariche e degli abbancamenti non hanno infatti ancora subito, con rare eccezioni, interventi di ripristino ambientale e messa in sicurezza. Si è deciso così, di effettuare le misure solo sugli abbancamenti di fanghi di laveria all’interno del bacino idrografico del Rio Naracauli e sulla discarica di Piccalinna (Figura 1).

Si è determinato un passo di campionamento di circa 10 m in modo da creare una maglia abbastanza fitta che però non sempre è stato possibile seguire a causa dei problemi riguardanti le condizioni di sicurezza e gli affioramenti di fanghi talvolta troppo limitati. L’esigenza di avere una maglia di campionamento molto fitta è ovviamente utile per ottenere un dato che sia il più omogeneo possibile in quanto durante la fase di classificazione dell’immagine satellitare attraverso le firme acquisite in campagna, il maggior numero di dati ottenuti per unità di pixel (l’unità di superficie minima di qualsiasi immagine satellitare), darà maggiori possibilità di successo nell’identificazione di una firma sull’immagine stessa.



Figura 1 – Immagine Aster 321, sono indicate le aree in cui sono stati acquisiti i dati con lo spettroradiometro.

1.3. Acquisizione dei campioni di substrato e analisi mineralogiche

In ogni punto in cui sono state fatte le acquisizioni con lo spettroradiometro, sono stati prelevati dei campioni di suolo al fine di determinare i minerali presenti mediante analisi per diffrazione dei raggi X. In realtà non si tratta di suoli veri e propri (caratterizzati cioè dalla presenza di almeno un orizzonte ricco di materia organica), ma di materiali incoerenti essenzialmente da sterili di coltivazione e di trattamento, o da sedimenti fluviali, con scarsissimi o nulli processi di pedogenesi. Per ogni campione è stata prelevata la parte più superficiale del substrato, con una profondità massima di 1 cm dalla superficie. Sui campioni di substrato sono state eseguite le analisi diffrattometriche, con il diffrattometro di raggi X (XRD Panalytical Xpert Pro), presente nel Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Cagliari. L'individuazione dei picchi è stata eseguita in modo automatico con il software in dotazione allo strumento.

1.4. Elaborazione dei dati spettrali

Le firme spettrali acquisite in campagna sono state elaborate in modo da poter essere utilizzate all'interno del software Envi 4.2 che, oltre ad elaborare le immagini, consente l'elaborazione spettrale, pertanto i dati sono stati salvati in file formato Ascii. Per poter analizzare, e quindi riconoscere le firme spettrali dei minerali presenti, questi dati sono stati inseriti in "librerie spettrali".

Il riconoscimento della firma dei minerali nei dati raccolti in campagna avviene per confronto con una libreria spettrale nota ottenuta da letture su minerali in laboratorio. In questo lavoro è stata utilizzata la libreria spettrale USGS Mineral Spectral Library (splib04). Da questa libreria sono stati ulteriormente selezionati i minerali, che da bibliografia e dalle analisi diffrattometriche, si sa per certo essere presenti nel distretto minerario di Montevecchio – Ingurtosu – Gennamari; in questo modo è stata costruita la libreria di firme spettrali di minerali puri cioè ricavate in laboratorio dalla lettura diretta con spettroradiometro del singolo minerale in condizioni ambientali controllate. Una volta creata la libreria di riferimento, la "Libreria Montevecchio", è stato possibile procedere con l'analisi delle firme raccolte in campagna; per fare ciò è stato necessario utilizzare gli algoritmi che si trovano implementati nel software Envi. L'applicazione degli algoritmi, avviene mediante la tool *Spectral Analyst*, e la loro interpretazione richiede molta cautela in quanto devono essere introdotte

variabili scelte dall'operatore quali i valori massimi e minimi ammessi. L'applicazione di questi algoritmi non dà risultati sempre facilmente interpretabili, ma rappresenta il punto di partenza dell'analisi spettrale. Gli algoritmi di classificazione utilizzati in questo studio sono stati: Spectral Angle Mapper (SAM) e Spectral Feature Fitting.

1.5. Elaborazione delle immagini Aster

Le immagini Aster prima di essere classificate e confrontate con i dati di riflettanza a terra sono state corrette secondo le elaborazioni note come *pre-processing*. Questa fase di pre-elaborazione consente di minimizzare gli errori, il rumore di fondo e le distorsioni introdotte durante l'acquisizione e la trasmissione dei dati e comprende le procedure di correzione radiometrica, atmosferica e geometrica. In questo studio le prime tre bande dell'Aster, cioè l'intervallo del visibile vicino infrarosso (VNIR), sono state classificate con la tecnica *supervised* ed in particolare è stato utilizzato l'algoritmo SAM Spectral Angle Mapper. Le sei bande del Aster del infrarosso corto (SWIR) sono state invece classificate seguendo una procedura semi-automatica implementata in Envi che prevede diversi passaggi: Spectral Hourglass Wizard, che è stata ideata per l'analisi dei dati iperspettrali e multispettrali (Kruse et al., 2000) ed è stata applicata con successo anche ai dati Aster (Hubbard et al, 2003; Galvao et al., 2005).

Risultati e discussione

Nel considerare questi risultati, si devono tenere presenti le limitazioni intrinseche della determinazione della firma spettrale di una superficie in un sistema naturale, sulla quale influiscono vari fattori non quantificabili, tra cui il tipo di copertura del terreno (in questo caso i substrati delle discariche), le condizioni di acquisizioni del dato (in particolare l'umidità, che gioca un ruolo importante sulla risposta spettrale del suolo per effetto dell'assorbimento dell'acqua e del conseguente abbassamento della riflettanza nell'intero spettro), e la distribuzione delle dimensioni delle particelle delle superficie. Pertanto, la fase di confronto delle firme di campagna con le librerie spettrali, ottenute in laboratorio, ha richiesto un notevole studio: infatti, mentre le firme di laboratorio sono riferite ad un unico minerale sul quale la misura spettrale è stata fatta in condizioni ambientali standard, il dato di campagna presenta una curva di riflettanza risultato di una composizione mineralogica tipicamente polifasica e ottenuta in condizioni ambientali variabili. Per valutare l'attendibilità dell'interpretazione delle firme spettrali, si sono quindi confrontate la composizione mineralogica risultante dall'analisi diffrattometrica con quella indicata come probabile dall'analisi della firma spettrale raccolta sul terreno (ossia, le fasi per le quali i programmi di analisi spettrale restituiscono un alto "score", ossia probabilità che lo spettro del minerale sia presente nella firma spettrale raccolta sul terreno).

In generale, i risultati delle analisi diffrattometriche (XRD) evidenziano nei campioni esaminati la presenza di quarzo e di muscovite e/o illite come minerali principali; sono poi presenti minerali delle rocce dell'area (feldespato, clorite), nonché sfalerite, gesso, siderite, calcite, dolomite, e occasionalmente fluorite e barite. Questi dati sono in accordo con i precedenti studi sull'area (Da Pelo, 1998; Caboi et al. 1999). Per quanto riguarda le analisi spettrali, sono stati considerati i primi sei minerali che hanno riportato il punteggio (*score*) più elevato, e che quindi, in linea di principio, hanno la massima probabilità di essere presenti nel campione.

In tutti i campioni è evidente che vengono riscontrati quasi sempre gli stessi minerali, inoltre il minerale che mostra il punteggio più elevato è quasi sempre la galena, seguita dalla pirite e dall'ortoclasio. Anche se la presenza di questi minerali è tutt'altro che improbabile nell'area tuttavia i primi due non sono stati rilevati con le analisi diffrattometriche, né con un'osservazione del materiale al microscopio binoculare. Si tratta quindi verosimilmente di "falsi positivi". L'analisi spettrale presenta "falsi positivi" quasi sistematici, come galena, pirite e probabilmente ortoclasio, mentre presenta buona corrispondenza con la diffrattometria, e quindi sembra affidabile, per minerali come quarzo e "muscovite" (genericamente, mica potassica). Eliminando i minerali con

scores molto alti, ma individuati come probabili “falsi positivi”, si ottiene una migliore corrispondenza.

Un caso del tutto particolare, e che merita una discussione approfondita, è quello dell’epsomite, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Questo minerale, che ha una firma spettrale molto caratteristica (Figura 2), compare spesso con score molto alti nell’analisi spettrale, mentre non è mai stato individuato per diffrazione. Tuttavia la sua presenza nelle discariche di Montevicchio, e in particolare a Piccalinna, è ben documentata e caratteristica (Da Pelo, 1998 e riferimenti). Essa, così come la fase simile esaidrite ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), forma efflorescenze superficiali biancastre dovute a risalita per capillarità ed evaporazione dell’acqua dai pori nei periodi secchi, mentre, essendo facilmente solubile, è del tutto assente nei periodi umidi.

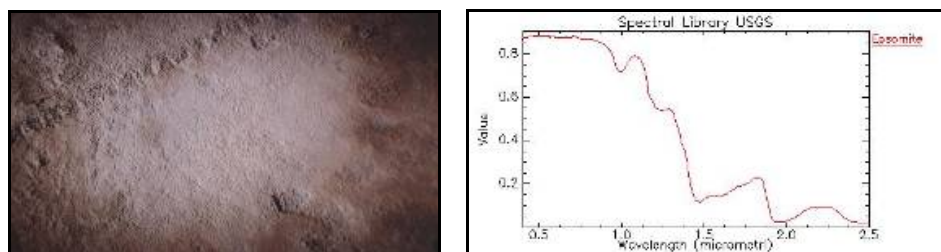


Figura 2 – Foto della superficie di campione PN1 e spettro di riflettanza dell’epsomite.

La foto (Figura 2) del campione PN1, prelevato in un periodo molto secco, mostra appunto la presenza di una patina biancastra alla superficie, molto verosimilmente si tratta proprio di epsomite. Il mancato riconoscimento per diffrazione è dovuto alla combinazione di due circostanze sfavorevoli: trattandosi di un’esile patina molto superficiale, per quanta cura si ponga nel prelevamento del campione di superficie, inevitabilmente si raccoglie anche parte del materiale sottostante, che finisce per essere quantitativamente prevalente nella porzione analizzata per diffrazione; in tale materiale è costante la presenza di quarzo, il cui secondo (per intensità) picco di diffrazione ($d = 4.26 \text{ \AA}$) si sovrappone, mascherandolo, al picco più intenso dell’epsomite ($d = 4.21 \text{ \AA}$). In questo caso quindi possiamo ragionevolmente affermare che l’analisi spettrale, grazie alla firma molto caratteristica del minerale ed alla sua concentrazione alla superficie, riesce a mettere in evidenza una fase che può invece sfuggire all’analisi diffrattometrica.

Si sottolinea che l’epsomite è potenzialmente una fase di rilevanza ambientale. L’epsomite di Montevicchio contiene molto spesso Zn come vicariante del Mg, e presumibilmente contiene anche Cd, che a Montevicchio è sistematicamente associato allo Zn (Caboi et al., 1999), quindi è una fase che influisce in una certa misura sulla mobilità dei “metalli pesanti”. Come si è già accennato, essa presenta dei cicli di formazione/dissoluzione in risposta alla variazione delle condizioni ambientali, e quindi può rappresentare in una certa misura un indicatore di avvenute variazioni nelle condizioni delle discariche.

Acquisita dunque quest’informazione preliminare sull’attendibilità della risposta spettrale, si è passati all’analisi e classificazione delle immagini Aster. In questo caso, oltre alle incertezze proprie dell’interpretazione spettrale in termini di composizione mineralogica, bisogna tenere conto anche di altre limitazioni legate alla risoluzione spaziale delle immagini (un pixel è uguale a 30 m), alla presenza della vegetazione, e all’interferenza dell’atmosfera.

Per ottenere risultati significativi sono state anzitutto applicate delle “maschere” che avevano come obiettivo quello di restringere l’analisi solo alle aree in cui erano state fatte le acquisizioni spettrali a terra. Tali aree sono scarsamente coperte da vegetazione. L’immagine Aster utilizzata per l’analisi è stata acquisita nel mese di luglio, in condizioni quasi ottimali di assenza di nubi e bassa umidità.

La classificazione delle prime tre bande dell’Aster ($0.52 - 0.86 \mu\text{m}$) non ha prodotto dei risultati che possano essere considerati attendibili e significativi. Essi sostanzialmente ripetono i “falsi positivi”

già segnalati in precedenza, indicando un'ipotetica distribuzione di galena e pirite del tutto non realistica.

Risultati più incoraggianti si sono ottenuti dalla classificazione delle sei bande dell'infrarosso medio (1,600 – 2,430 μm). Applicando la procedura Spectral Hourglass Wizard, è stato possibile ridurre il numero di classi, consentendo una più agevole classificazione. Nelle figure seguenti (Figura 3), vengono rappresentate delle elaborazioni delle bande relative ai bacini di Piccalinna e Naracauli-Pireddu, in cui ad ogni pixel viene attribuito un colore convenzionale corrispondente al minerale che ha il massimo *score* nella firma spettrale relativa a quel pixel. Per i motivi sopra esposti, pirite e galena sono stati esclusi dai minerali presi in considerazione. Tra i minerali individuati, l'epsomite è quello che ricopre in parte il bacino di Piccalinna, risultato che appare attendibile alla luce delle considerazioni precedentemente svolte. Anche la dolomite, per altro ben evidenziata anche nelle analisi diffrattometriche, sembra essere ben rappresentata in entrambe le aree. La muscovite (intendendo con questo termine una generica "mica potassica") sembra la fase predominante nel bacino di Naracauli-Pireddu, e ancora una volta ciò concorda con i risultati della diffrazione X.

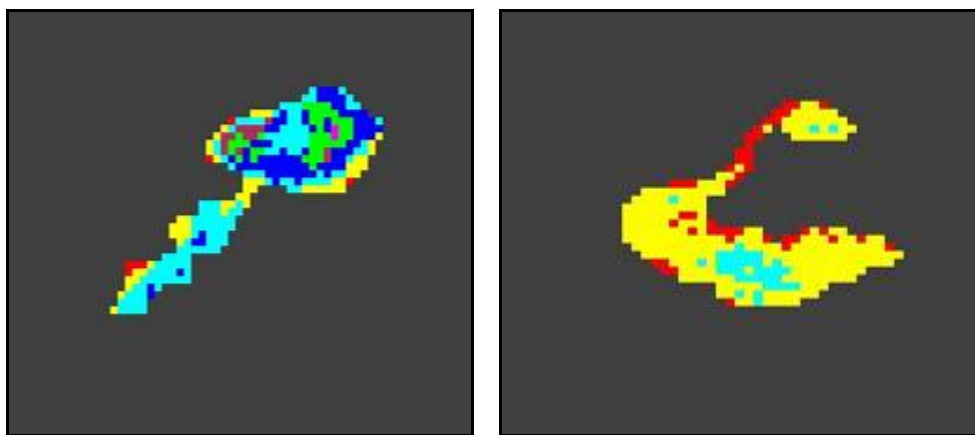


Figura 3 – Risultati della classificazione dell'immagine Aster SWIR, relativa al bacino di Piccalinna e di Naracauli.

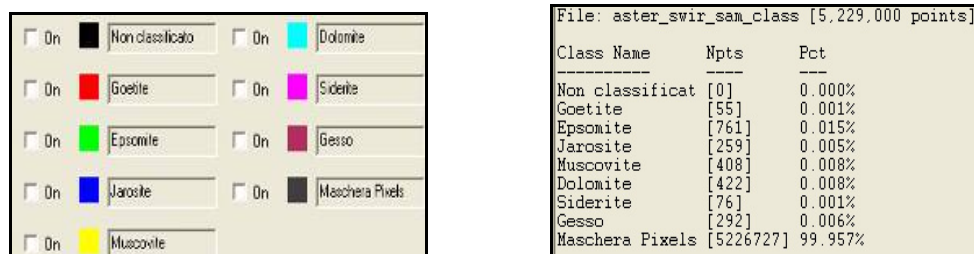


Figura 4 – Legenda della classificazione dell'immagine Aster SWIR - Numero dei pixel e percentuale di ogni minerale ottenuti nella classificazione dell'immagine Aster SWIR.

Conclusioni

L'attività mineraria provoca sull'ambiente notevoli modifiche di carattere sia morfologico che chimico, ciò rappresenta un problema importante in una regione come la Sardegna, dove esiste una grande tradizione mineraria, caratterizzata purtroppo in passato da una gestione scarsamente interessata ai problemi ambientali.

L'avvento delle nuove tecniche di telerilevamento, in particolare lo studio delle immagini satellitari, offre un nuovo approccio allo studio dei problemi ambientali. Infatti studi recenti evidenziano come dall'analisi dei dati telerilevati sia possibile ottenere informazioni utili ad integrare dati mineralogici e geochimici per la caratterizzazione delle aree minerarie, mediante la realizzazione di mappe di distribuzione dei vari minerali presenti. In particolare l'informazione può essere integrata con quella di sensori a terra, che possono essere usati per meglio caratterizzare il target visualizzato con i sensori in volo, rendendo possibile una migliore comprensione delle informazioni delle immagini. Scopo del presente lavoro era appunto di contribuire allo sviluppo di metodologie per l'indagine dei fenomeni di inquinamento nelle aree minerarie con un approccio che integrasse le conoscenze mineralogiche con dati telerilevati.

Per conseguire tale finalità sono state prese in esame alcune aree minerarie del distretto minerario piombo-zincifero di Montevecchio - Ingurto - Gennamari, in cui i fenomeni di inquinamento sono ben noti e studiati da tempo. Le immagini del sensore Aster sono state scelte in quanto ben si prestano agli studi di carattere ambientale e per il monitoraggio dell'ambiente. Inoltre per tarare e validare opportunamente gli spettri delle immagini Aster, sono stati acquisiti con lo spettrometro da campo dati di riflettanza a terra. In ogni punto in cui sono state fatte le acquisizioni con lo spettrometro, sono stati prelevati dei campioni di suolo al fine di determinare i minerali presenti mediante analisi per diffrazione dei raggi X.

I risultati hanno mostrato corrispondenze ed incongruenze, in particolare i minerali che mostrano il punteggio più elevato sono quasi sempre la galena, seguita dalla pirite e dall'ortoclasio, che non sono stati rilevati con le analisi diffrattometriche, si tratta quindi verosimilmente di "falsi positivi". C'è invece perfetta congruenza nel riconoscimento del quarzo e di un minerale appartenente alla famiglia delle miche potassiche (biotite secondo l'analisi spettrale, muscovite-illite secondo la diffrazione X). Si conclude quindi che l'interpretazione dei dati spettrali di riflettanza deve essere adeguatamente supportata da una conoscenza della mineralogia della zona e da un'opportuna taratura.

Molto interessante il caso dell'epsomite, minerale di un certo interesse ambientale per la sua possibilità di ospitare ioni di "metalli pesanti" (Zn, Cd) e per i suoi cicli di precipitazione-dissoluzione legati, rispettivamente, alla stagione arida e alla stagione umida. La sua presenza, rilevata dall'analisi dei dati spettrali acquisiti a terra, non è confermata dalle analisi diffrattometriche, mentre è del tutto coerente con le osservazioni di campagna e gli studi pregressi sull'area. Una spiegazione verosimile appare essere che nel campione sottoposto a diffrazione è presente un inquinamento di quarzo, i cui riflessi si sovrappongono a quelli dell'epsomite.

Sulla base di questa calibrazione a terra, si è infine passati alla classificazione delle immagini Aster nelle bande VNIR (visibile - vicino infrarosso) e SWIR (infrarosso a corta lunghezza d'onda). La classificazione delle prime tre bande dell'Aster (0,52 - 0,86 μm) non ha prodotto dei risultati che possano essere considerati attendibili e significativi. Al contrario la classificazione delle immagini Aster SWIR ha consentito di visualizzare la distribuzione areale di alcuni minerali in modo sufficientemente attendibile, coerente con le osservazioni di campagna, le firme spettrali raccolte a terra e l'associazione mineralogica determinata per diffrazione X. In particolare, la distribuzione dell'epsomite sembra mappabile in modo verosimile.

In conclusione, nonostante, l'approccio proposto soffre ancora di alcune incertezze e limitazioni, in circostanze favorevoli sembra possibile individuare con sufficiente certezza particolari minerali che presentano una firma spettrale molto caratteristica, e che sono sufficientemente rari da potersi ritenere esclusivi di determinati contesti ambientali.

I risultati ottenuti, pertanto, incoraggiano nel proseguire in questo genere di studi per il monitoraggio di queste aree. Migliori risultati potrebbero essere conseguiti con un incremento dei dati di riflettanza spettrale a terra, con immagini satellitari o da aereo a maggiore risoluzione sia spettrale che spaziale, e da un affinamento degli algoritmi di analisi, il tutto adeguatamente supportato da analisi mineralogiche e geochimiche. In questo modo sarebbe possibile creare un modello sulla distribuzione di certi inquinanti, specifico per queste aree.

Bibliografia

- Abrams M. e Hook S., 2002 – *Aster User Handbook – Version 2* - Jet Propulsion Laboratory 4800 Oak Grove Dr. Pasadena, CA 9110.
- Agar B., 1996 – *Multi-Spectral data and their applications for gold exploration in Latin America*. – Presentato al 2° International Gold Symposium, Lima, Peru.
- Altinbas U., Kurucu, Y. e Bolca M., 2005 – *Using Advanced Spectral Analyses Techniques as possible Means of Identifying Clay Minerals* – Turk Journal Agric. For. Vol. 29.
- Amisani M., 2002 – *Monitoraggio dei corpi idrici di Rio Piscinas, Rio Irvi, Rio Naracauli (Sardegna sud-occidentale)*. – In: Schenk H. e Ulzega A. – *Monitoraggio scientifico nell'area del progetto Life Natura - Dune di Piscinas-Monte Arcuentu in Sardegna*. – Unione Europea: Progetto Life Natura 1997- Amministrazione Provinciale di Cagliari- Assessorato alla Programmazione territoriale e Sviluppo Economico.
- Bailey Bryan G. 2007 – *ASTER data and products: generation, characteristics and access* - Rivista Italiana di TELERILEVAMENTO, n°39.
- Beddel R., 2004 – *Remote Sensing in Mineral Exploration*. – SEG Newsletter – Society of Economic Geologists.
- Ben-Dor E., Goldshleger N., Beniamini Y., Agassi M. e Blumer D.G., 2003 – *The spectral reflectance properties of soil structural crust in the 1.2- to 2.5 µm spectral region* – Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 67.
- Biddau R., De Pelo S. & Dadea C., 2001 - *The abandoned mining area of Montevecchio-Ingurtosu*. – WRI - 10 Mid - Session Field trip, 13.
- Bioshop L. J. e Murad E., 2005 – *The visible and infrared spectral properties of jarosite and alunite* – America Mineralogist, Vol. 90.
- Brivio P. A., Lechi G. e Zilioli E., 2006 – *Principi e metodi di Telerilevamento* – CittàStudio Edizioni.
- Blowes D. W., Ptacek C. J. e Jurjovec J., 2003 – *Mill tailings: hydrogeology and geochemistry. Chapter 5* – In Environmental Aspects of Mine Wastes. Canada Short Course Series Vol. 31., 95-116, Jambor J. L., Blowes D. W. e A.I.M. Ritchie Editors.
- Caboi R., Cidu R., Fanfani L., Lattanzi P. e Zuddas P., 1999 – *Environmental mineralogy and geochemistry of the abandoned Pb-Zn Montevecchio-Ingurtosu mining district, Sardinia, Italy*. – Chronique de la Recherche minière, N° 534.
- Carmignani L., Barca S., Carosi R., Di Pisa A., Gattiglio M., Musimuci G., Oggiano G. & Pertusati P.C., 1992 - *Struttura della Catena Ercinica: guida alla escursione sul basamento paleozoico della Sardegna*. – MURST Gr. Inf. Geol. Strutt..
- Chen X., Warner T. A. e Campagna D., 2007 – *Integrating visible, near-infrared and short-wave infrared hyperspectral and multispectral thermal imagery for geological mapping at Cuprite, Nevada* – Remote Sensing of Environment, Vol. 110.
- Chessa A., Dettori B., Fanni S. e Piras G. L., 1999 – *Caratterizzazione delle acque del bacino del Rio Montevecchio (Sardegna SW)* - IV SEMINARIO EUROPEO DI GEOGRAFIA DELL'ACQUA Cagliari.
- Chevrel S., Belocky R. e Crosel K., 2002– *Monitoring and assessing the environmental impact of mining in Europe using advanced Earth Observation Techniques*. – Mineo – *First Results of the Alpine Test Site*. - Environmental Communication in the Information Society, EnviroInfo Vinee, W. Phillmann and K. Tochtermann Eds, Part1.
- Chikhaoui M., Bonn F., Bokoye A. I. e Merzouk A., 2005 - *A spectral index for land degradation mapping using ASTER data: application to a semi-arid Mediterranean catchment* - International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 7.
- Clark R. N., Swayze G. A., Wise R., Livio K. E., Hoefen T. M., Kokaly R. F. e Sutley S. J., 2007 - *USGS Digital Spectral Library splib06a* - U. S. Geological Survey Data Series 231; 20 Settembre (<http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>).

- Clark R.N., Boardman J., Mustard J., Kruse F., Ong C., Pieters C. e Swayze G. A., 2006 - *Mineral Mapping and Applications of Imaging Spectroscopy* - IGARSS 2006, 31 Luglio – 4 Agosto, Denver, Colorado (Abstract, submitted, 01/2006).
- Clark R.N., Swayze G. A., Wise R., Livo K. E., Hoefen T. M., Kokaly R. F. e Sutley S. J., 2003 - *USGS Digital Spectral Library splib05a* - U.S. Geological Survey, Open File Report 03-395.
- Clark, R. N., 1999 - *Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy* - In: *Manual of Remote Sensing*, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York.
- Clark R. N., Swayze G. A., Gallagher A. J., King T. V. V. e Calvin W. M., 1999 - *The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1 (0.2 to 3.0 μm)* - U.S. Geological Survey, Open File Report 93-592.
- Clark R.N., 1995 – *Reflectance Spectra* – American Geophysical Union.
- Clark R. N., Swayze G. A., Gallagher A. J., King T. V. V. e Calvin W. M., 1993 - *The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1 (0.2 to 3.0 μm)* - U. S. Geological Survey, Open File Report 93-592.
- Da Pelo S., 1998 - *Mineralogia e geochimica ambientale di aree minerarie attive e dismesse*. - Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra Consorzio Cagliari-Genova-Torino.
- Dessena M. A. e Melis M. T. 2006 – *Telerilevamento applicato* - edizioni Mako.
- Di Gregorio F. e Massoli-Novelli R., 1992 – *Geological Impact of Some Tailings Dams in Sardinia, Italy* – Environ Geol. Water Sci. Vol. 19, No. 3.
- Elachi C., 1987 - *Introduction to physics and techniques of remote sensing*. - John Wiley & Sons, New York.
- Escadafal R., Gouinaud C., Mathieu R. e Pouget M., 1993 - *Le spectroradiomètre de terrain: un outil de la télédétection et de la pédologie*. - Cah. Orstom, sér. Pédol., Vol. XXVIII, n° 1, 15-29.
- Fanfani L., Caboi R., Cidu R., Cristini A., Frau F., Lattanzi P. & Zuddas P. 2001 - *Impatto ambientale dell'attività mineraria in Sardegna: studi mineralogici e geochimici*. - Rend. Semin. Fac. Sci. Univ. Cagliari 70 (suppl.), 249-264.
- Fanfani L., 1996 – *Mobilizzazione di metalli pesanti nelle aree minerarie abbandonate*. – Quaderni di Geologia Applicata 4 suppl..
- Farifteh J., 2007 - *Spectral characteristics of salt-affected soils: a laboratory experiment* – In: *Imaging Spectroscopy of salt-affected soils: model-based integrated method* – Chapter 3, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC) and Utrecht University, Igitur, Utrecht Publishing & Archiving Services.
- Gaffey S. J., 1986 - *Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35 – 2.55 microns): calcite, aragonite, and dolomite*. - American Mineralogist, Vol. 71.
- Galvao S. L., Almeida-Filho R. e Vitorello I., 2005 - *Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: evaluation in a tropical savannah environment* - International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 7.
- Garcia-Melendez E., Ferrer-Julia M., Bermejo A. e Suarez M., 2004 – *Relacion entre la respuesta espectral (visible – infrarrojo cercano) y la composicion mineralogica de materiales sedimentarios del borde occidental de la Cuenca del Duero* – Rev. Soc. Geol. Espana Vol. 17 (1-2).
- Gomarasca M. A., 2004 - *Elementi di geomatica* - AIT ,Associazione Italiana di Telerilevamento.
- Grove C. I., Hook S.J. e Paylor E. D., 1992 - *Laboratory reflectance spectra for 160 minerals 0.4-2.5 micrometers: JPL Publication 92-2* - Jet propulsion Laboratory, Pasadena, California.
- Hubbard B. E., Crowley J. K. e Zimbelman D. R., 2003 - *Comparative Alteration Mineral Mapping Using Visible to Shortwave Infrared (0.4 – 2.4 μm) Hyperion, Ali and Aster Imagery* - IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, n° 6.
- Kalinowski A. e Oliver S., 2004 - *Aster mineral Index Processing Manual* - Remote Sensing Applications Geoscience Australia.

- Kariuki P.C., 2004 - *SPECTROSCOPY AND SWELLING SOILS An Integrated Approach* - This research was funded by the Netherlands Government through the International Institute for Geoinformation and Earth Observation (ITC) Department of Applied Earth Sciences, Delft University of Technology.
- Kruse F.A., 2004 - *Comparison of ATREM, ARCON, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude Aviris data of Boulder, Co* - In proceedings 13th JPL Airborne Geoscience Workshop, Jet Propulsion Laboratory, 31 Marzo – 2 Aprile, Pasadena, CA (in press).
- Kruse F. A., 2003 - *Mineral Mapping with AVIRIS and EO-1Hyperion*. - Presentato alla 12° JPL Airborne geoscience Workshop, 24-28 Febbraio, Pasadena, California.
- Kruse F. A., 2002 - *Comparison of AVIRIS and Hiperyon for Hyperspectral Mineral Mapping*. - Presentato alla 11° JPL Airborne geoscience Workshop, 4-8 Marzo, Pasadena, California.
- Kruse F. A., Boardman J. W. e Lefkoff A. B., 2000 - *Extraction of Compositional Information for Trafficability Mapping from Hyperspectral Data* - SPIE International Symposium on AeroSense, 24-28 Aprile, Orlando, FL., Vol. 4049.
- Kruse F. A. e Lefkoff A. B., 1999 - *Analysis of Spectral Data of Manmade Materials, Military Targets, and Background Using an Expert System Based Approach* - In Proceedings, ISSR'99, 31 Ottobre – 4 Novembre, Las Vegas, Nevada, published on CD-ROM by ISPRS.
- Kruse F. A., 1998 - *Advances in hyperspectral remote sensing for geologic mapping and exploration* -Presentato al 9° Australian Remote Sensing Conference, Sydeny, Australia.
- Kruse F. A., 1997 - *Characterization of active hot - springs enveroniments using multispectral and hyperspectral remote sensing*. - Presentato al Twelfth International Conference and Workshops an applied Geologic Remote Sensing, Denver, Colorado.
- Kruse F. A., 1994 - *Imaging spectrometer data analysis – A tutorial* - Intenational Symposium on Spectral Sensing Research (ISSSR), 10-15 Giugno, San Diego, CA., Vol. I.
- Kruse F. A., Lefkoff A. B., Boardman J. W., Heidebrecht K.B., Shapiro A. T., Barloon, P. J. e Goetz A. F. H., 1993 – *The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visulization and analysis of imaging spectrometer data*. – Remote Sensing Environment, Vol. 44.
- Kruse F. A., Perry S. L. e Caballero A. 2006 – *District-level mineral survey using airborne hyperspectral data, Los Menucos, Argentina* – Annali of Geophysics, Vol. 49, n.1.
- Lattanzi P., Zuddas P. & Frau F. 1998 – *Otavite from Montevecchio, Sardinia, Italy*. - Mineralogical Magazine. Vol. 62 (3).
- Leone A. P., Menenti M., Letizia A. e Colombo C. M., 2002 – *Uso della spettroradiometria ottica e di immagini iperspettrali per lo studio dei suoli in sistemi agricoli e forestali del Mediterraneo*. - AIT informa -Rivista Italiana di TELERILEVAMENTO, n° 24.
- Leone A. P., 2000 - *Spettrometria e valutazione della riflettanza spettrale dei suoli nel dominio ottico 400 – 2500 nm*. - AIT informa-Rivista Italiana di TELERILEVAMENTO, n° 19.
- Manuale dello Spettroradiometro Macam Sr-9050.
- Martinez-Alonso S., Rustad J.R. e Goetz A.F.H., 2002 - *Ab initio quantum mechanical modelling of infrared vibrational frequencies of the OH group in dioctahedral phyllosilicates. Part II: Main physical factors governing the OH vibrations* - American Mineralogist, Vol. 87.
- Mauger A. J., 2003 - *Comparison of various remote sensing and spectral radiometer instruments* - Mesa Journal.
- Mezned N., Abdeljaoued S. e Boussema M. R., 2007 - *Aster Multispectral Imagery for Spectral Unmixing based Mine Tailing cartography in the North of Tunisia* - Presentato all'Annual Conference 2007 Remote Sensing and Photogrammetry Society, Newcastle University.
- Montero I. C., Brimhall G. H., Alpers C. N. e Swayze G. A., 2005 - *Characterization of waste rock associated with acid drainage at thePenn Mine, California, by ground-based visible to short-wave infrared reflectance spectroscopy assisted by digital mapping*. - Chemical Geology Vol. 215.
- Montero I. C. e Brimhall G. H., 2001 - *Semi-automated Mineral Identification Algorithm for Ultraviolet, Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy* - Presentato al Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology. IAMG, Kansas.

- Plumlee G. S., 1999 – *The enviromental geology of mineral deposits – Charter 3* – In Reviews in Economic Geology-Vol.6A: The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A: Processes, Techniques and Health Issues.
- Quental L. Abreu M. M., Oliveira V., Sausa P., Batista M. J. Brito G., Vairinho M., Sausa J. e Martins I., 2001 - *Imagines Hiperspectrais para avaliacao e monitorizacao ambiental em areas mineiras: resultados preliminares do projecto Mineo na mina de Sao Domingos, Alentejo*. – Atti del Congresso Internazionale sobre Patrimonio Geologico e Mineiro (in press).
- RSI – Research Systems Inc., 2003 – *Envi User's Guide*.
- Salvadori I. & Zuffardi P., 1965 - *Contributo alla conoscenza della paragenesi del giacimento piombo-zincifero di Montevecchio (Sardegna). Nota introduttiva*. - Società Mineraria Italiana, Vol. XXI.
- Secchi F. A. G. Brotzu P. & Callegari E., 1991 – *The Arburese igneous complex (SW Sardinia). An example of dominant igneous fractionation leading to peraluminous cordierite-bearing leucogranites as residual melts*. – Chemical Geology, Vol. 92.
- Shrestha D. P., Margate D. E., Van der Meer F. e Anh H. V., 2005 – *Analysis and classification of hyperspectral data for mapping land degradation: an application in southern Spain* - International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 7.
- Stara P., Rizzo R. & Tanca G. A., 1996 – *Inglesiente e Arburese. Miniere e minerali*. Vol. II. EMSA – Ente Minerario Sardo.
- Swalf P. S., Crosta A. P. e De Souza Filho C. R., 2003 - *Remote sensing signature of the Morro do Ouro gold deposit, minas Gerais, Brazil, using reflectance spectrometry: application to mineral exploration using sparceborne multispectral sensors* - Revista Brasileira de Geociencias, Vol. 33.
- Swayze G. A., Smith K. S., Clark R. N., Sutley S. J., Pearson R. M., Vance J. S., Hageman P. L., Briggs P. L., Meier A. L., Singleton M. J. e Roth S., 2000 – *Using Imaging Spectroscopy to Map Acidic Mine Waste* – Environmental Science and Technology, Vol. 34.
- Thompson A. J. B., Hauff P. L. e Robitaille A. J., 1999 – *Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy* – SEG-Newsletter, Society of Economic Geologists, N° 39.
- Vane G. e Goetz A.F.H. 1988 - *Terrestnal imaging spectroscopy*. - Rem. Sening. Environ., 24, 1-29.
- Van de Meer F., 2006 – *Indicator kriging applied to absorption band analysis in hyperspectral imagery: A case study from the Rodalquilar epithermal gold mining area, SE Spain* – International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 8.
- Van der Meer F., 2004 – *Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery* – International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol.5.

GPS terminologia ed operatività: alcuni test di verifica tra teoria e prassi

Laura Baratin (*), Vittorio Grassi (**)

(*) DISBEF, Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo", Via Santa Chiara 27, 61029 Urbino
Tel. +39 0722.304302, Fax +39 0722.304240, e-mail: laura.baratin@uniurb.it

(**) Libero professionista: e-mail: vittorio.grassi@tiscali.it

Riassunto

In questi ultimi anni, in alcuni convegni pubblici e nella letteratura tecnico-scientifica, si riscontra spesso un uso inappropriato di alcuni parametri nel rilievo eseguito con il sistema NAVSTAR e nella post elaborazione.

Si confonde la tecnica del rilievo statico con quella dello statico rapido; si parla di rilievo statico con tempi di acquisizione di 10 minuti; si usano intervalli di acquisizione non adeguati; si usa un valore dell'angolo di cut off inappropriato anche per rilievi di precisione; si fanno test di verifica della bontà di un rilievo RTK con acquisizioni ad 1 secondo per 24 ore, si affermano accuratizie nei risultati con precisioni millimetriche non sempre supportate da procedure rigorose e così via.

A questo proposito si sono analizzati anche alcuni capitolati per l'appalto dei lavori di rilevamento, affetti spesso, da questo tipo di problematiche.

Per cercare di fare chiarezza su questi argomenti da una parte si è verificata la terminologia e l'operatività, a volte contraddittoria, su una vasta bibliografia sia tecnica che scientifica; dall'altra parte sono stati effettuati dei test sui metodi di rilievo, in particolare statico e statico rapido e sulla post elaborazione quale verifica tra teoria e prassi. Per poter rispondere in modo esauriente alle domande di come può influire sulla bontà del risultato finale, la scelta dell'intervallo di acquisizione, oppure quella del tempo di osservazione in base alla lunghezza della linea di base, sono stati eseguiti dei test con linee di base di 5, 10 e 15 km. Il rilievo è stato fatto con ricevitori a doppia frequenza. La ricerca ha comportato 27 giorni di rilievo ed 80 giorni di post elaborazione. Si è voluto impostare il lavoro cercando di rispettare, sia nel rilievo che nella post elaborazione dei dati, una situazione di "normalità" nel senso che sono stati scelti siti dove la qualità delle osservazioni non fosse né eccezionale né pessima.

Si presentano alla fine i primi risultati di alcuni test a supporto di una chiarezza operativa che consenta di precisare in modo più puntuale, anche i contenuti di una futura documentazione tecnico-scientifica.

Abstract

In recent years, both in public and at conferences in the technical and scientific literature, it was found inappropriate use of some parameters in the survey carried out with the NAVSTAR system and post processing.

As an example we cite the most striking phenomena: the technique of the relief to be confused with that of rapid static, it comes with significant static acquisition times of 10 minutes, using inappropriate acquisition intervals, using a value of 'cut-off angle inappropriate for precision measurements, tests are made to check the goodness of a RTK with acquisitions to 1 second to 24 hours or more to get results saying with pinpoint precision, etc..

In this regard, we have analyzed some of the works contract for the procurement of collection and it was found that often suffer the same problems.

To try to clarify these issues on the one hand there was the terminology and at times contradictory operatives operating an extensive bibliography of technical and scientific.

On the other side of the tests were performed on survey methods, including static and rapid static and do post-processing that occurs between theory and practice. In order to answer fully the questions of how it can affect the goodness of the final result of the choice of the range, or the acquisition of the observing time based on the length of the baseline tests were performed with baselines of 5, 10 and 15 km. The survey was done with dual-frequency receivers Leica, while the baseline of 30 km was used Topcon always dual-frequency receivers. The research involved 27 days of relief and 80 days post-processing. We wanted to set the job trying to respect both in relief in the post-processing of data a situation of "normality" in the sense that sites were chosen where the quality of the observations was not great nor bad.

We have the end results of these tests to support a business that allows to specify clearly, in appropriate terms, even the substance of future technical and scientific documentation.

Introduzione

In questi ultimi anni, in alcuni convegni pubblici e nella letteratura tecnico-scientifica, si riscontra spesso un uso inappropriato di alcuni parametri nel rilievo eseguito con il sistema NAVSTAR e nella post elaborazione (v. Bibliografia).

A titolo di esempio: si confonde la tecnica del rilievo statico con quella dello statico rapido; si parla di rilievo statico con tempi di acquisizione di 10 minuti; si usano intervalli di acquisizione (sampling rate) inappropriati; si usa un valore dell'angolo di cut off inadeguato anche per rilievi di precisione; si fanno test di verifica della bontà di un rilievo RTK con acquisizioni ad 1 secondo per 24 ore si affermano accuratissime nei risultati con precisioni millimetriche non sempre supportate da procedure rigorose; si fanno elaborazioni di linee di base di pochi km con la tecnica "ionofree", ecc. A questo proposito si sono analizzati anche alcuni capitolati per l'appalto dei lavori di rilevamento, affetti spesso, da questo tipo di problematiche (v. Bibliografia).

Per cercare di fare chiarezza su questi argomenti da una parte si è verificata la terminologia e l'operatività a volte contraddittoria su una vasta bibliografia sia tecnica che scientifica; dall'altra parte sono stati effettuati dei test sul metodo di rilievo dello statico rapido e sulla post elaborazione quale verifica tra teoria e prassi. Per poter rispondere in modo esauriente alle domande di come può influire sulla bontà del risultato finale la scelta dell'intervallo di acquisizione in base alla lunghezza della linea di base sono stati eseguiti dei test con linee di base di 5, 10 e 15 km. Il rilievo è stato fatto con ricevitori a doppia frequenza della società Leica Geosystems. La ricerca ha comportato 27 giorni di rilievo ed 80 giorni di post elaborazione. Si è voluto impostare il lavoro cercando di rispettare sia nel rilievo che nella post elaborazione dei dati una situazione di "normalità" nel senso che sono stati scelti siti dove la qualità delle osservazioni non fosse né eccezionale né pessima. Si presentano alla fine i primi risultati di alcuni test a supporto di una chiarezza operativa che consenta di precisare in modo più puntuale, anche i contenuti di una futura documentazione tecnico-scientifica.

Metodi di rilievo e tecniche di post elaborazione

Alcuni richiami generali ai metodi di rilievo statico rapido e alla successiva post elaborazione dei dati per introdurre il contesto e la linea seguita nella determinazione dei test. Dalla vasta letteratura presente sull'argomento si può definire che il rilievo statico rapido si esegue solo su linee di base di lunghezza pari ad un massimo di 10 – 15 km, con un angolo di elevazione (cut-off) pari ad almeno 15 gradi (20° per precisioni elevate) e mai inferiore a 15°, in quanto i modelli di correzione dei disturbi troposferici e ionosferici partono solo e soltanto da 15°; infine la velocità o intervallo di acquisizione (sampling rate) va da 5 a 15 secondi. Questi sono i parametri considerati nei test eseguiti tralasciando, in questa fase, l'influenza del tempo di acquisizione, che sarà analizzato successivamente.

Sempre dalla letteratura tecnico-scientifica si afferma che una volta acquisiti i dati debbono essere elaborati con opportuni programmi forniti dalle case costruttrici degli strumenti i cosiddetti "programmi commerciali" oppure con programmi scientifici di cui i più noti sono il Bernese, o il Gipsy, non sempre alla portata di un utente medio. Prima dell'elaborazione vanno scelti opportuni parametri di calcolo tipo le frequenze da utilizzare, i modelli della troposfera e della ionosfera, e così via.

Per quanto riguarda i modelli della troposfera e della ionosfera, alcuni programmi ne offrono veramente molti ed è necessario che l'utente ne conosca l'esatto funzionamento per scegliere quello più adeguato alla situazione del rilievo in cui si trova ad operare. Inoltre molti software permettono anche di usare modelli "nulli" cioè senza l'influenza della troposfera o della ionosfera, con una perdita evidente della qualità dei risultati finali.

Una volta elaborati i dati, infine, quasi tutti i programmi forniscono dei test statistici sulla risoluzione delle ambiguità, sull'uso dei dati rilevati, e sulla bontà dei risultati avuti con parametri tipo "ratio", "contrast" od altri.

Maggiore attenzione va posta in questa fase di analisi dei dati in quanto la soluzione delle ambiguità deve essere totale. Se ci fossero 20 ambiguità da risolvere, ad esempio, devono essere risolte tutte e 20 e cioè il 100%; non risulta una buona soluzione se queste ambiguità non sono tutte risolte. Inoltre devono essere stati utilizzati tutti i dati rilevati, qualora il programma segnali che la percentuale dei dati fosse inferiore al 100% significa che ci sono stati dei problemi e che la soluzione presentata non è esatta. La bontà dei risultati può essere controllata anche con alcuni di questi parametri; per esempio se una soluzione ha un valore di ratio 4 ed un'altra di ratio 2 va preferita la prima soluzione alla seconda.

La posizione dei siti e le prove eseguite

I siti utilizzati per il presente lavoro sono posizionati come indicato nella fig. 1, la lunghezza approssimativa delle linee di base è rispettivamente: UFF – ABR2 = 5 km, UFF-BACCA = 10 km e UFF-TOR = 15 km. Il metodo di rilievo analizzato nei test eseguiti, come già accennato precedentemente, è stato quello statico rapido applicato su linee di base di 5, 10, e 15 km. In totale sono stati elaborati 2974 file così distribuiti:

- 1537 file per la linea di base di 5 km
- 831 file per la linea di base di 10 km
- 606 file per la linea di base di 15 km

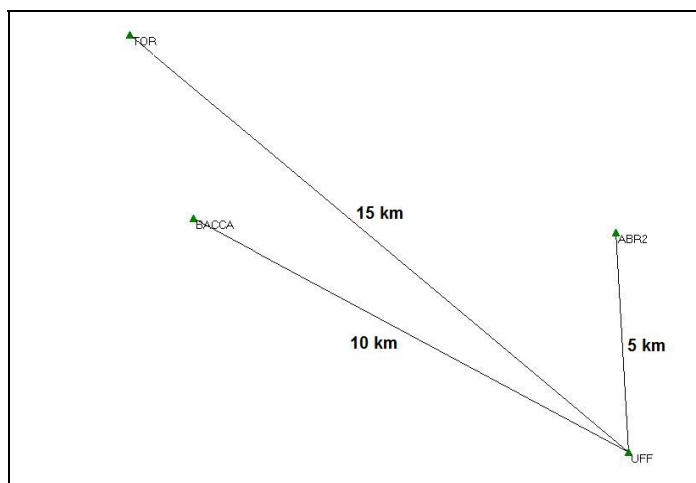


Figura 1 – Posizione dei siti utilizzate per le prove.

Per soddisfare anche alla domanda dell'influenza dell'intervallo di acquisizione sull'accuratezza della misura, le linee di base di 5, 10 e 15 km sono state rilevate con un intervallo di acquisizione di 5, 15 e 30 secondi. Il confronto dei risultati ottenuti nei vari test è stato effettuato con un valore ritenuto "vero" ottenuto con un rilievo statico della durata di 3 giorni su ciascuna linea di base con i seguenti parametri: Angolo di cut off = 15°, Sampling rate = 30°.

Per la post elaborazione dei dati è stato utilizzato il programma LGO ver. 7.1, un programma commerciale, in modo da ritrovarsi nelle stesse condizioni di un operatore medio. I parametri scelti per l'elaborazione dei dati sono quelli indicati nella tabella riportata di seguito:

Cut-off angle:	15°
Ephemeris type (GPS):	Broadcast
Solution type:	Automatic
GNSS type:	Automatic
Frequency:	L1 and L2
Sampling rate:	Use all
Tropospheric model:	Computed
Ionospheric model:	Computed
Use stochastic modelling:	Yes
Min. distance:	8 km
Ionospheric activity:	Automatic

Gli interventi sui dati sono stati volutamente limitati all'eliminazione di un satellite nel caso in cui impedisse la corretta soluzione delle ambiguità, sempre nell'ottica di mettersi nelle condizioni di un utente medio, anche se il programma può consentire numerosi altri tipi di interventi.

Le linee di base elaborate sono state accettate solo se rispondevano ai requisiti esposti precedentemente, e cioè ad esempio:

- Total number of GPS ambiguities: 16
- Number of fixed GPS ambiguities: 16
- Percentage of fixed epochs (L1): 100%
- Percentage of fixed epochs (L2): 100%
- Percentage of fixed epochs (overall): 100%

Inoltre, per tutti i rilievi, il GDOP è sempre stato inferiore al valore 6 e le elaborazioni eseguite sono state fatte sempre sugli stessi dati. Ad esempio sui dati rilevati per la linea di base di 5 km, con un dato intervallo, sono stati eseguiti calcoli con differenti tempi di acquisizione. Sempre sulla stessa linea di base, stabilito il tempo, sono stati eseguiti calcoli con i diversi intervalli (Sampling rate).

Risultati dei test

Si riportano in forma sintetica i risultati avuti sui vari test eseguiti utilizzando come tempo di acquisizione quelli minimi prescritti. Le tabelle illustrano come variano i risultati al variare dell'intervallo e del tempo di acquisizione. I risultati esposti nelle tabelle che seguono sono espressi in m, mentre la latitudine e longitudine sono in secondi sessagesimali. I valori riportati nelle tabelle rappresentano la differenza tra lo scarto minimo e quello massimo avuto nel periodo di osservazione rispetto al valore avuto nel rilievo statico della stessa linea di base eseguito, come già riferito, con una acquisizione di 3 giorni continuativi con un angolo di elevazione di 15° ed un intervallo di acquisizione di 30 secondi.

Elaborazione 5 km 5 minuti								N° files
	m	m	m	sec.	sec.	m	m	elaborati
Intervallo	ΔX	ΔY	ΔZ	Δlat	Δlon	Δh	ΔD	
5 secondi	0.145	0.121	0.146	0.00201	0.00144	0.152	0.135	440
15 secondi	0.061	0.035	0.055	0.00194	0.00119	0.048	0.060	575
30 secondi	0.054	0.031	0.059	0.00167	0.00110	0.054	0.051	522

Tabella 1 – Risultati avuti per una base di 5 km al variare dell'intervallo.

Elaborazione 10 km 10 minuti								N° files
	elaborati	m	m	sec.	sec.	m	m	elaborati
Intervallo	ΔX	ΔY	ΔZ	Δlat	Δlon	Δh	ΔD	
5 secondi	0.293	0.115	0.200	0.00230	0.00305	0.350	0.055	300
15 secondi	0.102	0.072	0.093	0.00160	0.00262	0.132	0.053	268
30 secondi	0.094	0.042	0.084	0.00132	0.00130	0.126	0.037	263

Tabella 2 – Risultati avuti per una base di 10 km al variare dell'intervallo.

Elaborazione 15 km 15 minuti								N° files
	elaborati	m	m	sec.	sec.	m	m	elaborati
Intervallo	ΔX	ΔY	ΔZ	Δlat	Δlon	Δh	ΔD	
5 secondi	0.204	0.063	0.189	0.00148	0.00165	0.285	0.044	202
15 secondi	0.175	0.064	0.158	0.0013	0.00157	0.236	0.040	150
30 secondi	0.126	0.050	0.142	0.00120	0.00143	0.190	0.036	254

Tabella 3 – Risultati avuti per una base di 15 km al variare dell'intervallo.

Come si può notare l'aumento dell'intervallo di acquisizione comporta sempre, a qualsiasi lunghezza della linea di base, un aumento nell'accuratezza dei risultati.

E' noto che le osservazioni eseguite di notte sono molto più "pulite" di quelle eseguite di giorno. Nei test eseguiti le osservazioni sono state continuative e quindi anche di notte, in questo modo si è avuta la possibilità di isolare le osservazione diurne, nell'intervallo tra le ore 6:00 e le 22:00, da quelle notturne nell'intervallo tra le 22:00 e le 6:00.

Elaborando successivamente i dati su ciascuna linea di base, con i diversi intervalli di acquisizione, si è avuta la conferma che di notte l'accuratezza dei risultati è nettamente migliore di quella diurna a parità di condizioni (durata delle osservazione, intervallo di acquisizione, ecc.) soltanto nell'8% dei casi esaminati; mentre risulta leggermente migliore solo nel 13% dei casi esaminati. Entrambi i miglioramenti sembrano casuali in quanto indipendenti dalla lunghezza delle linee di base, dall'intervallo di acquisizione e dalla durata delle osservazioni.

Per brevità di esposizione si riportano nelle figure 2 e 3 le variazioni della quota relativa alla linea di base di 10 km rilevata con 30 secondi d'intervallo e 10 minuti di acquisizione dove si può vedere un netto miglioramento nell'accuratezza dei risultati.



Figura 2 – Variazione della quota durante il giorno.

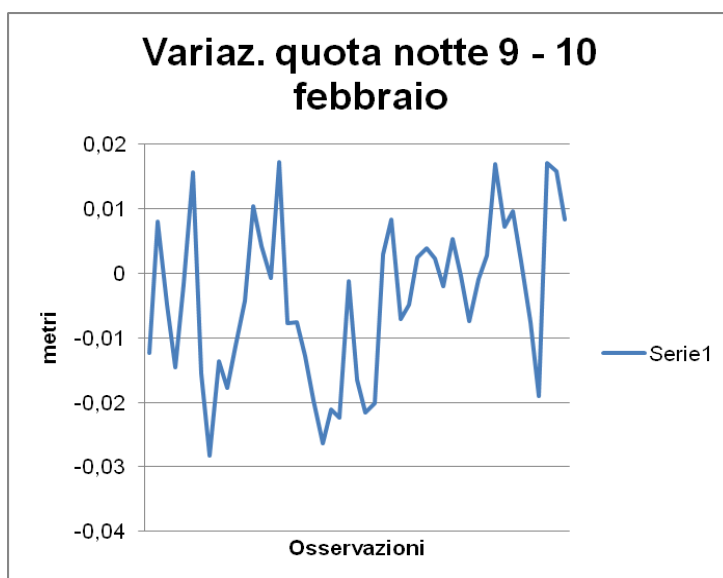


Figura 3 – Variazione della quota durante la notte.

Invece, nelle figure 4 e 5, che si riferiscono ad una linea di base di 5 km rilevata con 5 secondi d'intervallo e 10 minuti di acquisizione, si può notare che il miglioramento è poco significativo.



Figura 4 – Variazione della quota durante il giorno.



Figura 5 – Variazione della quota durante la notte.

Infine è da osservare che nel 79% dei casi osservati non si sono avuti miglioramenti e qualche volta (10%) i dati notturni sono peggiorati, a parità di condizioni, di quelli riscontrati di giorno.

Conclusioni

Dai test effettuati emerge chiaramente che con i parametri utilizzati per il rilievo e la post elaborazione dei dati si ottiene, a parità di altre condizioni, un'accuratezza che peggiora all'aumentare della lunghezza della linea di base. Tale accuratezza, invece, migliora, a parità di tempo, aumentando il sampling rate. Quindi, quando si desidera una elevata accuratezza bisogna portare le due variabili a tali valori. E' fortemente sconsigliato superare con lo statico rapido il rilievo di linee di base maggiori di 10 – 15 km in quanto l'accuratezza peggiora notevolmente.

Chiaramente si possono ottenere risultati notevolmente migliori sia con un più mirato intervento sui dati che con un corretto uso di programmi scientifici, che non sempre sono alla portata di un operatore medio per mancanza di una adeguata formazione.

Circa il miglioramento dell'accuratezza nei rilievi notturni, che non era propriamente l'oggetto dei test, si è avuto modo di constatare che di notte soltanto nell'8% dei casi esaminati l'accuratezza dei risultati è nettamente migliore di quella che si riesce ad ottenere di giorno; mentre è di poco migliore solo nel 13% dei casi esaminati. Questi valori sono troppo bassi per poter affermare che il miglioramento sia reale e soprattutto costante; entrambi i miglioramenti sembrano casuali in quanto indipendenti dalla lunghezza delle linee di base, dall'intervallo di acquisizione e dalla durata delle osservazioni, inoltre variano moltissimo da una notte a quella successiva.

Grazie a questi test si possono definire in modo appropriato alcuni termini relativi al rilievo statico rapido e alla post elaborazione, nonché alle modalità di applicazione, l'analisi fin qui condotta proseguirà analizzando le modalità di rilievo in tempo reale.

Ringraziamenti

Si ringrazia la Leica Geosystems per aver messo a disposizione i programmi GNSS QC v2.1 ed LGO v. 7.1 ed un particolare ringraziamento va ai geometri Giuseppe Furfaro e Leonardo Massafra che hanno dedicato moltissimo tempo alla attività di rilievo dei dati.

Riferimenti bibliografici

- Guzzetti F., Poli A., Trebeschi A. (1998), "Realizzazione di reti GPS per l'appoggio cartografico: norme di capitolato", *Bollettino SIFET* 98, 4: 31-32
- Fiani M., Prezioso G. (2003), "Una rete GPS per il monitoraggio delle variazioni morfologiche delle coste", *Bollettino SIFET* 03,1: 39-41
- Betti B., Biagi L., Bellone T. (2008), "Dalle reti statiche alle reti dinamiche: reti per il tempo reale e IGM95 in Piemonte e Lombardia", *Bollettino SIFET* 08, 2: 34
- Banni A., Sanna G., Vacca G., Vivinet A. (2008), "La rete NRTK SARNET della Sardegna", *Bollettino SIFET* 08, 3: 25-26
- Giunta regionale del Veneto, 1999. *Capitolato per la realizzazione CTR Veneto*.
- Intesa Stato, Regioni, Enti Locali, 2001. *Specifiche tecniche raffittimento della rete fondamentale IGM95*.
- Comunità montana Valtellina di Sondrio, 2002. *Specifiche tecniche per l'esecuzione di raffittimento della rete geodetica fondamentale IGM95*: 5
- Regione Liguria, 2003. *Capitolato speciale d'appalto aggiornamento della carta tecnica in scala 1:5000 e 1:10000 con formazione di cartografia numerica 3D e data base topografico 2D*: 9-10
- Regione Toscana, 2004. *Specifiche tecniche per il raffittimento della rete geodetica fondamentale IGM95 nel territorio della regione Toscana*: 6
- Collegio dei Geometri della provincia di Brescia, 2008. *Specifiche tecniche per l'istituzione di reti tecniche con metodologia GPS*: 7-10
- DIIAR Politecnico di Milano - Lombardia Informatica *Predisposizione degli standard regionali per il rilevamento e la gestione GIS delle reti tecnologiche - SPECIFICHE DI RILIEVO*: 4-5
- Federal Geodetic Control Committee (FGCC) 1988. *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 1: Reporting Methodology*: 2-12.
- Federal Geodetic Control Committee (FGCC) 1988. *Geometric geodetic accuracy standards and specification for using GPS relative positioning technique*, version 5.0
- G.Gurtner, W. Roathacher, M. Wild, Frei, E (1990), "Relative static positioning with the Global Positioning System", *IAG Symposia Proceedings*, vol. 102
- Landau H (1990), "GPS processing techniques in geodetic network", *Second International Symposium on precise positioning with the GPS*, Ottawa, September 3-7: 373-386
- Frei E., Beutler G. (1990), "Rapid static positioning based on the fast ambiguity resolution approach", *Second International Symposium on precise positioning with the GPS*, Ottawa, September 3-7: 1196-1216
- Hoffman-Wellenhof B. (1992), "GPS Theory and practice", Springer-Verlag, New York: 118-134, 178-201
- Baratin L., Grassi V. (2010), "Topografia: teoria, applicazioni, esercizi", Pitagora Editore, Bologna: 276-278, 407-420, 449-450

Un applicativo per il raddrizzamento fotogrammetrico senza informazioni metriche nello spazio oggetto

Luigi Barazzetti

Politecnico di Milano, Dip. Building Environmental Science and Technology
P.za Leonardo da Vinci 32, Milano, luigi.barazzeiit@polimi.it

Riassunto esteso

L'articolo introduce "Metric Rectifier" (MR), un applicativo per il raddrizzamento fotogrammetrico implementato dalla sezione Rilevamento del Laboratorio IC&T del Politecnico di Milano. MR, sviluppato in ambiente MATLAB, è disponibile all'indirizzo www.icet-rilevamento.lecco.polimi.it. Oltre alle tradizionali procedure per la formazione di fotopiani MR utilizza una procedura di elaborazione basata sui parametri di calibrazione della camera e sull'individuazione della *vanishing line*. In questo riassunto il funzionamento generale del metodo verrà solamente introdotto, mentre maggiori dettagli sono descritti in Barazzetti (2011).

Il vantaggio offerto da questa particolare metodologia di raddrizzamento consiste nell'evitare l'acquisizione delle tradizionali informazioni metriche (distanze, punti di appoggio, ...) nello spazio oggetto. Il principio di funzionamento si basa sulla stima di una rotazione sintetica che porta l'asse ottico della camera a coincidere con la normale del piano oggetto. Collins e Beveridge (1993) hanno dimostrato come questa informazione possa essere stimata a partire dalla *vanishing line* $\mathbf{l}^*$ e dalla calibrazione della camera utilizzata, incapsulata in una matrice $\mathbf{K}$ di dimensione 3×3 che contiene i parametri di orientamento interno (Hartley e Zisserman, 2004).

Nelle comuni applicazioni fotogrammetriche le camere impiegate vengono normalmente calibrate ed è pertanto possibile generare una immagine priva di distorsione, portando il punto principale nel centro e stimando il valore di distanza principale c . Alcuni software commerciali (per esempio iWitness, Australis o PhotoModeler) permettono il completamento delle operazioni di calibrazione in pochi minuti ed in modalità completamente automatica sfruttando opportuni target codificati. Per applicazioni che richiedono una minore accuratezza geometrica dell'immagine raddrizzata, c può essere sostituita con il valore della focale f , come ad esempio accade spesso nelle applicazioni di Computer Vision.

La *vanishing line* potrà invece essere stimata qualora nel piano dell'immagine siano visibili set di rette tra loro parallele corrispondenti, per esempio, a figure quali parallelogrammi o rettangoli nello spazio oggetto.

È ben noto come l'operazione di raddrizzamento consiste nella stima di una trasformazione omografica, che può essere modellizzata matematicamente tramite una matrice non singolare $\mathbf{H}$ con 8 gradi di libertà. Nel caso in cui la camera venga calibrata, la trasformazione può essere calcolata usando una particolare omografia della forma $\mathbf{H} = \mathbf{K}\mathbf{R}\mathbf{K}^{-1}$, ove $\mathbf{R}$ è composta da un set di vettori ortonormali stimati a partire da $\mathbf{K}$ e $\mathbf{l}^*$.

Il problema si riduce alla generazione di una base ortonormale di $\mathbf{R}^3$ di cui è noto a priori un solo versore. La stima dei rimanenti vettori è affetta da una ambiguità che porta ad un numero infinito di soluzioni (dato un generico vettore di $\mathbf{R}^3$ vi sono infiniti vettori ad esso ortogonali) corrispondenti all'impossibilità di fissare la rotazione dell'immagine raddrizzata attorno alla normale al piano della stessa. Ciò rende comunque possibile la creazione del fotopiano senza misurare alcuna informazione metrica nello spazio oggetto, come distanze, rapporti di distanze, angoli, punti di appoggio, ecc. Ovviamente, non essendo noto alcun fattore di scala (deducibile solo da

informazioni metriche nello spazio oggetto) sarà presente una ulteriore ambiguità che tuttavia non inficia le proprietà metriche dell'immagine finale.

In figura 1 sono riportati 3 esempi di operazioni di raddrizzamento secondo la procedura proposta. Nel primo (a – Giovanni Bellini - Calvario) e nel secondo caso (b – La piramide del Louvre) il raddrizzamento è stato eseguito a partire dai parametri di calibrazione e dalla misura nel piano dell'immagine di un rettangolo (la cornice) ed un parallelogramma. Nessuna informazione metrica numerica (ad esempio il rapporto base-altezza nel primo caso) è stata quindi utilizzata. L'immagine dell'edificio c (“Dockland office building” – Amburgo) è invece stata scaricata direttamente da Internet ed è noto solo il valore di distanza focale, ricavato dagli EXIF associati all'immagine. Siccome tale facciata ha la forma di un parallelogramma, queste informazioni permettono un raddrizzamento (approssimato in quanto c viene sostituita da f) al fine di ripristinare le proprietà metriche.

Oltre alla procedura appena descritta (sinteticamente), MR dispone anche delle classiche funzioni per il raddrizzamento digitale, quali l'uso di punti di appoggio o di rapporti base-altezza noti.

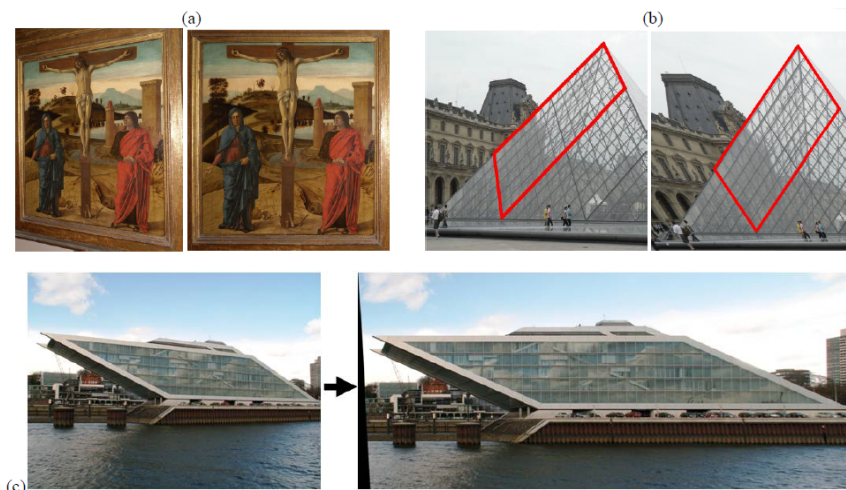


Figura 1 – Alcuni esempi di oggetti raddrizzati con Metric Rectifier.

Ringraziamenti

Si ringraziano Gianfranco Forlani, Marco Scaioni, Mario Alba, Fabio Roncoroni e Mattia Previtali per il supporto teorico e pratico fornito nel corso del presente lavoro.

Bibliografia

- Barazzetti, L. (2011). Metric rectification via parallelograms. Proc. of SPIE Optics+Photonics, Vol. 8085, 23-26 May, Munich, Germany.
- Collins, R. T. and Beveridge, J. R. (1993) Matching perspective views of coplanar structures using projective unwarping and similarity matching. Proceedings of CVPR, New York City, 9 pp.
- Hartley R., Zisserman A. (2004). Multiple View Geometry in computer vision. Cambridge University Press., Cambridge, 672 pp.

Un poligono di Calibrazione per Mobile Mapping System finalizzato alla valutazione delle accuratezze ottenibili

Maurizio Barbarella (*), Augusto Burchi (**), Stefano Gandolfi (*), Ernesto Ronci (**)

(*) DICAM-ARCES, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna
Tel. 051 2093106, Fax 051 2093114, e-mail: nome.congome@unibo.it

(**) Siteco Informatica S.r.l., Via della Salute 14, 40132 Bologna, Tel. 051-6414470, Fax. 051-400589
congome@sitecoinf.com

Abstract

Come noto la Mobile Mapping Technology (MMT) rappresenta, soprattutto in alcuni ambiti, uno strumento di grande efficacia e di largo utilizzo. L'aggiornamento del Catasto strade avviene recentemente quasi esclusivamente avvalendosi di tale tecnologia ed è in grado di proporre prodotti di grande dettaglio e completezza a fronte di costi accessibili. Alla precisione di ogni singolo sensore installato sul veicolo (Laser scanner, apparati fotogrammetrici, Ground Penetrating Radar, Profilometri, etc..) viene generalmente associata una posizione ottenuta da un sistema di navigazione GPS/IMU e odometri. Nell'ambito di una collaborazione inserita all'interno del programma PRRITT2008 (Programma Regionale per la Ricerca Industriale, l'Innovazione e il Trasferimento Tecnologico) della Regione Emilia Romagna sono stati condotti accurati studi volti a comprendere il comportamento dei sistemi di navigazione in condizioni al contorno differenti. Per tale studio è stato necessario realizzare un poligono di calibrazione costituito da punti rilevati con accuratezza centimetrica mediante rilievi tradizionali e riconoscibili nei fotogrammi acquisiti dal veicolo. Tale aspetto ha consentito di valutare meglio il comportamento dei sistemi di navigazione ma ha anche permesso di impostare una azione volta a migliorare la qualità del posizionamento in condizioni di assenza prolungata di segnale GPS (condizione critica in quanto il sistema di navigazione in quei casi demanda la stima di posizione ed assetto solo alla piattaforma inerziale che, come noto, presenta effetti di deriva). Gli studi condotti hanno però richiesto alcune modifiche anche alla suite di gestione dei dati MMS. In particolare è stato ristrutturato completamente l'impianto di gestione dei dati consentendo di poter inserire anche punti rilevati esternamente (i punti rilevati con tecniche differenti vengono dunque rappresentati a video e sovrapposti ai filmati). Nel lavoro si riportano le principali modifiche effettuate al codice, alcuni confronti realizzati sul poligono di calibrazione ed i risultati ottenuti con le più recenti versioni del software di integrazione GPS/IMU basato su filtro di Kalman.

Abstract

Mobile Mapping Systems are one of the most productive apparatus for road survey. Any observable acquired by the sensors that are installed into the vehicle can be located in a map using a navigation system. These observables are acquired in motion and the accuracy for each one can be different from a static survey. Moreover the different work boundary conditions can change the final accuracy of the survey (both for geometric survey and for all the other surveys such as road characterization). In order to give some answer to the above mentioned problems a test field for MMS was designed and realized. This test field is constituted by a track that considers different typology of boundary conditions for the GPS positioning, for roads typology etc. The test field is, at the moment, fully defined for the positioning aspects. Along a path stable points are identified or materialized, clearly visible on the images acquired by a MMS running the path. The positions of the points are measured by topographic methods with high precision (centimeter level), in an

geodetic absolute reference system. The field test has been set up in Bologna (Italy), is about 10 km long and, for the positioning aspects, is fully defined and surveyed. In order to manage and facilitate the use of external points as reference for the evaluation of differences some changes has been performed also in the software that manage the MMS. In this work the first results obtained by the comparison between the points of the test field (surveyed classically using GPS/Total Station) and the MMS survey. Moreover all the most significant changes into the software package has been reported.

1. Introduzione

I veicoli denominati con il termine MMS (Mobile Mapping System) costituiscono probabilmente il punto più avanzato di fusione delle comuni tecniche di rilievo topografico. Coppie di camere poste sul veicolo ed in grado di acquisire immagini in modo sincrono consentono di eseguire rilievi fotogrammetrici riferiti al sistema veicolo. Il Laser Scanner consente di generare nuvole di punti riferite al sistema di riferimento del veicolo. Sistemi GNSS e piattaforme inerziali consentono di stimare posizione ed assetto rispetto a sistemi globali del veicolo ad ogni istante di tempo. Conoscendo i vettori che congiungono il sistema di riferimento del veicolo ai vari sensori installati a bordo (bracci di leva) ed utilizzando il sistema di navigazione come “collegamento” tra sistema di riferimento locale (“Veicolo”) e sistema Globale è possibile far sì che ogni rilievo eseguito dal veicolo sia direttamente collocabile nel sistema di riferimento globale ed eventualmente in riportabile in un qualsiasi sistema cartografico. Ovviamente la combinazione di diversi apparati di rilievo porta ad un decadimento delle precisioni globali che è possibile stimare mediante metodi di propagazione della varianza a livello teorico. In realtà, se è possibile stimare con buona accuratezza le precisioni dei sistemi di rilievo fotogrammetrico e Laser scanner, è decisamente più critico stimare le reali accuratezze dei sistemi di navigazione anche perché fortemente perturbabili e mutevoli al variare delle condizioni al contorno. In particolare nei percorsi altamente urbanizzati la presenza di scarsa copertura satellitare rende difficoltoso il posizionamento GNSS e il sistema di navigazione stima i parametri solo con l'ausilio della piattaforma inerziale che per sua natura è affetta da *drift* principalmente dipendenti dal tempo. Per tale ragione e per comprendere come poter eventualmente migliorare le prestazioni del sistema in tali contesti, è stato realizzato un poligono di verifica e calibrazione basato sulla individuazione e misura di punti naturali osservabili dal veicolo e collocati in aree differenti (rispondenti a condizioni di lavoro diverse).

2. Definizione del poligono di calibrazione

2.1 Caratteristiche e requisiti del poligono

Al fine di realizzare un poligono di calibrazione per MMS è stato preliminarmente condotto uno studio dettagliato inerente le differenti tipologie di osservabili generalmente acquisite da sistemi di tale natura. In seguito, per ogni singola tipologia di osservabile sono stati eseguiti studi sulla possibilità di poter verificare il corretto funzionamento in differenti condizioni al contorno. In generale oltre alle tipiche grandezze geometriche (posizione di punti e misura di distanze) sono state identificate altre tre tipologie di grandezze che possiamo sintetizzare come parametri ambientali, parametri strutturali stradali (indica IRI, grado di ammaloramento del manto stradale, dimensioni delle fessurazioni, etc..) e parametri termici. Il poligono di calibrazione e verifica si pone dunque l'obiettivo finale di costituire un riferimento per ciascuna delle grandezze sopra menzionate e dunque se da un lato si devono realizzare procedure per un rilievo di alta accuratezza delle grandezze in oggetto dall'altro si deve poter contemplare la possibilità che ciascuna singola grandezza possa essere rilevabile in modo più o meno accurato dal veicolo a seconda delle condizioni al contorno nelle quali opera e considerando anche il problema che ciascun sensore installato su un sistema MMS deve, in condizioni operative normali, operare in movimento. Si è trattato dunque di identificare un percorso, non particolarmente lungo, capace di racchiudere al suo interno tutti i requisiti prefissati per ciascuna tipologia di osservabile e, una volta identificato,

rilevarlo (o strumentarlo) in modo da poter essere utilizzabile come riferimento per un qualsiasi sistema MMS. Il percorso è stato individuato nell'area di Bologna e racchiude differenti tipologie di strade, gradi di ammaloramento stradale, livelli medi di inquinamento, e differenti condizioni operative per il sistema di navigazione. Tale ultimo aspetto infatti costituisce un punto molto importante in quanto il sistema di navigazione è il responsabile della corretta collocazione di un qualsiasi osservabile venga rilevato dal veicolo. Il sistema di navigazione si basa generalmente sulla integrazione di uno o più GNSS con piattaforme inerziali (IMU) e odometri. Se il sistema GNSS non è in grado di fornire posizioni (ossia quando riceve dati da un numero di satelliti inferiore a 4) l'apparato di navigazione continua a stimare posizioni ed assetto utilizzando esclusivamente il sistema inerziale che, come noto, presenta problemi di deriva principalmente dipendenti dal tempo. Dunque la qualità della traiettoria è generalmente dipendente dalla qualità del posizionamento GNSS e, qual ora il sistema si trovi a funzionare per lunghi periodi senza posizioni GNSS allora ci si possono aspettare spostamenti anche metrici nella stima della traiettoria. Un bias nel sistema di navigazione si ripercuote direttamente sulla stima della posizione di tutte le grandezze geometriche rilevabili ad esempio con un Laser Scanner o con un sistema fotogrammetrico. Se il poligono è stato progettato ed individuato per rispondere alle differenti tipologie di osservabile rilevabile dai sistemi MMS, la sua realizzazione è stata completata esclusivamente per gli aspetti legati al posizionamento. Nel lavoro in oggetto si parlerà quindi esclusivamente di tale aspetto.

2.2 Descrizione del tracciato in relazione alla verifica del sistema di navigazione e rilievo geometrico

Il poligono di calibrazione (figura 1) è lungo circa 10 chilometri e si percorre in 35 minuti circa. Tale percorso è stato progettato, per quanto attiene gli aspetti geometrici considerando la possibilità di disporre di una area altamente urbanizzata (zona A) ed un'area a bassa concentrazione abitativa (Zona B). L'area A si sviluppa nel centro storico di Bologna dove è generalmente critico il posizionamento GNSS e dunque dove ci si aspettano lunghe finestre di assenza di posizionamento satellitare. In tale area è possibile verificare dunque la qualità del sistema di navigazione. L'area B invece è una area dove ci si aspetta che il sistema di navigazione funzioni al meglio delle sue potenzialità. In tale modo è possibile verificare il comportamento del sistema di navigazione sia in zone ottimali sia in aree critiche. Al fine di poter verificare la qualità sul posizionamento sia del sistema di navigazione sia dei sistemi di rilievo (fotogrammetrico e laser scanner), sono stati individuati e misurati con precisione sub-decimetrica numerosi punti visibili dal sistema MMS. In particolare sono stati utilizzati punti naturali quali spigoli dei tombini delle reti fognarie e elettriche, segnaletica orizzontale e verticale e spigoli di edifici. Il rilievo di tali punti doveva essere inquadrato nello stesso sistema geodetico utilizzato dal sistema MMS che generalmente è

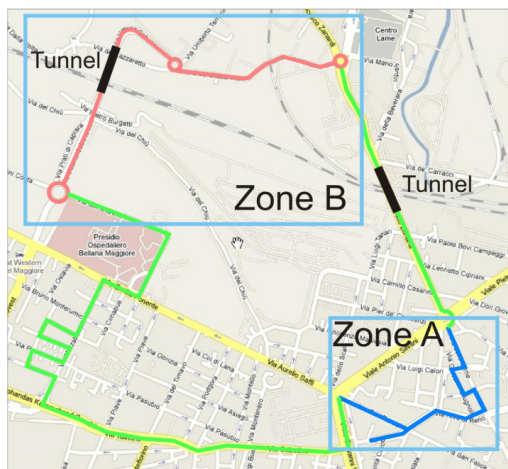


Figura 1 – Planimetria del poligono di calibrazione con indicate le due aree preposte per le verifiche sulla precisione del sistema di rilievo topografico.

O il sistema geodetico (WGS-84, ITRFXX) o una proiezione Cartografica (ad esempio UTM). In totale sono stati rilevati 400 punti di cui 170 nella Zona A e 230 nella zona B.

Di seguito vengono mostrati in modo sintetico i principali aspetti inerenti il poligono realizzato per gli aspetti geometrici e le modalità di rilievo sia per la zona A che per la Zona B.

2.4 Il rilievo nell'area A

Come già anticipato la zona A del poligono di calibrazione presenta caratteristiche tali da poter essere pensata come critica per il posizionamento GPS e dunque in questa area ci si aspetta che anche i sistemi di navigazione possano avere comportamenti non ottimali soprattutto in corrispondenza a zone di “GPS outage”. Per tale ragione la distribuzione dei punti da utilizzarsi per i confronti è stata realizzata a “blocchi”. In questo modo è stato poi possibile osservare se ci fossero degli effetti significativi di Bias dovuti al sistema di navigazione in quanto se per una particolare area della zona A il sistema di navigazione presentava un bias significativo allora tutti i punti di quell'area dovevano essere “spostati” di quantità analoghe. Non essendo possibile realizzare il rilievo con tecniche GNSS dirette, il rilievo dei punti di verifica in tale area è avvenuto realizzando una rete topografica di inquadramento rilevata mediante stazioni totali e, nei punti in cui era possibile il rilievo GNSS rilevata anche con tale tecnica in modo da consentire un inquadramento nel sistema di riferimento idoneo precedentemente indicato. Successivamente dai punti di inquadramento precedentemente compensati si è proceduto con il rilievo di dettaglio avvenuto sempre mediante Total Station lavorando per polari.



Figura 2 – (A sinistra) Mappa della Zona A del poligono con indicato in rosso il percorso, in verde i punti naturali rilevati e in blu i vertici della rete di inquadramento.

(a Destra) una immagine ottenuta da una delle camera frontali del veicolo mentre percorre il poligono A con alcuni dei punti utilizzati per la verifica.

Considerando i residui della compensazione in blocco e la qualità del posizionamento GNSS su alcuni punti di inquadramento si può stimare una precisione globale per i punti di dettaglio di qualche centimetro. Per quanto attiene il rilievo GNSS, la stazione di riferimento utilizzata per l'inquadramento è la stazione permanente della Facoltà di Ingegneria BOL1 (collocata ad una distanza inferiore ai 2 km) ed appartenente alla rete sperimentale NRTK BO-POS (Barbarella et al. 2007)

2.5 Il Rilievo nella Zona B

Per quanto attiene la Zona B, essendo ragionevole pensare che in tale area il sistema di navigazione poteva presentare buoni standard di funzionamento, si è ritenuto che la distribuzione dei punti da utilizzarsi come riferimento dovesse seguire criteri di omogeneità. La tecnica di misura dei punti (tutti a terra) è stata la tecnica GNSS RTK con collegamento alla stessa stazione permanente utilizzata per l'inquadramento della zona A.

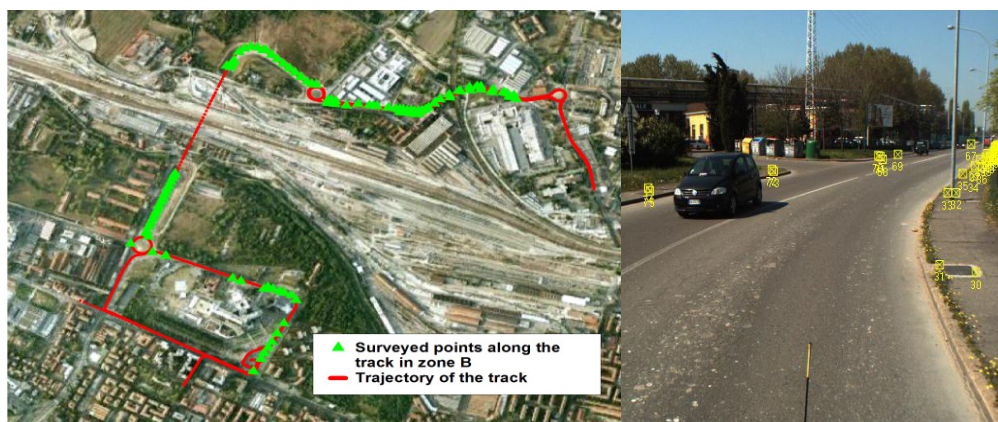


Figura 3 – (A sinistra) Mappa della Zona B del poligono con indicato in rosso il percorso, in verde i punti naturali rilevati. (A Destra) una immagine ottenuta da una delle camera frontali del veicolo mentre percorre il poligono B con alcuni dei punti utilizzati per la verifica.

Al fine di poter rimuovere eventuali errori grossolani e valutare anche il livello di congruenza interno della tecnica adottata, ogni punto è stato rilevato almeno due volte con due tipologie di ricevitori GNSS (Leica System 1200 and Topcon GB1000). In questo modo, eliminati gli errori

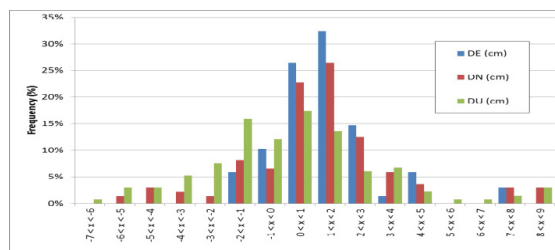


Figura 4 – Istogramma delle dispersioni delle differenti soluzioni ottenute in RTK.

grossolani è stato possibile valutare il livello di congruenza delle misure (dev. Standard) che si è attestato sui 2, 3 e 4 cm rispettivamente per le componenti Nord, Est e Quota (in un sistema geodetico locale).

Le precisioni dei punti rilevati può dunque essere stimata in 2-3 cm come peraltro ci si aspettava considerando la tecnica utilizzata. In figura 4, per completezza, si riporta l'istogramma cumulativo delle dispersioni di ciascuna soluzione rispetto alla media.

3. Il sistema MMS utilizzato per i confronti

Il sistema MMS utilizzato nel rilievo è stato sviluppato negli ultimi 6 anni dalla Siteco Informatica. Il progetto ROAD-SCANNER è stato sviluppato grazie ad un finanziamento all'interno del Programma per la Ricerca, l'Innovazione e il Trasferimento Tecnologico della Regione Emilia Romagna (PRRITT), in collaborazione con qualificate Università. Il sistema consente di realizzare in tempi ristretti un rilievo dettagliato della infrastruttura stradale e delle sue pertinenze: tracciati, pavimentazione, segnaletica, opere d'arte, ponti, gallerie, sovrappassi, illuminazione, piazzole di sosta, parcheggi, impianti pubblicitari, accessi e passi carrai, bypass, verde, etc. La società al momento ha a disposizione due veicoli MMS, di specifiche tecniche e prestazioni simili ma basati su sistemi di navigazione differenti. Il primo veicolo sviluppato dalla Siteco, ammodernato di continuo negli ultimi anni, è basato su sistema di posizionamento Applanix Pos LV 220, mentre il secondo veicolo, sviluppato dal 2008 ad oggi è basato su sistema di navigazione IXSEA Landins. Sebbene per le sperimentazioni siano stati utilizzati contemporaneamente i due sistemi, i dati e i risultati presentati in questo contesto fanno riferimento al veicolo equipaggiato con il sistema IXSEA Landins ritenuto più affidabile specialmente in aree di scarsa copertura satellitare.



Figura 5 – Quadro d'insieme della strumentazione del veicolo MMS RoadScanner.

L'allestimento del veicolo in oggetto è il seguente:

- Sistema di posizionamento IXSEA (Ricevitore GNSS Trimble BD960, Odometro Bei, Piattaforma inerziale Landins)
- Sistema Video (fino a 8 camere digitali ad alta risoluzione, Camera posteriore per la valutazione degli ammaloramenti stradali)
- Laser Scanner Faro Photon 120
- Profilometro Dynatest Mark IV
- Georadar IDS 1,6 Ghz

Più in particolare, le peculiarità del sistema possono essere così sintetizzate; il ricevitore BD9600 è un ricevitore GNSS GPS+Glonass, la possibilità di utilizzare, quando disponi

bile, la seconda costellazione satellitare ha molti vantaggi specie in ambito urbano quando il numero dei satelliti visibili GPS potrebbe non essere ottimale. Per quanto riguarda la piattaforma inerziale, le precisioni dichiarate dalla casa costruttrice sono riportate in Tabella 1.

Durata dell'Outage GPS (sec)	15		60		120	
Modalità	RealTime	Cinematico	RealTime	Cinematico	RealTime	Cinematico
Heading (deg)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Roll/Pitch (deg)	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Precisione Orizzontale (m)	0,07	0,05	0,2	0,1	0,3	0,25
Precisione Verticale (m)	0,05	0,05	0,1	0,7	0,25	0,2

Tabella 1 – Precisioni dichiarate del sistema di posizionamento.

Il sistema di acquisizione video può fare affidamento su 8 telecamere *Basler Scout* di ultima generazione connesse con tecnologia Ethernet Gigabit. Per il rilievo del poligono è stata scelta una configurazione a 6 telecamere, con due camere poste frontalmente e le altre oblique rispettivamente a 45° - 135° - 225° - 315° per assicurare una completa visione della strada. Il passo di campionamento delle immagini è stato impostato a 2 metri per garantire un'ottima copertura visiva di tutto il tracciato e del poligono di calibrazione. L'acquisizione di ciascun frame viene georeferenziato con i dati forniti dal sistema integrato GPS/IMU. Le immagini vengono memorizzate nel server di bordo, che si occupa anche della sincronizzazione dei dati e della gestione del software di acquisizione. Il FARO Photon è un laser scanner elicoidale a infrarossi a differenza di fase. Questa caratteristica permette di rilevare le sezioni trasversali della pavimentazione stradale e di tutte le adiacenze in un raggio di 120° con una frequenza di acquisizione di 120 mila punti al secondo. Grazie alla massima frequenza di acquisizione di 60 rotazioni al secondo, vengono rilevate sezioni stradali ogni 28 cm alla velocità di 60 km orari. Tenendo conto che per il rilievo del poligono, mediamente, si è tenuta una velocità di circa



Figura 6 – Particolare del montaggio del LS.

40 km orari, si può affermare che la densità finale dei punti laser è risultata molto elevata.

4. Aspetti implementativi del software di gestione dei dati MMS a supporto delle sperimentazioni condotte

La suite RoadSit 4 è un completo strumento per la consultazione e l'aggiornamento dei sistemi informativi territoriali. Le funzioni di gestione e mantenimento sono state sviluppate per la creazione di un Sistema Informativo Stradale, finalizzato non solo all'archiviazione dello stato della rete, ma al supporto continuo nella gestione delle più svariate problematiche logistiche, tecniche e progettuali ad essa correlate. Il modulo principale per la visualizzazione dei filmati georeferenziati, Road SIT Player 4, è stato sviluppato per poter fornire all'utenza finale un rapido accesso alla visione delle competenze stradali. Inoltre il software permette di visualizzare, direttamente sulle immagini, tutte le informazioni provenienti dai sensori installati sul veicolo, come ad esempio i punti laser, rappresentati direttamente sulle immagini, o i dati del georadar e del profilometro, per i quali sono disponibili invece delle viste di dettaglio specifiche. Tutte le informazioni consultabili dal software sono organizzate in appositi database che contengono, oltre alle coordinate e agli assetti, tutti i collegamenti necessari alle immagini, ai dati dei sensori e alla loro sincronizzazione.

Benché tale software offra la possibilità di eseguire misure topografiche sulle immagini, è stato inevitabile un grosso sforzo a livello di programmazione per aggiungere tutte le funzionalità necessarie per poter usufruire delle potenzialità offerte dalla sperimentazione sul poligono di calibrazione. Per sfruttare la possibilità di calcolare le correzioni derivanti dalla collimazione dei vertici del poligono, è stato necessario aggiungere la funzionalità di inserimento di vertici topografici misurati in contesti differenti dal rilievo ad alto rendimento. Al fine di non cambiare completamente l'architettura del software e di mantenere inalterate le funzionalità per i clienti tradizionali, è stato scelto di rendere disponibili le nuove funzionalità attraverso una struttura a *plug-in*. Per rendere disponibili le funzionalità del plug-in di posizionamento è sufficiente includere nella directory dove si trova l'eseguibile di RoadSIT Player i due file che vengono riconosciuti e caricati dal software quando presenti (Siteco.Positioning.dll, Siteco.Positioning.dll.conf). Quando queste condizioni sono verificate, all'avvio del software, il blocco di funzioni aggiuntive diventa disponibile nel menu strumenti. Il plug-in consente dunque nuove azioni ed in particolare:

- Inserimento di vertici noti da rilievo topografico esterno
- Visualizzazione su cad e sui filmati dei vertici collimati (da stereoscopia, Laser puro o a interpolazione di area)
- Variazioni impostate dall'utente sulla soluzione GNSS

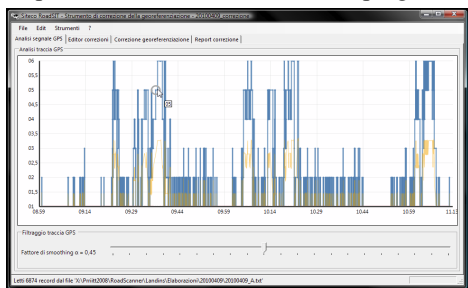


Figura 7— Finestra di visualizzazione della qualità della soluzione GNSS.

Il filtraggio delle soluzioni GNSS può essere fatto in base alla qualità delle misure e attraverso altri

parametri di esclusione che tengono conto della “densità temporale” di soluzioni affidabili. Il software permette l’inserimento di vertici di coordinate note contenute in file di testo, database, mdb etc.

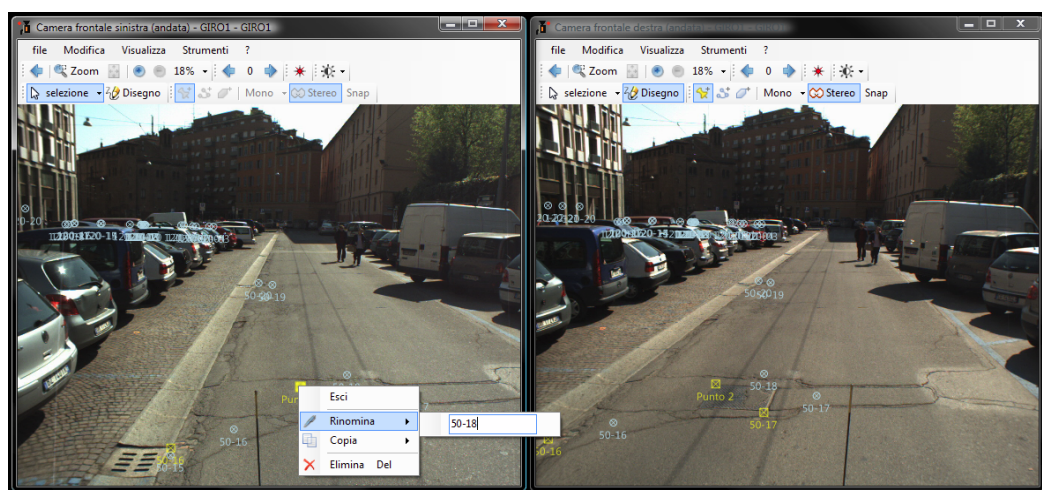


Figura 8 – Selezione dei vertici doppi per il calcolo delle correzioni.

5. Confronto tra rilievo MMS e i dati di riferimento del Poligono

Realizzato il poligono e implementati gli aspetti necessari nel software di gestione dei dati MMS dell'azienda si è passati all'uso dello stesso realizzando un rilievo secondo il protocollo standard dell'azienda. Di seguito si mostrano i risultati del confronto tra il rilievo dei punti mediante MMS ed il poligono.

5.1 Zona B

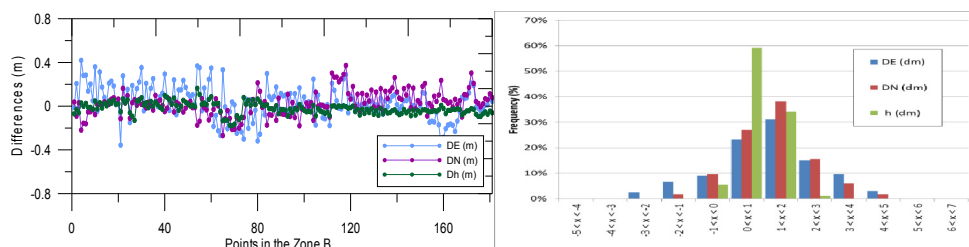


Figura 9 – (A sinistra) Grafico delle differenze puntuali tra rilievo MMS e Topografico nell'area B, (A destra) Istogramma rappresentante la distribuzione delle differenze nelle tre componenti.

	Est (cm)	Nord (cm)	Quota (cm)
Media	4	2	-2
Deviazione Standard	15	11	5
Valore massimo osservato	36	37	18

Tabella 2 – Principali Parametri statistici caratterizzanti il confronto nella Zona B.

Da quanto è possibile osservare dalla figura 9 e dalla tabella 2, le medie delle differenze sono sostanzialmente nulle (soprattutto se consideriamo l'accuratezza del sistema fotogrammetrico di circa

10/15 cm) e i parametri di dispersione sono in linea con le accuratezze del sistema fotogrammetrico. Da tale dato è possibile dedurre due considerazioni; la prima è che il sistema di navigazione stima in modo corretto posizione ed assetto del veicolo e la seconda è che non sono presenti errori nella stima dei parametri di calibrazione del sistema fotogrammetrico (dunque la precisione finale che ci si deve attendere, in condizioni ottimali di navigazione, dal sistema si attesta sui 10/15 cm).

5.2 Zona A

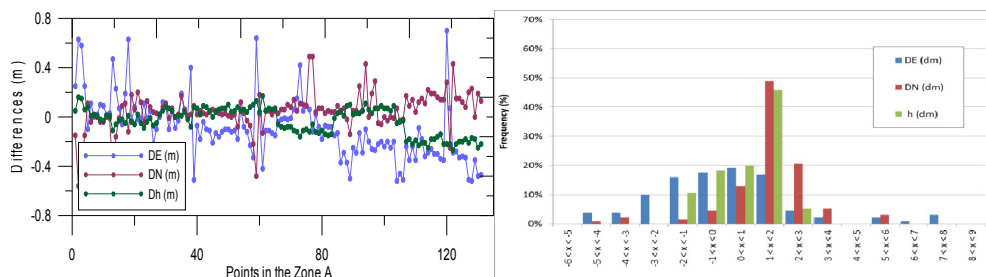


Figura 10 – (A sinistra) Grafico delle differenze puntuali tra rilievo MMS e Topografico nell'area A, (A destra) Istogramma rappresentante la distribuzione delle differenze nelle tre componenti.

	Est (cm)	Nord (cm)	Quota (cm)
Media	-9	5	-3
Deviazione Standard	24	15	11
Valore massimo osservato	70	56	27

Tabella 3 – Principali Parametri statistici caratterizzanti il confronto nella Zona A.

Dai grafici riportati in figura 10 e dalla relativa Tabella 3, si osservano risultati sostanzialmente differenti da quelli ottenuti nella zona B. In particolare, considerando la media complessiva (che vedremo non essere particolarmente significativa) delle dispersioni, si osserva un Bias dell'ordine della decina di centimetri non osservata nella Zona B. Tale dato è sostanzialmente da attribuirsi al sistema di navigazione.

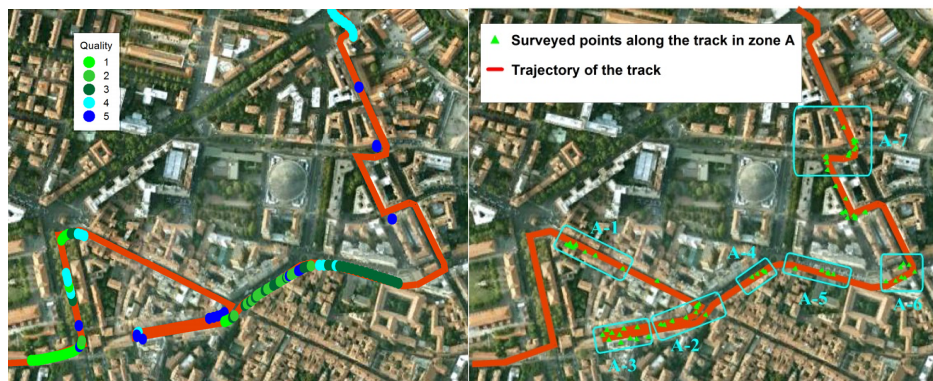


Figura 11 – (A sinistra) Qualità della soluzione GNSS all'interno della zona A del poligono, (A Destra) Blocchi sui quali è stata realizzata la statistica di dettaglio.

Essendo la precisione del sistema di navigazione strettamente dipendente dal buon funzionamento del sistema GNSS, in aree di GPS outage il dato di stima della traiettoria può presentare Bias che però sono localizzate in particolari aree. Da come è stato costruito il poligono di Calibrazione nella zona B (a Blocchi anziché omogenea) è possibile estrarre statistiche a Blocchi.

Block Statistical parameters							
Area	N° points	Mean			Standard deviation		
		DE	DN	Dh	DE	DN	Dh
A-1	16	0.17	-0.12	0.02	0.22	0.20	0.07
A-2	23	0.04	0.06	-0.01	0.21	0.07	0.05
A-3	26	-0.10	0.00	0.07	0.18	0.12	0.03
A-4	10	0.07	0.08	-0.10	0.14	0.03	0.03
A-5	8	-0.07	0.16	-0.12	0.08	0.20	0.03
A-6	25	-0.27	0.14	-0.20	0.24	0.12	0.03
A-7	23	-0.28	0.05	0.04	0.12	0.13	0.04

Tabella 3 – Principali parametri statistici ottenuti sui singoli Blocchi del poligono nella Zona A.

Tale dato, meno robusto in termini statistici perché il campione su ogni singolo blocco si attesta sulle 10 unità, consente di localizzare area per area il Bias del sistema di navigazione. Tale dato è stato poi correlato con la precisione o con la presenza di posizioni GPS nel percorso ottenendo i risultati mostrati in Figura 11 e Tabella 3. Da quanto è possibile osservare dalla tabella 3 in alcune aree (come per esempio il Blocco A-2) non sono evidenti Bias e le statistiche sono sostanzialmente simili a quelle ottenute nella Zona B. In altre aree come ad esempio i Blocchi A-6 e A-7 i bias sono evidenti e raggiungono i 30 cm. Tale dato è facilmente interpretabile osservando la figura 11 di sinistra dove si osserva che nella zona corrispondente alle aree A-6 e A-7 non sono sostanzialmente presenti soluzioni e le tre uniche posizioni stimate dalla soluzione cinematica presentano una bassissima qualità.

6. Conclusioni

La possibilità di disporre di un percorso misurato debitamente con strumentazione in grado di garantire una precisione di un ordine di grandezza superiore alle tecniche Mobile Mapping costituisce uno strumento importante non solo per valutare il comportamento del sistema di navigazione in condizioni critiche ma anche per valutare eventuali problemi sia nella fase di calibrazione del sistema (calcolo e/o misura dei bracci di leva tra sensori). Tale percorso consente di definire in modo sufficientemente esaustivo sia le accuratezze che le precisioni medie raggiungibili da sistemi di rilievo ad alto rendimento. Non solo, grazie al poligono è possibile valutare in modo immediato l'effetto di eventuali aggiornamenti sia delle strumentazioni installate sia di eventuali variazioni nell'aspetto di elaborazione dei dati (aggiornamenti del filtro di Kalman, approcci differenti nell'uso delle camere o dei dati laser).

Bibliografia

BARBARELLA M., GANDOLFI S., RONCI E., **2007**, Precisione e accuratezza raggiunta in rilievi NRTK ripetuti, *Bollettino SIFET (ISSN 1721-971X)*, 2007, **1**, 27-44

BARBARELLA M., **GANDOLFI S.**, MEFFE A., BURCHI A., **2011**, A Test Field for Mobile Mapping System: design, set up and first test results, *Proceeding of the 7th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, 13 – 16 June 2011, Cracow, Poland

Il sistema di riferimento geodetico italiano: un esempio di collaborazione tra CISIS, Università, IGM

Barbarella M. (*), Caporali A. (**), Longhi D. (***), Sansò F. (****)

(*) DICAM-ARCES, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

Tel. 051-2093106, Fax 051-2093114, e-mail: maurizio.barbarella@unibo.it

(**) Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova, Via Gradenigo 6, 35131 Padova

Tel. 049 8279122, Fax 049 827 9134, e-mail Alessandro.caporali@unipd.it

(***) Regione Abruzzo, Struttura Speciale di Supporto Sistema Informativo Regionale

Via Leonardo da Vinci 6, 67100 L'Aquila, Tel. 0862 363212, Fax 0862 363615

e-mail: domenico.longhi@regione.abruzzo.it

(****) DIIAR, Politecnico di Milano, Polo Territoriale di Como, Via Valleggio 11, 22100 Como

Tel. 031/3327518, Fax 031/3327519, e-mail: fernando.sanso@polimi.it

Riassunto

La gestione delle informazioni geografiche in termini unitari e condivisi richiede di appoggiarsi ad una infrastruttura geodetica moderna, affidabile e aggiornata.

La necessità di interfacciare i Data Base geografici prodotti in Italia con quelli delle altre nazioni, in primis europee, richiede che anche l'infrastruttura geodetica sia integrata nei sistemi utilizzati internazionalmente: da qui la necessità di inquadrarla nei sistemi geodetici di validità mondiale o europea quali ITRS e ETRS89 nelle loro realizzazioni più attuali e opportune.

L'Istituto Geografico Militare ha proposto e realizzato un frame di stazioni permanenti distribuite sul territorio italiano che è stato chiamato Rete Dinamica Nazionale (RDN). Per una piena accettazione di tale Rete come raffittimento della rete europea gestita da EUREF è stata realizzata una collaborazione tra IGM, alcune università (Bologna, Padova, Politecnico di Milano e associati) e il CISIS per effettuare l'elaborazione dei dati della Rete da parte di più Centri di Calcolo con l'utilizzo di più software differenti: l'adempimento di questi i requisiti ha fatto sì che la RDN sia stata accettata da EUREF come raffittimento della rete europea, nel convegno di Firenze del Maggio 2009. Il CISIS si è preoccupato di dare continuità al monitoraggio e al consolidamento della rete e per questo ha finanziato la ripetizione del calcolo di RDN e promuoverà nei prossimi anni un'ulteriore attività di questo tipo, nello stesso quadro operativo.

Lo scopo è quello di pervenire ad una infrastruttura geodetica unitaria italiana entro la quale possano collocarsi le reti NRTK realizzate da Regioni, Ditte e organizzazioni private e questo consentirà agli operatori la disponibilità di un unico Frame condiviso, mano tenuto nel tempo e pienamente compatibile con gli standard europei.

Abstract

The management of geospatial data requires an up-to-date and reliable geodetic infrastructure. The need to interface the Italian Geographic Data Bases with those of other Nations, primarily in Europe, requires the integration of the national geodetic infrastructure in the international context, such as ITRS and ETRS89 and their most recent realizations.

The Istituto Geografico Militare has proposed and materialized a frame of permanent GNSS stations across the Italian territory named Rete Dinamica Nazionale (RDN). To carry out the project as a densification of the EUREF Network, IGM has worked in close cooperation with Universities (Bologna, Padova, Politecnico di Milano and collaborators) and CISIS using different softwares. During the EUREF Symposium of May 2009 in Florence, the RDN was officially accepted as a

realization of ETRS89. CISIS has promoted the continuation of the development of the RDN in terms of maintenance and densification. To this goal CISIS has financed a re-calculation of RDN and is expected to continue to do so in the future. The goal is to make available to the users a geodetic infrastructure to support Real Time networks developed by the Regions, or private Firms. Users are in this way ensured that they represent their position measurements in a common frame of reference, valid across Italy and Europe.

1. Introduzione

La realizzazione, gestione e condivisione di archivi di dati da parte delle P.A. e di tutti gli utenti pubblici e privati di una Nazione richiede la definizione di regole e standard comuni a livello nazionale e internazionale ai quali uniformare i Data Base ma richiede anche una infrastruttura geodetica stabile, monitorata con continuità e condivisa anch'essa a livello europeo.

Il contesto europeo fornisce all'Italia delle guide che sono al contempo preziosi strumenti di lavoro ma anche vincoli ineludibili, tanto sul fronte dei Dati Territoriali quanto in quello dei Sistemi Geodetici.

A fianco degli Enti Cartografici di Stato, nel settore operano per adempiere alle proprie competenze istituzionali le Regioni che hanno dedicato ingenti finanziamenti nel settore della produzione di dati territoriali. In mancanza di una regolamentazione che unifichi i prodotti, le Regioni hanno attivato delle iniziative di coordinamento, che hanno fatto nascere il CISIS (Centro Interregionale per i Sistemi informatici, geografici e statistici). Una delle attività sviluppate dal coordinamento regionale in associazione agli enti cartografici alla presentazione di un DPCM sulla adozione di un nuovo Sistema di Riferimento nazionale:

Lo schema di Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri concernente *Regolamento recante "Adozione del sistema geodetico nazionale"*, approvato dal Comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle pubbliche amministrazioni, istituito con l'articolo 59 del "Codice dell'Amministrazione Digitale" (D.Lgs. n. 82 del 7 marzo 2005 come modificato dal D.L. 13 agosto 2010) nella seduta del 19 novembre 2009 e successivamente dalla Conferenza Unificata nella seduta dell'8 luglio 2010 è attualmente nella fase di coordinamento tra la Presidenza del Consiglio dei Ministri, la Commissione Europea, e la fase di registrazione presso la Corte dei Conti.

Il CISIS è intervenuto con una azione di coordinamento e di finanziamento a favorire la collaborazione tra IGM e varie Università italiane che ha portato alla accettazione da parte dei Referenti europei di una rete di stazioni Permanenti quale Raffittimento Italiano della Rete Europea EPN, dando luogo ad un frame che consente la piena assunzione anche in Italia del Sistema Geodetico Europeo.

1.1 La Direttiva Europea INSPIRE

Il tema dell'Infrastruttura Nazionale dei Dati Territoriali è divenuto, negli ultimi tempi, di particolare attualità, anche in conseguenza delle indicazioni contenute nella recente Direttiva INSPIRE (INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe). Questa Direttiva si propone di stabilire una Infrastruttura per l'informazione spaziale in Europa per politiche ambientali e attività che hanno un impatto sull'ambiente.

INSPIRE è basata su infrastrutture per l'informazione spaziale che sono create e mantenute dagli Stati Membri per mezzo di Regole Implementative (Implementing Rules o IR). INSPIRE non richiede la raccolta di nuovi dati. Tuttavia dopo un periodo di due anni gli Stati Membri devono rendere disponibili i loro dati secondo le Regole Implementative. Queste riguardano: metadata, interoperabilità dei tematismi spaziali descritti negli Annexes I, II, III della Direttiva, servizi anche in rete, condivisione di dati e servizi, monitoraggio e rapportistica.

Interoperabilità in INSPIRE significa la possibilità di combinare dati spaziali e servizi da fonti differenti in Stati Europei in modo coerente senza particolari sforzi umani o tecnologici, tipicamente mediante Internet. L'interoperabilità viene conseguita o armonizzando dati esistenti, o

trasformandoli mediante specifici servizi disponibili all'interno di INSPIRE. Ci si aspetta un notevole risparmio di tempo per gli utenti, quando lavorano su dati confacenti INSPIRE.

Nel caso specifico dei Sistemi di Riferimento (Annex 1) la Direttiva è stata preparata con il metodo della condivisione e del consenso. Le parti interessate, registrate come Spatial Data Interest Community (SDIC) o Legally Mandated Organisation (LMO) hanno avuto l'opportunità di segnalare i requisiti utente e materiale di riferimento, proporre esperti per lo sviluppo delle specifiche e partecipare al processo di revisione. Il Gruppo di lavoro tematico responsabile per lo sviluppo delle specifiche era composto di esperti di Geodesia provenienti da Portogallo, Slovenia, Francia, Germania, Italia, Svezia, Inghilterra e Olanda, tutti da tempo impegnati in attività connesse a stabilire metodi omogenei di georeferenziazione in Europa.

Pietra miliare per lo sviluppo delle specifiche è stata la definizione della Direttiva sui sistemi Coordinati di Riferimento come "Systems for uniquely referencing spatial information in space as a set of coordinates (X, Y, Z) and/or latitude and longitude and height, based on a geodetic horizontal and vertical datum".

Come Datum viene specificato il Datum del European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) in aree all'interno del suo scopo geografico, altrimenti il Datum del International Terrestrial Reference System (ITRS). Per la componente verticale l'European Vertical Reference System (EVRS) sarà usato per esprimere quote collegate alla gravità, all'interno dello scopo geografico di EVRS.

Per quote collegate alla gravità si intende che la compensazione di linee di livellazione riguarda i numeri geopotenziali (prodotto della quota per la gravità locale) e non le semplici quote. Infatti si può dimostrare che due punti sono allo stesso livello solo se hanno lo stesso numero geopotenziale, e non se hanno la stessa quota. Nel passato questo aspetto è stato trascurato, poiché localmente le variazioni di gravità sono sovente sufficientemente piccole per essere trascurabili. Dovendo ora considerare un sistema di riferimento verticale su scala europea, occorre adottare i numeri geopotenziali, quantomeno per le reti fondamentali di livellazione di alta precisione.

Per quanto riguarda le Proiezioni cartografiche viene prescritto:

- Lambert Azimuthal Equal Area (ETRS89-LAEA) per analisi spaziali pan-Europee nelle quali si richiede assenza di deformazione areale;
- Lambert Conformal Conic (ETRS89-LCC) per cartografia pan-Europea conforme a scala minore o uguale a 1:500,000;
- Transverse Mercator (ETRS89-TMzn) per cartografia pan-Europea conforme a scala maggiore di 1:500,000;

1.2 L'applicazione di INSPIRE in Italia

Come in molte Nazioni Europee, anche in Italia l'informazione territoriale fa capo a numerosi Enti che raccolgono, producono o gestiscono dati territoriali in funzione delle proprie competenze istituzionali, con conseguente parcellizzazione dell'informazione geografica. L'obiettivo generale da perseguire attraverso l'implementazione dell'Infrastruttura nazionale è quello di creare un sistema di conoscenza e condivisione dei dati territoriali tenendo conto dei principi contenuti nella Direttiva INSPIRE e del contesto tecnologico nazionale, a salvaguardia degli investimenti effettuati. Occorre uno sforzo comune per assicurare l'allineamento tra le specifiche dei dati territoriali prodotti in Italia (DB topografici, catasto nazionale strade etc.) e le IR su tali set di dati con i relativi servizi (visualizzazione, download, trasformazione/conversione, collegamento/accesso ad altri servizi).

La partecipazione al processo di condivisione delle attività INSPIRE, nelle diverse fasi di revisione delle IR, attraverso l'analisi dei documenti dei Drafting Teams (DT) e la conseguente formulazione di commenti al fine di:

- seguire l'andamento e l'evoluzione delle specifiche INSPIRE e monitorare lo stato di allineamento delle implementazioni nazionali, per tutte le componenti dell'infrastruttura
- individuazione, per ciascuna categoria tematica prevista negli allegati I, II e III della Direttiva, e con l'eccezione dei primi due tematismi dell'Annesso 1 (Sistemi di coordinate e grigliati geografici) dei dataset nazionali rilevanti (e della relativa Amministrazione di riferimento) che dovranno poi essere resi disponibili secondo le disposizioni di esecuzione, nei modi e tempi previsti dalla stessa Direttiva.

L'obiettivo è quello di definire le Regole Implementative nazionali in ottemperanza alla Direttiva europea, tenendo presente le prescrizioni legislative, le problematiche dell'informazione territoriale in Italia e le attività di standardizzazione in corso.

Dal punto di vista del sistema geodetico di coordinate, si tratta di stabilire se si dispone in Italia di un sistema di coordinate spaziali conforme a ETRS89, e di un sistema di coordinate verticali conforme a EVRS.

1.3 Sistema di riferimento globale, europeo, nazionale

Dall'avvento dei sistemi di posizionamento GNSS si è assistito ad una enorme diffusione delle stazioni permanenti su scala planetaria che ha dato un fortissimo impulso alle attività internazionali indirizzate al mantenimento di un sistema di riferimento geodetico globale (ITRF), gestite dall'Associazione Internazionale di geodesia (IAG) attraverso lo IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service).

I processi dinamici del pianeta rendono variabili le coordinate delle stazioni GNSS che realizzano l'ITRF a livello dei centimetri per anno.

Ciò naturalmente rende poco pratico il posizionamento per le applicazioni di tipo tecnico alla cartografia ed al controllo del territorio. Le National Mapping Authorities (NMA), che in Europa sono riunite nel Consorzio EuroGeographics, sono unanimi nel chiedere l'introduzione di sistemi di riferimento nei quali le coordinate dei vertici siano il più possibile stabili nel tempo. La moltiplicazione poi di servizi di posizionamento nazionali il cui utilizzo è basato sul "posizionamento relativo" che richiede strumenti e SW assai più economici e di facile uso, accentuerebbe ancora di più il fenomeno se le stazioni permanenti su cui si basa il servizio avessero coordinate variabili di settimana in settimana.

Per questo motivo la International Association of Geodesy IAG ha istituito nell'ambito della Commissione 1 'Sistemi di Riferimento' la sottocommissione 1.3 'Sistemi Regionali di Riferimento', nella quale è collocata l'EUREF. Uno dei compiti principali dell'EUREF è di realizzare e mantenere il sistema di riferimento orizzontale e verticale europeo, coerentemente con INSPIRE.

Queste brevi considerazioni portano alla conclusione che le autorità geodetiche nazionali lavorino di concreto con quelle delle altre nazioni europee in modo che il sistema di riferimento italiano sia esso pure materializzato e monitorato in continuo con regole uniformi a quelle europee; tale auspicio già presente nei documenti ufficiali delle strutture scientifiche e tecniche europee, ha portato ad una stagione di collaborazione tra Istituto geografico Militare, CISIS ed Università per le finalità sopra riportate.

Il presente lavoro ricostruisce la storia di questa collaborazione e ne fa il punto, in vista dei suoi necessari ulteriori sviluppi.

2. Sistema geodetico Italiano

Nel quadro dell'integrazione in ambito europeo l'IGM ha realizzato una rete di stazioni permanenti alcune delle quali appartenenti alla rete mondiale e europea che costituissero un frame locale atto a supportare un Sistema Geodetico Nazionale: l'insieme delle stazioni permanenti distribuite uniformemente sul territorio nazionale è stato denominato Rete Dinamica Nazionale.

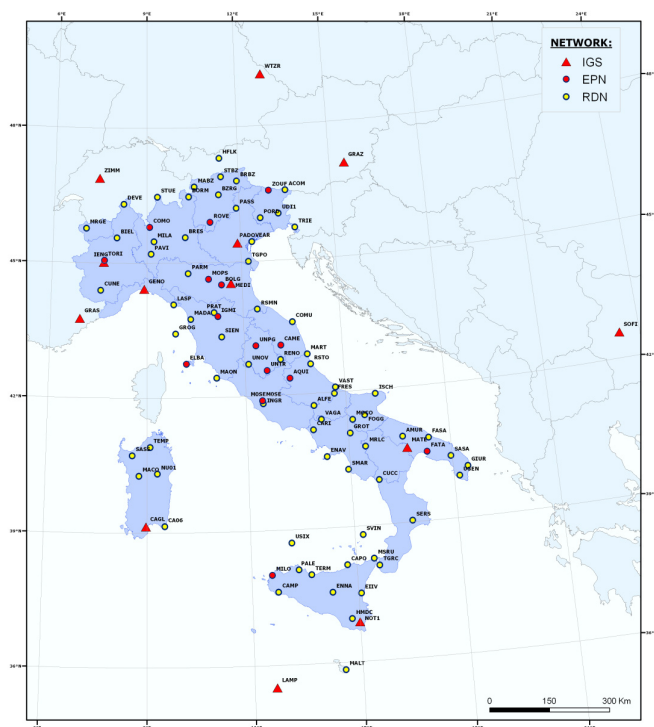


Figura 1 – Rete Dinamica Nazionale all'impianto (2008).

Le stazioni permanenti scelte a costituire la Rete non sono di proprietà e gestione di IGM ma appartengono e sono gestite da varie strutture pubbliche e private. Ciò ha comportato non solo una diversificazione della strumentazione installata ma anche una certa complessità operativa nell'accesso ai dati delle Stazioni con regolarità e basso tempo di ritardo; questa difficoltà ad accedere al dato automaticamente ha indotto l'IGM a concentrare l'attenzione su brevi periodi di tempo: questo significa che si è scelto inizialmente un periodo di quattro settimane (a cavallo tra il 2007 e 2008) e in relazione a questo periodo sono stati acquisiti i dati di ricezione delle stazioni scelte, che sono stati utilizzati per calcolare la posizione delle stazioni. I dati relativi ad una giornata sono elaborati autonomamente e danno luogo alla soluzione giornaliera: la posizione dei punti è ricavata mediando le 28 soluzioni calcolate. La presenza nella rete di 13 stazioni IGS ed EUREF di posizione nota e pubblica nei Sistemi Geodetici mondiale (ITRS) ed europeo (ETRS89) consente di inserire la rete RDN in quei sistemi. In particolare sono state determinate le posizioni nel frame ETRF2000, all'epoca 2008.0 (praticamente il centro dello spezzone temporale utilizzato). I calcoli sono stati effettuati da IGM in collaborazione con strutture universitarie e pubblicati sul sito di IGM; calcoli complessi, che richiedono software sofisticati e l'utilizzo di dati ancillari. Per poter essere riconosciuta come raffittimento della Rete Europea EPN però, EUREF richiede che una rete nazionale venga calcolata da più Centri di Calcolo indipendenti, e auspicabilmente con più codici di calcolo diversi, in quanto la complessità delle elaborazioni da effettuare da luogo a differenti implementazioni.

Il CISIS ha favorito e supportato economicamente la collaborazione tra IGM e alcune Università (Bologna, Politecnico di Milano e collaboratori, Padova) per effettuare calcoli indipendenti sugli stessi dati; i codici utilizzati a lavori completati sono stati tre (Bernese, Gamit, Gipsy). I calcoli hanno portato a risultati convergenti, sostanzialmente equivalenti.

Nel Simposio EUREF di Firenze (27-30 maggio 2009) Sono stati presentati i risultati dei calcoli e EUREF ha accettato RDN come raffittimento Italiano della rete europea, quindi inserita nel frame ETRF2000; come detto le coordinate dei vertici della rete possono essere reperite nel sito dell'IGM.

2.1 Monitoraggio di RDN

Una rete così complessa e articolata richiede un controllo continuo per verificare la continuità dell'acquisizione, la qualità del dato e la stessa stabilità delle stazioni. Causa la molteplicità delle gestioni, l'IGM in attesa di realizzare la continuità del flusso dei dati in automatico ha provveduto ad acquisire le ricezioni di periodi continui di 4 settimane, intervallate di sei mesi, centrate a cavallo e a metà dell'anno. I dati utili sono risultati essere compresi nei seguenti intervalli temporali:

Epoca	da	a	n° stazioni	n° file
2008.0	357/2007	019/2008	98	2595
2008.5	167/2008	194/2008	73	1928
2009.0	356/2008	017/2009	89	2260
2009.5	165/2009	192/2009	97	2454
2010.0	354/2009	016/2010	87	2189

Tabella 1 – Periodi di acquisizione coordinata della rete RDN e sua consistenza.

Come si vede c'è una certa dinamica nella composizione di RDN, legata alla stabilità delle stazioni componenti e alla fruibilità del dato. IGM comunque attualmente è in grado di ricevere con continuità dalle stazioni RDN.

IGM e le università coinvolte hanno proceduto a effettuare calcoli anche su questi spezzoni sempre con il supporto del CISIS che hanno permesso di seguire la dinamica delle stazioni. Un esempio tipico della variazione di posizione nel Frame ITRF2005 è riportato in figura 2

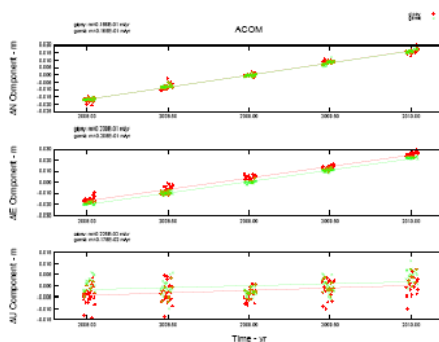


Figura 2 – Posizione di una Stazione RDN nel Frame ITRF2005 nel periodo 2008-2010.

I risultati di questi calcoli non sono stati ancora presi in considerazione ai fini della definizione delle stazioni RDN, che è rimasta ufficialmente quella definita all'epoca 2008.0, sistema/frame ETRF2000. Le figure che seguono illustrano i movimenti delle stazioni RDN presenti in più epoche, sia nel frame ITRF2005 sia in ETRF2000 che è un Sistema solidale con la placca eurasiatica e quindi assorbe i movimenti di questa: quello che resta sono i movimenti specifici delle stazioni, al netto del movimento d'insieme.

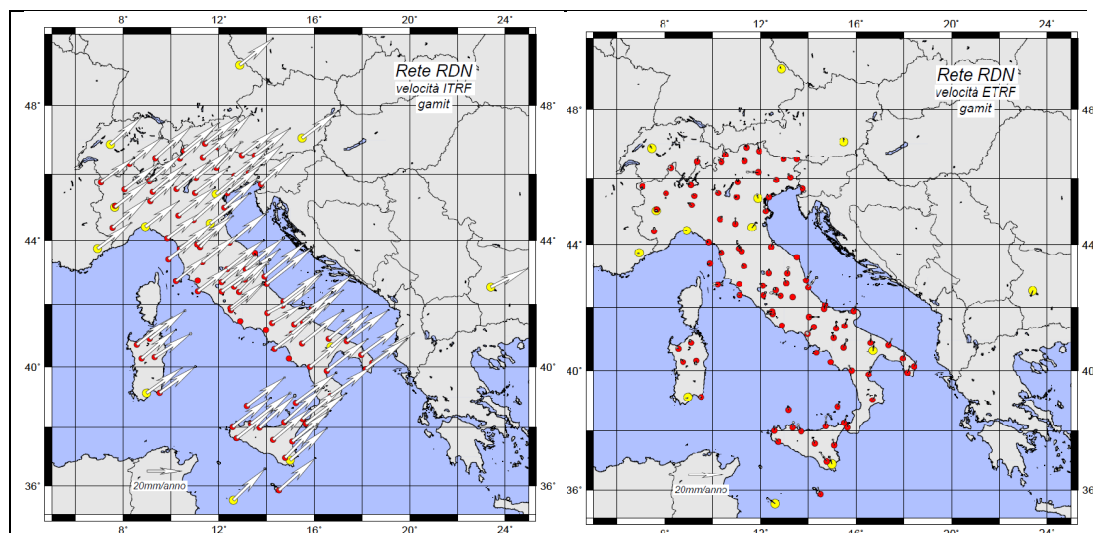


Figura 3 – Velocità annua(in mm/anno) delle stazioni RDN nei sistemi ITRF00 e ETRF2000.

La dinamica delle stazioni, sia in senso fisico che come reperibilità dei dati, suggerisce di continuare il monitoraggio di RDN portandolo, come impegno di importanza prioritaria, definitivamente ad un monitoraggio continuo.

3. Il problema dalla quota

La definizione della posizione dei punti nei Sistemi Geodetici viene fatta in termini tridimensionali, tramite ad esempio le coordinate geocentriche (X,Y,Z) o tramite la posizione “planimetrica” longitudine e latitudine (ϕ, λ) e la componente altimetrica h altezza del punto rispetto alla superficie ellissoidica di riferimento adottata, presa sulla normale ad essa. Anche il passaggio dal sistema ITRS a quello europeo ETRS89 viene effettuato in termini tridimensionali.

Per quanto riguarda l’altimetria, però, la quota ellissoidica è ben diversa da quella che viene generalmente adottata nel paese, che fa riferimento alla superficie di riferimento geoidica quale è definita da un mareografo di riferimento e che viene propagata sul resto del territorio mediante operazioni di livellazione geometrica. Il frame che realizza il sistema altimetrico italiano è costituito dai capisaldi della rete di livellazione. Come detto in precedenza al paragrafo 1.1 il tipo di quote che si ottiene, sbrigativamente indicato come “quota sul livello del mare” non rappresenta un sistema di altezze congruente e neppure univoco.

Vi sono cinque tipi di coordinate d’altezza oggi in uso nel mondo: i numeri geopotenziali C , le altezze ortometriche H , le altezze ellissoidiche h , le altezze normali h^* e, meno diffuse, le altezze ortonormali; di tali grandezze si riportano in appendice le definizioni. A livello internazionale, l’unificazione mondiale del Datum d’altezza cioè la capacità di riferire tutti i sistemi di altezza a livello globale rispetto alla stessa superficie equipotenziale (geoide) è stato dibattuto nella letteratura scientifica (vedi esempio [4]) e tuttavia sta solo recentemente raggiungendo un livello di acquisizione di dati sufficiente a fornire una soluzione globale con un’accuratezza di 2 - 3 cm. Ciò grazie alle missioni satellitari gravimetriche, in particolare GOCE; che danno una mappa globale e coerente del campo di gravità anomalo con una risoluzione a terra di circa 100 km. A livello europeo la questione è all’ordine di EUREF che attraverso il progetto EVRS si è posta il problema dell’unificazione del Datum verticale, in particolare usando il geoide europeo, le reti di livellazione unificate a livello continentale e i dati di altezza ellissoidica per le stazioni delle reti

permanenti GNSS. Tra l'altro la raccomandazione di EUREF è che le reti di livellazione vengano compensate in termini di altezze normali, come già quelle delle nazioni dell'ex blocco sovietico.

Senza univocità nell'uso dei sistemi di coordinate è evidentemente impensabile di unificare i diversi sistemi d'altezza, operazione indispensabile per definire un frame informatico coerente per le applicazioni tecniche ai lavori pubblici, alle costruzioni civili, al controllo del territorio.

Non a caso della questione si occupa anche la direttiva europea INSPIRE.

La situazione dell'Italia è purtroppo che essa non possiede un sistema di altezze ortometriche, ma le reti di livellazione sono state compensate senza correzioni ortometriche.

La cosa può essere messa in evidenza ad esempio confrontando le altezze ortometriche della Svizzera con quelle italiane lungo il confine. Come si vede in figura, che rappresenta il confronto tra i geoidi gravimetrici svizzero e italiano lungo la frontiera, non vi è solo un bias causato dalle diverse origini del Datum d'altezza, ma anche una deformazione che potrebbe riflettere la mancata correzione ortometrica per parte italiana.

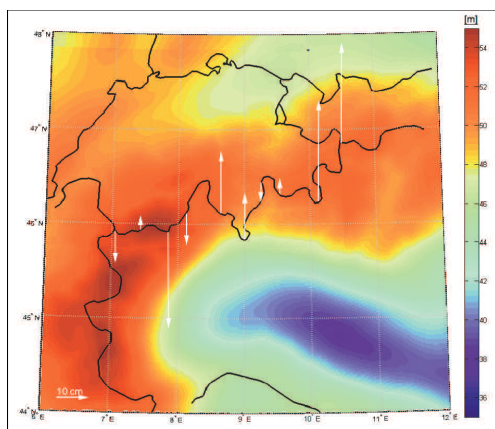


Figura 4 – Discrepanze tra geoidi della Svizzera e dell'Italia.

4. Collaborazione CISIS - Università – IGM e Progetto NSPR

La scelta di un Sistema Geodetico e Cartografico di riferimento e la istituzione di un Frame che lo realizza concretamente e lo dovrebbe rendere fruibile all'utenza non esaurisce certo i bisogni operativi della comunità. Occorre ovviamente provvedere alla manutenzione controllando nel tempo il comportamento delle stazioni, delle quali è necessario conoscere la velocità ovvero il trend di movimento o evidenziare il prima possibile un eventuale comportamento anomalo della stazione. L'accesso al frame consente l'inquadrimento di qualsiasi tipo di rilievo e di tutte le informazioni e basi di dati che ne derivano. Per rendere più efficienti (economici, rapidi) i rilievi GNSS sono state sviluppate come noto numerose reti per il rilievo in tempo reale, a cura di organizzazioni di geometri, Ditte ma anche, direttamente o tramite un supporto economico, da molte Regioni e alcune Province autonome; tali reti permettono di inserire il rilievo nel sistema di riferimento proprio della Rete NRTK che fornisce il servizio. E' evidente la necessità che le reti NRTK operanti sul territorio nazionali parlino la stessa lingua, cioè siano riferite allo stesso sistema, e specificatamente quello nazionale: l'attuale autonomia decisionale e operativa dei realizzatori e dei gestori delle Reti NRTK lascia libero ciascuno di fare la scelta ritenuta preferibile e non garantisce l'omogeneità della soluzione adottata: poiché il campo di funzionamento di diverse reti si sovrappone sul territorio, l'utente può trovare posizioni diverse a seconda del servizio che utilizza, differenze superiori alla indeterminazione resa possibile dalla tecnica.

In un altro ambito, se il Sistema Geodetico è realizzato in Italia da RDN, per quanto attiene le quote “sensibili alla gravità” l’Italia non ha una rete altimetrica pienamente coerente con le richieste Europee, non utilizza il tipo di coordinate suggerito per aderire allo standard europeo, e molto lavoro andrebbe fatto in quella direzione. Consapevole di questi e altri problemi che rendono complesso e non pienamente interoperabile la formazione, il recupero e l’interoperabilità dei dati territoriali, il CISIS ha discusso le operazioni prioritarie da fare e ha proposto un progetto operativo denominato “Network di stazioni permanenti per le Regioni” basato su alcune importanti attività.

Il progetto nasce nel contesto della proposta di DPCM sulla Rete Dinamica Nazionale (RDN), approvato dal Comitato per le regole tecniche sui dati territoriali (di cui all’art. 59 del DL n. 82 del 07/03/05) nel novembre 2009 e dalla Conferenza Unificata nel luglio 2010; in esso sono contenuti i presupposti per aggregare, uniformare, certificare, armonizzare al contorno e mantenere aggiornata nel tempo la capacità delle reti regionali di stazioni permanenti GPS e GNSS per fornire la georeferenziazione di alta qualità a tutti coloro che useranno le nuove tecnologie di rilevamento previste nel corso dello sviluppo tecnologico del prossimo quinquennio.

Come tutti i progetti CISIS, esso verrà finanziato dagli enti che aderiranno al progetto.

Il Comitato Permanente Sistemi Geografici del CISIS nell’ottica del supporto sia all’integrazione delle attività geomatiche delle Regioni e Province Autonome ha approvato nella seduta del 28 aprile 2011 la predisposizione di un progetto di ricerca denominato *Progetto NSPR (startup Network di Stazioni Permanenti per le Regioni)*, il progetto, oggi in fase di ratifica delle Regioni aderenti, prevede il riavvio della collaborazione tra il CISIS, l’IGM e le Università di Bologna, Padova e il Politecnico di Milano, finalizzato sia al mantenimento della RDN e sia a creare i presupposti per aggregare, uniformare, certificare, armonizzare al contorno le reti regionali di stazioni permanenti e mantenerne aggiornata nel tempo la capacità di fornire il supporto ad una georeferenziazione di alta qualità a tutti coloro che useranno le nuove tecnologie di rilevamento previste nel corso dello sviluppo tecnologico del prossimo quinquennio. Le principali attività previste riguardano:

- reiterazione per un anno del calcolo della posizione delle stazioni permanenti RDN; attività di collaborazione, previo Atto Esecutivo, con IGM per la certificazione tramite centri di calcolo indipendenti in conformità alle specifiche tecniche EUREF

- calcolo certificato e validazione della posizione delle stazioni permanenti delle reti locali nella RDN; realizzato da uno dei tre partner scientifici per ciascuna delle infrastrutture delle Regioni aderenti al progetto.

- realizzazione del repository presso il CISIS dei dati 365 gg/anno delle stazioni permanenti regionali e di quelle RDN campionati a 30 secondi;-Si tratta di assistere tecnicamente i tecnici già operanti presso il CISIS alla realizzare in FTP di un backup omogeneo, certificabile ed interoperabile sia dei dati delle stazioni permanenti regionali in previsione di quanto richiesto all’art. 6 della proposta di DPCM sulla RDN, sia della copia di sicurezza dei dati delle stazioni permanenti in RDN

- individuazione di procedure per il miglior raccordo dei dati topografici e catastali nel sistema di riferimento RDN gestito dalle reti locali delle stazioni permanenti.

- studio sulla possibilità di introdurre le quote normali nel sistema verticale nazionale, introducendo di fatto lo standard EVRS, in aggiunta a quello orizzontale ETRS.

5. Ulteriori sviluppi e Conclusioni

Le tematiche proposte nel Progetto NSPR sono indicative di quali siano i punti caldi che, a parere degli autori, vanno affrontate in futuro.

Prima di tutto, consolidare il lavoro già fatto in direzione di un Frame nazionale Stabile, Monitorato e Fruibile. Stabile: il disegno di RDN deve raggiungere una configurazione fissa che possa servire per un monitoraggio di lungo periodo. Monitorato: non si può interrompere l’analisi di RDN congelando la posizione a quella ottenuta nel 2008, e da un solo Centro di Calcolo ma occorre continuare a ripetere i calcoli e le velocità e le posizioni debbono derivare dalla combinazione delle soluzioni ottenute. Fruibile: i dati acquisiti dalle varie Stazioni Permanenti

debbono essere di dominio pubblico per poter essere utilizzati come si conviene a punti di rete, in un sito centralizzato e opportunamente ridondato, per cui è indispensabile realizzare un archivio di backup ad esempio presso il CISIS, che ha già una struttura che può assumere il compito.

In secondo luogo, occorre considerare che le reti NRTK consentono un nuovo modo di operare, non solo per la maggiore efficienza, quanto per il fatto che il rilievo effettuato dall'operatore viene subito inserito in un sistema di riferimento, quello fornito dalla Rete; è indispensabile che tutte le reti NRTK che offrono un servizio siano attendibilmente inserite nel sistema nazionale ETRF2000.

Finalmente, una volta consolidato l'aspetto tridimensionale relativamente alla superficie associata al Sistema di Riferimento, occorre affrontare il problema delle quote "sul livello del mare" (qualunque cosa queste parole significhino scientificamente) ovvero delle quote normalmente usate in Italia: tali quote non esprimono correttamente il livello del punto rispetto la superficie di riferimento geoidica.

L'Europa ha affrontato il problema adottando, come si è detto, un tipo di quota definibile scientificamente che in Italia non sono definite: molto lavoro è necessario per uniformarsi alle specifiche EUREF. Gli autori ritengono che nella presente mancanza di un coordinamento ufficiale nazionale degli enti geodetici e cartografici, sia della massima urgenza definire un progetto di cooperazione per l'istituzione di un Datum d'altezza nazionale e di un sistema di coordinate verticali coerente con le raccomandazioni degli enti europei preposti.

Per quanto sopra si può concludere che la Rete Dinamica Nazionale realizzata dall'IGM e ratificata dall'EUREF nel 2009 è pienamente confacente alle prescrizioni INSPIRE, mentre la rete altimetrica attualmente disponibile non è collegata alle misure di gravità e pertanto non è confacente a EVRS.

E' quindi auspicabile una stretta collaborazione tra CISIS, Università e IGM per completare il nuovo sistema geodetico italiano sia sotto l'aspetto realizzativo (sistema altimetrico) sia sotto quello manutentivo e di servizi agli Utenti quali ad esempio aggiornamento e raffittimento della RDN, armonizzazione delle reti geodetiche regionali, servizi NRTK.

Bibliografia

Schema di decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri concernente Regolamento recante "Adozione del sistema geodetico nazionale" e relativi allegati - <http://www.digitpa.gov.it/altre-attivita/C3/A0/sistema-di-riferimento-geodetico-nazionale>

Parere sullo schema di decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri concernente Regolamento recante "Adozione del sistema geodetico nazionale". (PUBBLICA AMMINISTRAZIONE E INNOVAZIONE) ai sensi dell' articolo 59 comma 5 del decreto legislativo 7 marzo 2005, n. 82 - <http://www.statoregioni.it/dettaglioDoc.asp?idprov=8415&iddoc=27527&tipodoc=2>

Codice dell'Amministrazione Digitale - Testo vigente al 13 agosto 2005, coordinato del Codice dell'amministrazione digitale a seguito delle modifiche ed integrazioni introdotte dal decreto legislativo 30 dicembre 2010, n. 235, e dal decreto legge 13 agosto 2011, n. 138- <http://www.digitpa.gov.it/principali-attivita/codice-dellamministrazione-digitale>

Barbarella M., Gandolfi S., Ricucci L., Zanutta A., (2010), The new Italian geodetic reference network (RDN): a comparison of solutions using different software packages, (in stampa su Bulletin of Geodesy and Geomatics)

Caporali A., Turturici F., Maseroli R., Farolfi G., (2009), Preliminary results of the computation of the new Italia Permanent Network RDN of GPS stations., Bulletin of Geodesy and Geomatics, LXVIII, 2009, 2, 147-162

Caporali, A., Lidberg, M. e Stangl, G. (2011) Lifetime of ETRS89 Coordinates. Atti del Convegno EUREF 2011, Chisinau, Moldavia (in stampa)

Sansò F., Vanicek G. P. (2006) The orthometric height and the holonomy problem Journal of Geodesy, vol 80, n. 5 (2006) pp. 225-232.

Appendice

Il problema delle altezze. Sistemi di coordinate e datum verticale

Vi sono cinque tipi di coordinate d'altezza oggi in uso nel mondo: i numeri geopotenziali C , le altezze ortometriche H , le altezze ellissoidiche h , le altezze normali h^* e le altezze ortonormali. Dei primi quattro tipi ricordiamo le definizioni e le relazioni con le grandezze osservabili sulla superficie terrestre: del quinto tipo non parliamo dato la sua limitata diffusione (ad esempio Nuova Zelanda, Australia e UK).

Numeri geopotenziali C : data la funzione potenziale del campo di gravità $W(P)$, si sceglie una superficie equipotenziale $G \equiv \{W(P) = W_0\}$, con W_0 definito per convenzione in modo tale che G si discosti per pochi metri della superficie media degli oceani. G è detto *geoide* e funge da superficie di riferimento per C che è definito come

$$C(P) = W_0 - W(P). \quad (1)$$

Il valore W_0 è scelto in funzione di parametri globali della terra (massa totale, semiasse equatoriale dell'ellissoide, eccentricità e velocità angolare). La conoscenza di $W(P)$ per un punto specifico può essere ottenuta solo risolvendo contemporaneamente un problema al contorno per il potenziale normale del capo di gravità. In compenso le variazioni di $C(P)$ e di $W(P)$ lungo una rete di livellazione sono calcolabili considerando che per due punti P' e P vicini tra loro

$$\begin{aligned} dW(P) &= W(P) - W(P) = \underline{g}(\bar{P}) \cdot d\mathbf{r}_{P\bar{P}'} = \\ &= -\underline{g}(\bar{P})\underline{n}(\bar{P}) \cdot d\mathbf{r}_{PP'} = -\underline{g}(\bar{P})dL_{PP'} \end{aligned} \quad (2)$$

dove $\bar{P}$ è il punto medio tra P e P' , $\underline{g}(P)$ il modulo di gravità in P (che è ovviamente una quantità osservabile), $\underline{n}(P)$ la direzione della verticale (che è la stessa di $\underline{g}(P)$ ma con verso opposto) e infine

$$dL_{PP'} = \underline{n}(\bar{P}) \cdot d\mathbf{r}_{PP'} \quad (3)$$

e l'incremento di livellazione tra P e P' .

La (2) può poi essere propagata (integrata) lungo le linee di livellazione fornendo $W(P) - W(Q)$ per due punti qualunque di una rete.

Nota 1: $C(P)$, benché diminuisca quando P si muove in direzione di $\underline{n}(P)$, che è un requisito intuitivo per una coordinate d'altezza, è espresso in unità geopotenziali, ovvero $1 \text{ gpu} = 10^3 \text{ Gal} \cdot \text{m}$, ($1 \text{ Gal} = 1 \text{ cms}^{-2}$).

Sulla superficie terrestre i valori di $C(P)$ sono circa 0,98 volte il valore metrico, cioè di un'altezza data in metri. Questo fattore di scala è però variabile da punto a punto, quando si voglia calcolare con una precisione relativa tra 10^{-3} e 10^{-6} .

Notiamo che talvolta si parla di altezze dinamiche che sono sostanzialmente la stessa cosa dei numeri geopotenziali, scalati con un valore medio costante g della gravità

$$H_{\text{dim}}(P) = \frac{C(P)}{\bar{g}} \quad , \quad (4)$$

in modo che la coordinata sia ancora più prossima numericamente ad un'altezza di metri. Un valore usato per $\bar{g}$ è $\bar{g} = 980,629387 \text{ Gal}$.

Nota 2: si osservi che con la definizione del geoidale tramite il valore di W_0 tale superficie non ha più una relazione precisa con i mareografi, tranne per il fatto che questi si trovano in una fascia di pochi metri rispetto al geoidale stesso. Fortunatamente due superficie equipotenziali che distino tra loro di pochi metri in un punto, benché non siano mai esattamente parallele, hanno variazioni di distanza inferiori di 2 cm in un altro punto qualunque.

Dunque su aree limitate, come ad esempio per l'Italia, correggere per il datum di altezza equivale a correggere tutte le altezze per una costante, con una precisione dell'ordine di millimetri.

Le altezze ortometriche H : per definizione $H(P)$ è la lunghezza della linea della verticale (linea di campo del campo vettoriale $\underline{n}(P) = \frac{-1}{g(P)} \underline{g}(P)$) compresa tra P e il geoidale G . La superficie origine di tale coordinate, cioè l'insieme dei punti per cui $H(P) = 0$, è la stessa usata per $C(P)$. Questa coincidenza tuttavia non si verifica più nello spazio esterno a G , ovvero i punti di una superficie equipotenziale (sulla quale $C(P)$ è costante) non hanno altezza ortometrica costante.

Una cattiva letteratura ha indotto a credere nel seguente ragionamento: dalla (2) si vede che l'incremento di livellazione lungo una linea può essere espresso come

$$dL = \underline{n} \cdot \underline{dr} = -\frac{dW}{g} \quad ; \quad (5)$$

d'altro canto se ci si muove lungo la linea della verticale di una quantità dH , si ha chiaramente

$$dH = -\frac{dW}{g} \quad ; \quad (6)$$

quindi si può porre

$$dL = dH \quad . \quad (7)$$

L'errore logico sta nel fatto che la (4) vale solo lungo la direzione della verticale, cioè dW in (4) non è il differenziale totale di W come in (3). In effetti poiché $g(P)$ non è costante (se non in modo molto approssimato) su una superficie equipotenziale, dalla (3) (che è un'equazione corretta) si vede che dL non può essere un differenziale esatto, cioè non esiste una coordinata di cui dL è il differenziale. Dunque per correggere la (7) occorre introdurre un ulteriore termine, detto correzione ortometrica (OC), così che la (7) integrata per una linea tra due punti A e B della superficie diventa

$$H_B - H_A = \int_{AB} dL + OC(A, B) \quad . \quad (8)$$

Nella (8) si può porre

$$OC(AB) = \int_{AB} \frac{\bar{g} - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} dH - \int_{B_0}^B \frac{\bar{g} - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} dH + \int_{A_0}^A \frac{\bar{g} - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} dH \quad . \quad (9)$$

L'integrale lungo $\overline{AB}$ della (9) va preso sulla linea di livellazione, e dipende come si vede da grandezze osservabili sulla superficie, g , e da $\overline{\gamma}$ che è un valor medio costante di gravità per l'area

$$O\left(\frac{g - \overline{\gamma}}{\overline{\gamma}}\right) \sim 10^{-4} / 10^{-5}$$

su cui la livellazione si estende. Poiché , si vede che tale integrale può avere il valore di alcuni centimetri per 1000 m di dislivello. Invece i due integrali tra $\overline{A_0A}$ e $\overline{B_0B}$ della (9) vanno presi lungo le linee della verticale tra geoide ed A, e geoide e B rispettivamente. Come si vede, i due integrali dipendono dal valore di g all'interno delle masse e quindi a rigore non possono essere calcolati senza fare ipotesi sulla densità di massa tra superfici della terra e geoide.

Per fortuna un'analisi di sensitività rivela che l'uso di una densità media della crosta, $\overline{\rho} = 2,67 \text{ g cm}^{-3}$, porta ad un valore dell'integrale approssimato al centimetro anche per dislivelli di qualche chilometro.

La conclusione della precedente discussione è duplice:

- un sistema di altezze ortometriche non può essere stabilito solo sulla base di misure di superficie
- tale sistema tuttavia può essere istituito con sufficiente precisione (dell'ordine del centimetro) applicando le correzioni ortometriche date dalla formula (9) e supponendo costante la densità della crosta sopra il geoide.

Ricordando che la (4), pur non valida in generale, è però corretta lungo una linea della verticale, si può scrivere

$$C(P) = - \int_0^H dW = \int_0^H g dH = \overline{g} H(P) \quad (10)$$

La (10) fornisce la relazione tra C ed H , che naturalmente dipende dal valor medio della gravità g lungo la linea della verticale e dunque dipende, come già osservato, dalla densità di massa degli strati superficiali.

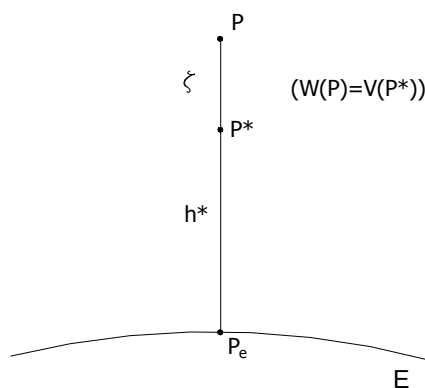


Figura 1

Le altezze ellissoidiche h : una volta definite forma e posizione dell'ellissoide terrestre E nello spazio (definizione del datum geodetico), si definisce l'altezza ellissoidica $h(P)$ di P come la lunghezza del segmento di normale ad ε che passa per P , presa col segno positivo all'esterno e col segno negativo all'interno di E .

Tutti i punti nello spazio hanno un valore univoco di h , tranne che per un piccolo disco attorno all'origine, sul piano equatoriale di E .

L'altezza ellissoidica assieme alle coordinate planimetriche (λ, φ) del piede della normale $\underline{\nu}$ per P formano una terna ortogonale di coordinate cosiddette geografiche che sono la base di ogni applicazione tecnica del posizionamento.

La terna (λ, φ, h) è biunivocamente trasformabile in coordinate cartesiane geocentriche (x, y, z) (con l'origine nel baricentro e l'asse z lungo l'asse di rotazione terrestre); in questo senso (λ, φ, h) sono coordinate puramente geometriche. Dall'avvento del posizionamento satellitare (GNSS), che non fa uso della direzione della verticale in P , l'altezza ellissoidica $h(P)$ è diventata una grandezza direttamente osservabile.

Le superfici $\{h(P) = \text{costante}\}$ distano dalle superfici equipotenziali, su cui C è costante, assai più che non le superfici $\{H(P) = \text{costante}\}$. In particolare lo scarto del geoide G , ($C = 0$), dall'ellissoide E , ($h = 0$) è detto ondulazione del geoide N e varia in una fascia di ± 100 m su tutto il globo.

I parametri di E sono scelti in modo tale che la media di N su E sia nulla. Particolarmente semplice è la relazione geometrica tra h ed H , data da

$$h(P) = H(P) + N(P_e) , \quad (11)$$

P_e essendo la proiezione ortogonale di P su E .

La conoscenza di $N(P_0)$ può essere ottenuta solo per via gravimetrica, facendo in aggiunta opportune ipotesi sulla densità di massa degli strati topografici.

Le altezze normali h^* : per definire in modo corretto questo tipo di coordinate d'altezza è necessario introdurre qualche nozione relativa al cosiddetto campo normale.

La costruzione del potenziale normale $U(P)$ è legata all'ellissoide E . $U(P)$ è un potenziale costituito

da una parte centrifuga $\frac{1}{2}\omega^2(x^2 + y^2)$ identica a quella di W e da una parte armonica $V(P)$ tale che

$$V(P) + \frac{1}{2}\omega^2(x^2 + y^2)\Big|_{\varepsilon} \equiv U_0 \quad (12)$$

Per convenzione V_0 e W_0 sono uguali tra loro.

Il modulo del gradiente di $U(P)$, indicato con $\gamma(P)$, è chiamato modulo della gravità normale. Nello strato topografico, cioè fino ad altezze massime di 10 km, V e γ possono essere espressi con formule approssimate in termini di coordinate geografiche, ovvero

$$\begin{aligned}
 \gamma(h, \varphi) &= \gamma_0(\varphi) - \gamma_1(\varphi)h + \gamma_2 h^2 \\
 \gamma_0(\varphi) &= 978,049 [1 + 0,005\,2884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi] \\
 \gamma_1(\varphi) &= 0,30877 - 0,00045 \sin^2 \varphi \\
 \gamma_2 &= 0,000072 ; \\
 U &= U_0 - \gamma_0(\varphi)h + \frac{1}{2} \gamma_1(\varphi)h^2 - \frac{1}{3} \gamma_2 h^3 , \\
 U_0 &= 6236856 \text{ m s}^{-2} \\
 \gamma &\text{ in Gal (= cm s}^{-2}\text{), } h \text{ in km, } U \text{ in g.p.u.}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Infine la direzione del vettore della gravità normale è, sempre nello strato topografico, molto prossima alla direzione di $\underline{\nu}$ la normale ad $\mathbb{E}$, poiché le linee della verticale di $\mathbb{E}$ hanno una curvatura piccolissima in tale strato.

La differenza tra potenziale della gravità W e potenziale della gravità normale U è per definizione il potenziale anomalo $T(P)$, cioè

$$W(P) = U(P) + T(P) \tag{15}$$

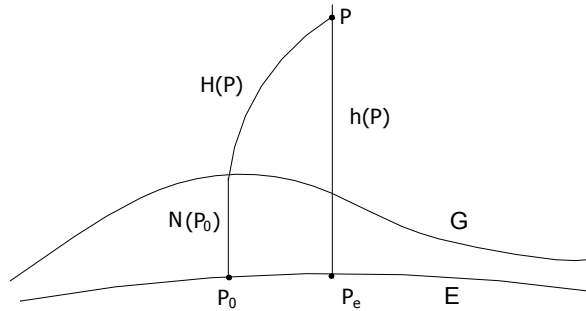


Figura 2 – Relazione tra h, H ed N . Si noti che per motivi fisici è $|P_0 P_e| < 2m$, $|N(P_0) - N(P_e)| < 0,2 \text{ mm}$.

Ciò posto, si considera un punto P e la normale ad $\mathbb{E}$ passante per P (vedi Fig. 2).

Lungo la retta PeP si definisce un punto P^* tale che

$$U(P^*) = W(P) ; \tag{16}$$

per definizione l'altezza “normale” di P è data da

$$h^*(P) = h(P^*) . \tag{17}$$

Poiché

$$W(P^*) < W_0 = U_0 = U(P_e)$$

e poiché $V(P)$ diminuisce in modo monotono nello stato topografico lungo la normale ad $\mathbb{E}$, la (16) ha certamente una soluzione P^* e $h^*(P)$ risulta ben definita.

La definizione di $h^*(P)$ è dovuta ad M.S. Molodensky che era interessato ad una linearizzazione rigorosa dei problemi al contorno della geodesia (cioè alla determinazione di $T(P)$) e, come si vede, essa dipende dalla quantità osservabile sulla superficie $W(P)$ (o meglio osservabile a meno di una costante).

Usando la (14), si vede che, noti (λ, φ) e W del punto P , è possibile ricavare $h^*(P)$ in modo univoco, dunque le due informazioni sono sostanzialmente equivalenti. Anzi, più precisamente, si può notare che a causa della scelta $U_0 = W_0, h^*$ definita dalla equazione

$$-\frac{1}{3}\gamma_2 h^{*3} + \frac{1}{2}\gamma_1 h^{*2} - \gamma_0 h^* + C = 0 \quad (18)$$

risulta direttamente funzione del numero geopotenziale $C(P)$. Un'altra forma della (18), assai usata perché simile alla (10), è

$$h^*(P) = \frac{C(P)}{\bar{\gamma}}, \quad (19)$$

dove $\bar{\gamma}$ è il valor medio di γ lungo la normale all'ellissoide, tra E e P . È chiaro che la (19) è sostanzialmente equivalente alla (18).

Confronto tra stima di parametri di posizione e velocità ottenuti da serie temporali continue o a blocchi

Maurizio Barbarella, Stefano Gandolfi

(*) DICAM-ARCES, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna
Tel. 051 2093106, Fax 051 2093114, e-mail: nome.congome@unibo.it

Riassunto

La posizione delle stazioni che realizzano il Frame di un Sistema Geodetico è ottenuta da centri di calcolo che in continuo (con cadenza giornaliera o settimanale) acquisiscono dati grezzi e calcolano soluzioni. Questo è quanto realizzato da IGS e EUREF per la gestione dei sistemi ITRS e ETRS89. L'Italia ha recentemente adottato il Sistema Geodetico Europeo ETRS89 e ha realizzato il Frame di riferimento nazionale denominato RDN (Rete Dinamica Nazionale). Per la definizione del sistema l'IGM e diversi centri di calcolo (tra cui l'Università di Bologna) hanno calcolato autonomamente la soluzione utilizzando quattro settimane di dati ogni sei mesi circa. Successivamente l'IGM ha acquisito dati dalle stazioni di RDN non in modo continuo ma per dataset della durata di 4 settimane a sei mesi di distanza l'uno dall'altro. La ricerca in oggetto, basandosi su un campione di circa 8 anni di dati di una rete di 13 Stazioni Permanenti della rete IGS-EPN (quella utilizzata per l'inquadratura della rete RDN), intende analizzare le differenze tra risultati medi di posizione e velocità ottenuti da una soluzione a blocchi rispetto ad una soluzione continua sia in termini di stima dei parametri sia in termini di accuratezza associata. Viene inoltre valutata la affidabilità della stima delle velocità in relazione alla durata del dataset.

Abstract

The position of the stations that realize the Frame of a Geodetic System is obtained by Computing Centers that continuously (every day) acquire raw data from the Stations and compute solutions. This task is carried out by IGS and EUREF which realize and manage the Geodetic Systems ITRS and ETRS89 and periodically update the System's frames Italy has recently adopted the European Geodetic System ETRS89 and has created the national densification frame, called RDN (Rete Dinamica Nazionale). For the definition of the RDN frame, various computing centers (including the University of Bologna) have independently calculated the solution using four weeks of data, in agreement with IGM. Then IGM has acquired data from RDN stations not continuously but through data samples of four weeks about every 6 months. This paper intends to analyze the differences between the results obtained from a discontinuous dataset (like that considered by IGM) with respect a continuous and seamless data sample. The research in question is based on a sample of about 8 years of data from a network of 13 permanent stations network EPN-IGS (the one used for the classification of the network RDN). The same dataset is used to assess the influence of the duration of the of time series on the reliability of the estimate of the velocity of points.

1. Il problema affrontato

Nell'elaborazione delle osservazioni acquisite da Stazioni Permanenti una fase molto impegnativa riguarda la organizzazione dei dati in un archivio ben organizzato che costituisce il dato di input al o ai software scelti per il calcolo. Nel caso di una rete articolata composta di numerose stazioni anche la semplice acquisizione dei dati grezzi completi può risultare un problema complesso,

soprattutto se i ricevitori sono di marche diverse, se le stazioni appartengono a diversi soggetti, se non è possibile organizzare il flusso regolare e automatizzato dei file giornalieri registrati dalla Stazione verso il centro di calcolo. Problemi di questo tipo sono stati incontrati dall'IGM quando ha selezionato una novantina di Stazioni Permanenti (SP) italiane per costituire una Rete che fungesse da frame del nuovo Sistema Geodetico Italiano, la R.D.N. [Relazione RDN]: le stazioni sono state scelte in modo da avere una distribuzione omogenea su tutto il territorio nazionale, da essere sufficientemente affidabili sia strutturalmente che per la strumentazione installata che per affidabilità della gestione. Tuttavia non è stato possibile almeno nei primi anni organizzare un flusso continuo e automatico dei dati, per cui l'IGM ha concentrato gli sforzi per acquisire uno spezzone di registrazioni della durata di 28 giorni, tramite i quali ha calcolato la posizione d'impianto dei vertici della rete, inquadrata su circa una dozzina di S.P. delle reti IGS e EUREF. Successivamente all'impianto, il monitoraggio delle posizioni e delle caratteristiche specifiche delle singole stazioni è stato effettuato ripetendo i calcoli a distanza di sei mesi, sempre su uno spezzone continuo di 4 settimane; questa procedura è stata seguita dal 2008 fino ad ora pur continuando il processo di automazione del flusso dati che sembra potersi considerare ormai completato. E' interessante capire se l'elaborazione di spezzoni temporali di durata Δt acquisiti a distanza di tempo T equivalga sostanzialmente alla elaborazione dei dati completi senza soluzione di continuità, e questo sia in termini di posizione che di velocità; infatti il calcolo ripetuto nel tempo della posizione dei punti di una rete, oltre a tenere sotto controllo le caratteristiche di stabilità delle singole stazioni, ha il vantaggio di fornire indicazioni sulla loro velocità nel sistema adottato per il calcolo. E' importante sottolineare che per la definizione di un frame geodetico pienamente operativo occorre conoscere la posizione dei vertici a una certa data (epoca) ma anche la velocità (dati corredati da matrice di varianza covarianza), in modo da aggiornare la posizione della stazione ad un tempo successivo ipotizzando un movimento uniforme. In questo lavoro gli autori si pongono due obiettivi. Uno riguarda il confronto dei risultati ottenuti col passare del tempo tra elaborazione eseguite per spezzoni temporali discontinui regolarmente intervallati (com'è avvenuto per RDN) e quelli ottenuti con dati senza soluzione di continuità. Un secondo problema riguarda il tempo necessario ad ottenere stime attendibili per le velocità delle stazioni: per quanto riscontrabile in letteratura, tre anni di funzionamento (in continuo) vengono generalmente considerati indispensabili allo scopo; sembra utile svolgere una analisi in questa direzione anche nel contesto nazionale. Per approfondire i due punti si analizza una rete i cui dati sono disponibili per un lungo periodo di tempo e che danno garanzie di accurati controlli effettuati ad alto livello tecnico scientifico; la scelta è caduta su Stazioni Permanenti delle reti IGS o EUREF.[Boucher, Altamimi., 2007].

2. Formazione del campione dati usato nelle elaborazioni

Per l'analisi si è scelta una rete campione costituita da Stazioni Permanenti delle Reti internazionali IGS e EUREF ben documentate da anni e quindi tali da consentire una agevole acquisizione di dati affidabili. Per quanto attiene la collocazione geografica della rete, sono state scelte le stesse 13 Stazioni usate per effettuare l'inquadramento di RDN perché lo studio del loro comportamento consente di prefigurare quello (ovviamente medio) delle stazioni di RDN, al di là del comportamento specifico di ciascuna di esse. Per quanto concerne la collocazione temporale, l'archivio è stato creato con i dati disponibili a partire dal 2002; le valutazioni sono state concentrate negli stessi periodi per i quali sono state effettuate le elaborazioni per RDN (dalle ultime due settimane del 2007 ad oggi) [Barbarella., Gandolfi , 2010.]. Questo significa che per studiare le differenze introdotte dall'uso di spezzoni temporali disgiunti rispetto alla elaborazione sull'intero intervallo senza soluzione di continuità, sono stati considerati gli intervalli temporali riportati in tabella 1. Per 'epoca' s'intende il riferimento temporale dello spezzone, collocato a circa la sua metà :

N°	Epoca	da	a	n°	n°
1	2008.0	357/2007	019/2008	98	2595
2	2008.5	167/2008	194/2008	73	1928
3	2009.0	356/2008	017/2009	89	2260
4	2009.5	165/2009	192/2009	97	2454
5	2010.0	354/2009	016/2010	87	2189

Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. – *Spezzoni temporali di dati acquisiti per RDN.*

Per la realizzazione del dataset in oggetto, sono state messe a punto procedure batch in ambiente linux sia per il download dei dati delle stazioni permanente sia per il download delle orbite precise. L'archivio è stato suddiviso in anni e giorni seguendo le architetture standard di archiviazione dei dati nei principali repository mondiali.

Una volta organizzato l'archivio dati è stata anche realizzata una procedura automatizzata per la esecuzione dei calcoli della posizione dei punti.

3. Modalità di elaborazione dei dati

Per l'analisi che si intendeva effettuare, il calcolo della posizione dei punti della rete è stato utilizzato il software Gipsy [Zumberge,1997] in modalità Precise Point Positioning e senza risoluzione delle ambiguità iniziali di fase che risulta particolarmente efficiente soprattutto in termini di velocità di esecuzione e produce risultati *equivalenti* ad altri software di tipo scientifico, quali Bernese e Gamit soprattutto per quanto attiene la stima dei parametri di posizione e velocità media dei siti [Kierulf, 2008]. Il calcolo ha fornito soluzioni giornaliere per le 13 Stazioni analizzate su tutto il periodo, soluzioni consistenti nelle stime della posizione del punto e della relativa matrice di varianza 3x3: avendo con Gipsy seguito l'approccio indifferenziato, ciascun punto della rete è calcolato indipendentemente dagli altri e quindi non sono calcolate le covarianze tra le stazioni. Avendo quindi a disposizione le soluzioni giornaliere su tutto il periodo 2002 – 2010 è possibile analizzare campioni parziali relativi a determinati intervalli temporali, in relazione a ciascuno dei quali è stata effettuata una analisi standard, separatamente per ciascuna coordinata, basata su un protocollo e su codici ampiamente testati e consistente essenzialmente in :

- Stima dei parametri di regressione lineare dei dati (coordinate stimate giornalmente) ricompresi nel campione, mediante minimi quadrati pesati tramite l'inverso della varianza ottenuta per la coordinata stimata da Gipsy,
- eliminazione iterativa di singole soluzioni giornaliere che sono considerate outliers alla luce di parametri statistici predefiniti,
- stima definitiva del fit per ciascuna coordinata separatamente e ottenimento dei coefficienti della regressione lineare finale e dei parametri statistici associati alla loro stima.

La procedura accennata è stata applicata a tutti i campioni (nel seguito indicati con A, B,..E) sia che fossero costituiti da spezzoni discontinui che contenessero dati senza soluzione di continuità nel periodo considerato. Per l'intervallo temporale più breve considerato (spezzone di quattro settimane) si è stimata la media pesata anziché il trend lineare. Si osserva che il coefficiente angolare della regressione lineare ottenuto per la serie temporale delle coordinate è interpretabile come velocità media del punto stimata per il periodo analizzato (nel seguito espressa in mm/anno), per la quale è calcolato anche lo s.q.m. . Tramite i valori stimati dei coefficienti di regressione è possibile estrapolare il valore previsto per ciascuna coordinata ad un'epoca successiva con associata la corrispondente indeterminazione.

4. Analisi dei campioni costituiti da spezzoni disgiunti

Per analizzare le differenze risultanti dall'uso di spezzoni disgiunti di dati rispetto alla serie completa che ricopre il medesimo intervallo, sono stati elaborati cinque campioni di dati costituiti rispettivamente da 1,2,3,4,5 spezzoni (ciascuno di 28 giorni, corrispondenti ai tempi di acquisizione di RDN) e i cinque campioni corrispondenti costituiti da tutti i dati compresi dell'inizio del primo spezzone alla fine dell'ultimo considerato; la tabella illustra i campioni "paralleli" considerati e posti a confronti, e la relativa consistenza.

Campione DATI	Per Spezzoni		In Continuo		
	contiene	gg	da	A	gg
A	1	28	357/2007	019/2008	28
B	1 e 2	56	357/2007	194/2008	202
C	1,2,3	84	357/2007	017/2009	390
D	1,2,3,4	112	357/2007	192/2009	565
E	1,2,3,4,5	140	357/2007	016/2010	754

Tabella 1 – Campioni analizzati e loro consistenza.

Per valutare le differenze introdotte dall'uso di spezzoni discreti intervallati di circa sei mesi rispetto alla serie temporale che copre con continuità lo stesso intervallo, si è scelto di confrontare il dato che si ottiene proiettando le stime delle corrispondenti regressioni, a una data corrispondente a sei mesi dopo il termine del campione, secondo quanto illustrato in tabella 2; si vuole cioè rispondere alla domanda: le previsioni a sei mesi (quando inizierà il prossimo spezzone), di quanto differiscono nei due casi?

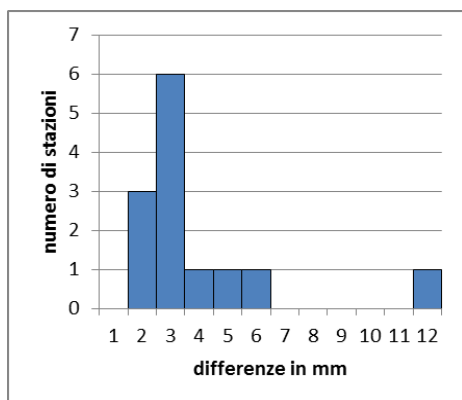
Campioni	B	C	D	E
Termine dati, gg.	194/2008	017/2009	192/2009	016/2010
Proiezione	2009.0	2009.5	2010.0	2010.5

Tabella 3 – Ultimo dato presente nel campione e data di proiezione della stima di posizione.

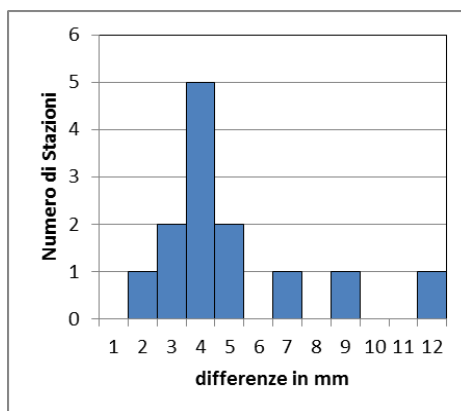
La differenza delle coordinate geocentriche (ΔX , ΔY , ΔZ) che si ottengono dalla elaborazione dei due campioni corrispondenti allo stesso periodo può essere sinteticamente riassunta dai grafici della sottostante figura 1, nei quali sono riportati gli istogrammi del modulo dello spostamento globale per ciascun punto, $\Delta = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$ in mm ottenuti per i quattro casi B,C,D,E considerati. Per ciascuna coordinata il comportamento è indicato dai parametri statistici in Tabella 4.

(mm)	ΔX		ΔY		ΔZ		Spostamento Δ	
Caso	media	s.q.m.	Media	s.q.m.	media	s.q.m.	media	s.q.m.
B	-0.9	2.7	0.4	1.8	-0.9	2.0	2.6	3.0
C	-0.2	2.9	-0.1	1.5	-0.2	3.1	3.5	2.6
D	0.3	1.3	0.2	0.9	0.4	1.4	1.8	1.0
E	0.4	1.5	-0.1	0.8	0.5	1.3	1.9	1.0

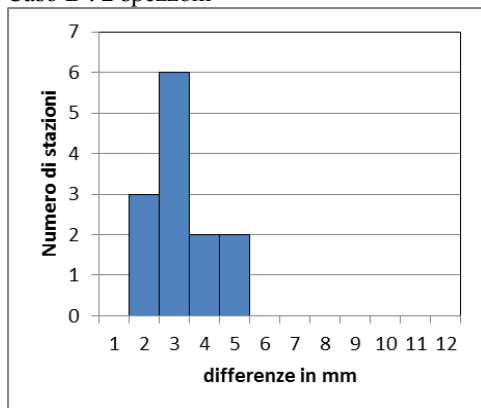
Tabella 4 – Parametri statistici della differenza di coordinate stimate, in X,Y,Z e totale.



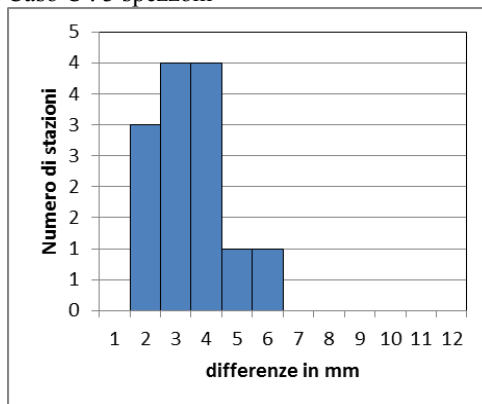
Caso B : 2 spezzoni



Caso C : 3 spezzoni



Caso D : 4 spezzoni



Caso E : 5 spezzoni

Figura 1 – Istogramma della differenza di posizione per il punto stimata per i vari campioni.

Con 2-3 spezzoni si assiste ad un comportamento abbastanza differenziato tra i vari punti, con una stazione che presenta una differenza di posizione di 1 cm, decisamente importante.

Nei casi D ed E ovvero con 4 e 5 spezzoni che coprono (in modo continuo e no) rispettivamente 2 e 2.5 anni, le differenze dovute all'uso di spezzoni di un mese sono limitate in media ma soprattutto il comportamento è più omogeneo tra i punti, anche se esistono stazioni che presentano ancora differenze di 5-6 mm nella posizione prevista. L'uso di spezzoni introduce variazioni modeste ma apprezzabili, che si riducono col passare del tempo; quello che però si perde definitivamente è la possibilità di apprezzare variazioni annuali della serie temporale e quindi la possibilità di una modellizzazione più fine.

5. Stima delle velocità

L'altro problema affrontato riguarda l'attendibilità della stima della velocità dei punti stimata in relazione alla lunghezza della serie temporale. A questo scopo sono state calcolate le differenze tra le stime delle velocità di ciascuna coordinata delle stazioni ottenute con gli spezzoni parziali e il corrispondente valore relativo all'intero campione di dati, ottenendo i risultati sintetizzati nelle figure seguenti. Considerata la media dei valori sulle stazioni si osserva soprattutto per le componenti Est e Nord (sistemi geodetici locali con origini nei punti di stazione) una rapida

convergenza a zero: in ordinata la media della differenza di velocità rispetto al campione completo in mm/anno, in ascissa la durata del campione, in mesi.

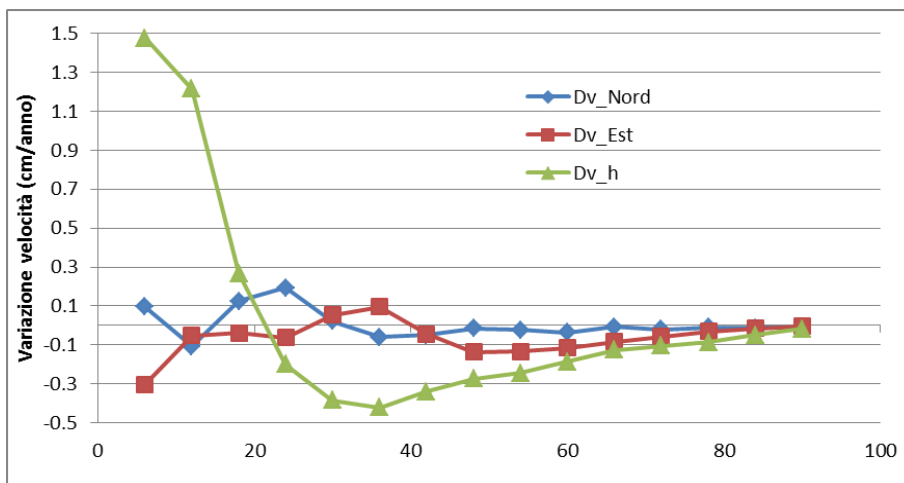
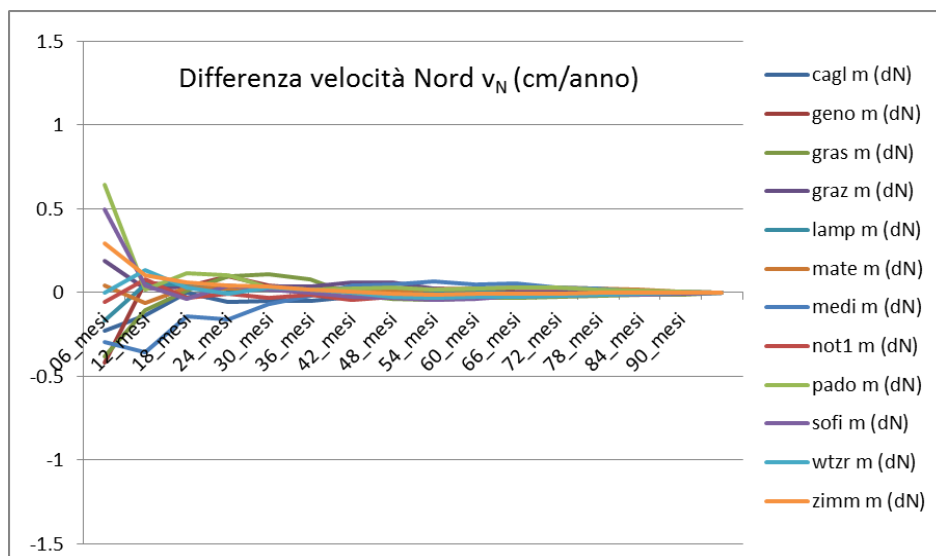


Figura 2 – Media delle differenze di velocità in relazione alla lunghezza del campione analizzato.

Ovviamente non tutte le stazioni si comportano allo stesso modo: negli istogrammi succevi si riporta la dispersione del difetto di troncamento per alcune durate del campione dati usato.



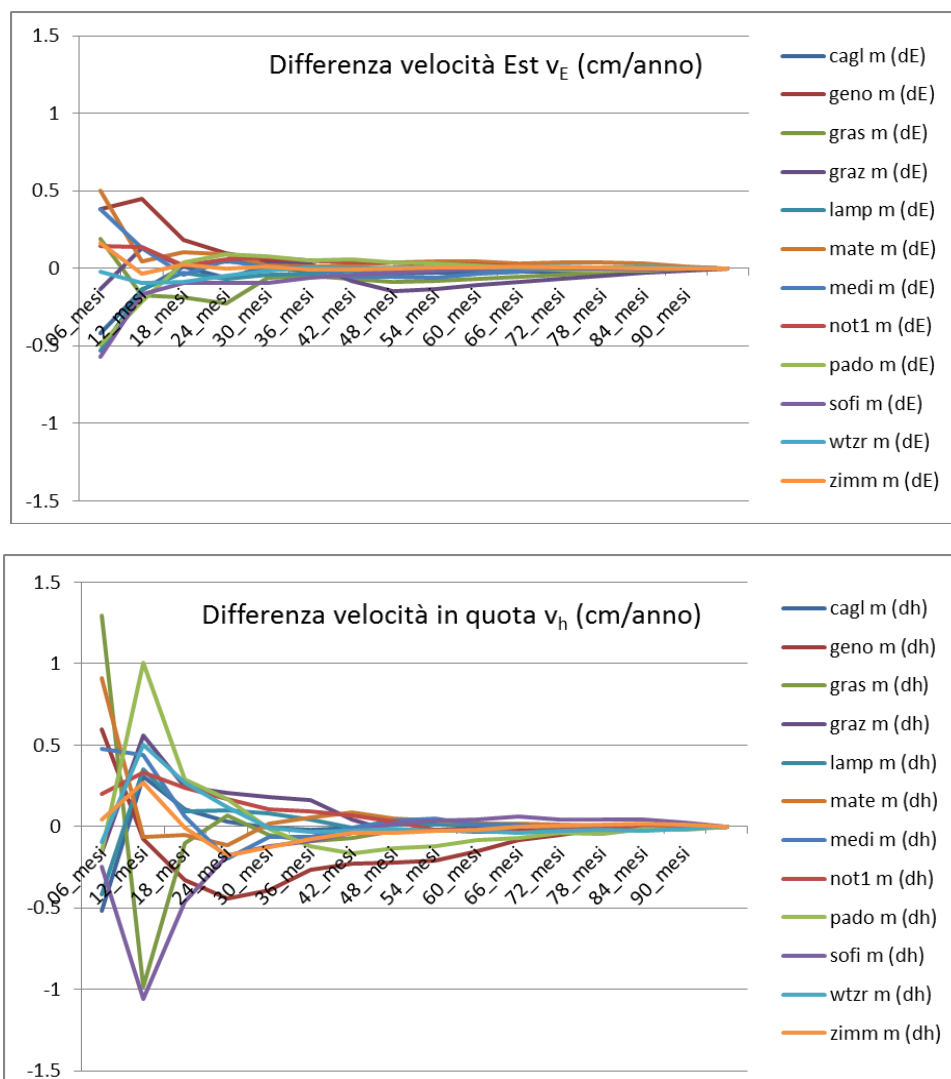


Figura 3 – Differenze di velocità di ciascuna stazione in relazione alla lunghezza del campione analizzato.

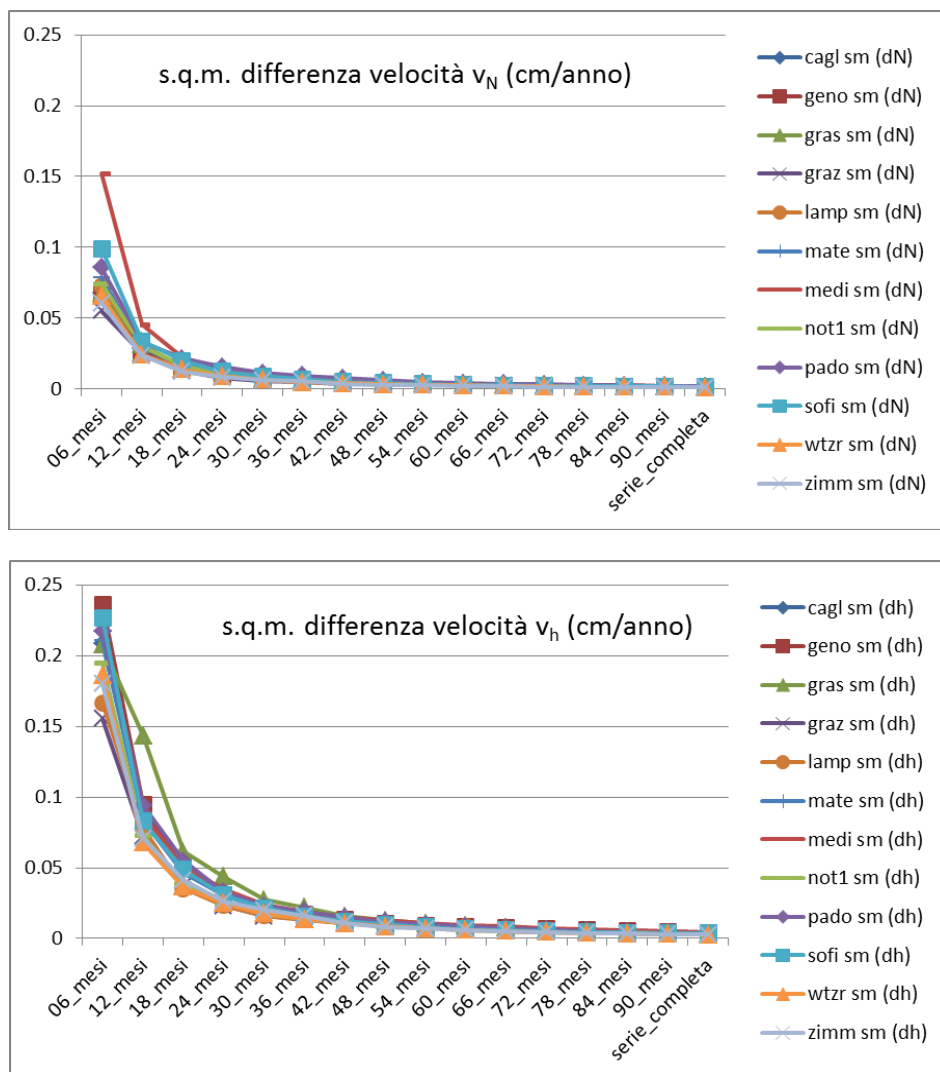


Figura 4 – Valore dello s.q.m. della stima di velocità delle stazioni per i campioni analizzati.

Si osserva che l'indeterminazione associata alla stima delle velocità del campione completo, soprattutto per le componenti planimetriche, risulta assai piccola, inferiore al decimo di millimetro. Anche prendendo come limite di significatività il triplo dello s.q.m. della velocità finale, la differenza tra stima del campione ridotto e quello finale rimane superiore a quel limite anche per spezzoni lunghi una ottantina di mesi e quasi in un terzo dei casi non diviene mai inferiore. Col tempo la stima si raffina sempre più, dal punto di vista dei parametri formali e il campione utilizzato non ha durata ancora sufficiente a capire se un intervallo più ridotto è equivalente.

6. Conclusioni

Il comportamento d'insieme della Rete RDN, al di là delle caratteristiche specifiche locali di ogni singola stazione, è ben descritto da quello delle 13 Stazioni Permanenti di IGS e EUREF che sono

usate per inquadrare RDN nel contesto mondiale dei sistemi ITRS e ETRS89. Analizzando il comportamento di tali stazioni si ritiene di non allontanarsi troppo da quelli che sono i comportamenti di RDN. Otto anni di dati delle 13 stazioni sono stati usati per capire quanto una soluzione ottenuta su due spezzoni di 28 giorni ogni anno si può discostare da quella calcolata su un campione completo. I primi risultati mostrano che i risultati migliorano con il passare del tempo e che dopo 2-3 anni la posizione previste a sei mesi dopo la fine del campione (cioè quando inizia la successiva acquisizione) differiscono di alcuni mm (fino a 6 per una stazione), quindi piccole ma non trascurabili. Ovviamente con dati discontinui viene meno la possibilità di apprezzare variazioni annuali della serie temporale e quindi la possibilità di una modellizzazione più fine. Si ritiene importante che per un Frame nazionale sia importante associare alle posizioni ad una certa data, anche una indicazione delle velocità. Per avere un'idea, al di là di quanto riportato in letteratura, se i dati disponibili su RDN siano sufficienti a definire una attendibile stima della velocità, il campione trattato è stato suddiviso in sottocampioni di diversa lunghezza e le stime di ciascuno di essi per le velocità sono state confrontate con quella ottenuta col campione completo, oltre 8 anni. Considerando sensibili le differenze di velocità superiori a 1 mm/anno (dal punto di vista pratico), si riscontra che si raggiunge questo limite dopo 3 – 3.5 anni per le componenti planimetriche, ma dopo 5 -5.5 anni per la quota.

Questi primi risultati potranno essere approfonditi anche considerando migliori modelli per l'errore presente nelle serie temporali

Bibliografia

Relazione RDN sito IGMI: <http://87.30.244.175/rdn/rdn.php>

Boucher C. and Altamimi Z., (2007): *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS Campaign*, (Available on line at: <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V7.pdf>) *Guidelines for European Permanent Network Analysis* .
http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf

Barbarella M., Gandolfi S., Ricucci L. (2010). *Confronto degli spostamenti e velocità di una rete di stazioni permanenti ottenuta con due software di calcolo*. Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA, 9 – 12 novembre 2010, Fiera di Brescia

Zumberge J.F., Helfin M.B., Jefferson D.C., Watkins M.M., Webb F.H., 1997. Precise point positioning for efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, 102, 5005–5017.

Kierulf H.P., Plag H.-P., Bingley R.M., Teferle N., Demir C., Cingoz A., Yildiz H., Garate J., Davila J.M., Silva C.G., Zdunek R., Jaworski L., Martinez-Benjamin J.J., Orus P., Aragon A., 2008. Comparison of GPS analysis strategies for high-accuracy vertical land motion. *Physics and Chemistry of the Earth*, doi:10.1016/j.pce.2006.11.003, 33, 194–204.

Caporali A., Turturici F., Maseroli R., Farolfi G., (2009), Preliminary results of the computation of the new italia Permanent Network RDN of GPS stations., *Bullettin of Geodesy and Geomatics*, LXVIII, 2009, 2, 147-162.

Barbarella M., Gandolfi S., Ricucci L., Zanutta A., (2010), The new Italian geodetic reference network (RDN): a comparison of solutions using different software packages, (Accettato ed in corso di stampa sul BGG)

Utilizzo di dati SAR multi-temporali e multi-piattaforma per la generazione di prodotti utili al monitoraggio delle coltivazioni di riso

Massimo Barbieri

Sarmap, Cascine di Barico, 6989 Purasca, Switzerland

In molte degli stati del sudest asiatico, dove il riso rappresenta la coltura primaria, le mappe contenenti informazioni relative all'estensione delle aree coltivate sono molto approssimative e spesso in netto disaccordo con le recenti stime statistiche.

Una delle prime aree geografiche sulle quali abbiamo generato dei prodotti a scala nazionale, basati su serie multitemporali di dati SAR (Radar ad Apertura Sintetica) acquisiti da vari sensori (differente risoluzione spaziale e temporale e differente lunghezza d'onda), è rappresentata dalle Filippine. In questa nazione le uniche mappe del riso disponibili, e utilizzate dal Bureau of Soils and Water Management (BSWM), erano rappresentate dai prodotti generati durante i Land Resources Evaluation Project; tali prodotti consistono in generiche mappe di uso del suolo (scala 1:250.000), dalle quali sono stati successivamente digitalizzati gli "ecosistemi" legati al riso. Tuttavia i prodotti così generati mostravano forti inconsistenze rispetto all'estensione delle aree coltivate ottenute da stime statistiche.

Considerato che la conoscenza della totale superficie areale coltivata (e delle sue variazioni nel tempo) è di fondamentale importanza per una stima attendibile della produzione, risultava necessario validare localmente (province, regioni e comuni) le suddette mappe ed eventualmente correggerle ove richiesto. Tale lavoro, se fatto con metodologie classiche basate su rilevamenti a terra, presentava costi molto elevati e praticamente non sostenibili nella gran parte delle nazioni del sudest asiatico.

Un'alternativa evidentemente interessante, sia dal punto di vista economico che qualitativo, era rappresentata dall'utilizzo di dati telerilevati. In particolare l'utilizzo di dati radar, in grado di assicurare l'osservazione del territorio indipendentemente dalle condizioni di illuminazione (ad esempio in caso di copertura nuvolosa persistente piuttosto che acquisizioni notturne), era l'unica soluzione proponibile considerando la frequente e omogenea copertura nuvolosa presente in queste aree.

L'approccio adottato consiste dunque nell'osservazione continua dell'attività agricola con dati SAR ad alta risoluzione (Cosmo-SkyMed, ALOS PALSAR, ENVISAT ASAR) e nella conseguente analisi della firma temporale che, nel caso del riso, è particolarmente evidente in termini di variazioni dell'intensità del segnale riflesso in funzione del progredire della stagione agricola.

I risultati particolarmente promettenti ottenuti sulle Filippine hanno portato a estendere l'area osservata a gran parte delle aree di maggior produzione di riso del sudest asiatico (India, Bangladesh, Java, Thailandia, Vietnam).

L'obiettivo finale è quello di mettere a punto, entro il 2012-13 (data prevista per il lancio della missione ESA Sentinel-1), un sistema operativo e automatizzato che permetta di fornire, con frequenza settimanale, le informazioni relative allo sviluppo del riso durante l'intera stagione agricola in qualsiasi area del mondo.

BRISEIDE - implementazione di servizi OGC con dimensione temporale

Gianni Barrotta (*), Piergiorgio Cipriano (**), Stefano Pezzi (***)

(*) Sinergis srl, Piazza della Repubblica 32, Catania (CT), Tel. +39.095.312982, gianni.barotta@sinergisi.it

(**) Sinergis srl, Via del Lavoro 71, Casalecchio di Reno (BO), Tel. +39.051.278911, piergiorgio.cipriano@sinergis.it

(***) Sinergis srl, Via del Lavoro 71, Casalecchio di Reno (BO), Tel. +39.051.278911, stefano.pezzi@sinergis.it

1. Introduzione

La gestione di rischi ed emergenze ambientali è alla base del progetto europeo BRISEIDE (<http://www.briseide.eu/>).

L'enfasi del progetto è posta sulla componente "temporale" dei dati geografici (sia vettoriali che raster); di conseguenza, per l'utilizzo efficiente di tali dati con servizi OGC è necessario avere a disposizione strumenti e tecnologie in grado di:

- caricare automaticamente dati dinamici (es. rilievi meteorologici e previsioni) e statici (es. uso del suolo)
- catalogare automaticamente su server OGC sia dati che relativi metadati
- pubblicare servizi OWS con funzioni "spazio-temporali"

I casi d'uso raccolti dai 10 pilot del progetto hanno infatti evidenziato la necessità di avere capacità elaborative con filtri temporali per:

- il *portrayal* di dati vettoriali e *coverage* (WMS)
- l'accesso ed il *download* di dati vettoriali (WFS) e *coverage* (WCS)
- il *processing* e la trasformazione di dati (WPS)

La soluzione architetturale del progetto è basata completamente su soluzioni *open source*:

- GeoBatch per l'*ingestion* e la catalogazione automatica di dati su GeoServer e dei relativi metadati su GeoNetwork
- GeoServer per il *potrayal* (WMS), l'accesso (WFS, WCS) ed il processamento di dati (WPS)
- PostGres + PostGIS per il database (dati vettoriali e metadati)
- GeoTools
- GDAL

2. Modello dati e dimensione temporale

Briseide ha affrontato il problema della dimensione temporale nei dati geografici nei due ambiti tipici in cui si classificano abitualmente i dati geografici tradizionali: raster e vettoriale. In entrambi i casi sono stati definiti dei modelli dati per supportare il trattamento dell'attributo temporale da parte dei servizi di accesso e di mappa. Nel caso dei dati vettoriali una condizione vincolante è stata quella del formato di memorizzazione che il progetto ha individuato a priori nel DB relazionale spaziale PostGIS, mentre per i dati raster non sono state fatte scelte particolari, visto anche il contesto più variegato dei formati esistenti per questo tipo di dati. In tutti e due i casi però si è limitato l'ambito di intervento del progetto, escludendo nuovi sviluppi che riguardassero direttamente il DBMS o la creazione di nuovi formati raster

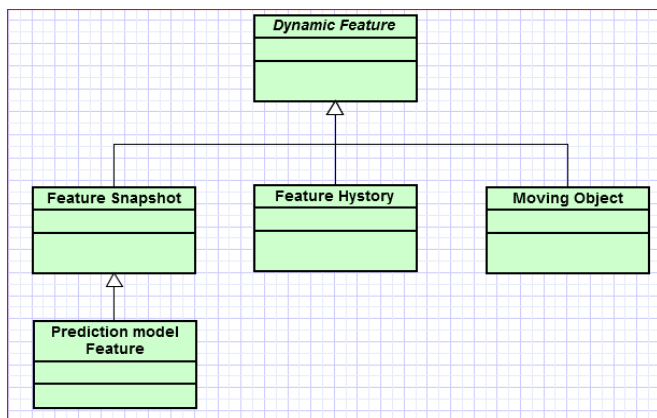
In entrambi i casi si sfrutterà il disegno architeturale del sistema che prevede la presenza di servizi di ingestione, che possono implementare la logica necessaria a trasformare i dati di input nei modelli implementativi definiti.

Dati vettoriali

In Briseide sono stati individuati tre tipologie di dati spazio-temporali modellabili come dati vettoriali:

- *Feature History* (oggetti con storia)
- *Feature Snapshot* (oggetti istantanei)
- *Moving Object* (oggetti in movimento)

Tutti questi oggetti modificano le loro proprietà nel tempo, inclusa la geometria, e potrebbero in teoria essere ricondotti ad un unico modello di oggetto spazio-temporale o *Dynamic Feature*. Nel contesto del progetto si è preferito ricorrere a questa suddivisione che corrisponde ad una pratica categorizzazione dei casi d'uso individuati e che risponde più appropriatamente alle esigenze dei diversi utenti. Nella figura sottostante è indicata la gerarchia delle classi di oggetti spazio temporali individuate (si può notare anche una specializzazione della *Feature Snapshot* che sarà introdotta più avanti).



Tipologie di attributi temporali

La tipologia di dimensione temporale considerata fino ad ora ha sempre avuto un solo significato: il tempo in cui una proprietà di una *Dynamic Feature* ha cambiato valore nel mondo reale. Per essere corretti invece occorrerebbe considerare diversi possibili significati dell'attributo temporale; infatti possiamo parlare di:

- *valid time* (tempo di validità o tempo intrinseco o tempo del mondo reale o tempo logico). Il valid time di un fatto è il tempo in cui il fatto è vero nella realtà che si modella.
- *transaction time* (tempo della transazione o tempo estrinseco o tempo di registrazione o tempo fisico). E' il tempo in cui un "fatto del database" (che descrive un fatto del mondo reale) è memorizzato nel database. Non si può inserire un transaction time futuro né si può modificare un transaction time passato.
- *user-defined time* (tempo utente). E' un attributo che ha sì il dominio di valori di un temp (data e ora), ma che non assume nessun significato particolare nell'analisi temporale e nella gestione del dato; in altre parole un user-defined time è allo stesso livello di un qualsiasi altro attributo con dominio di valori differente (ad esempio, la data di collaudo di un componente meccanico).

Queste tipologie di attributi temporali sono applicabili sempre e a tutti i tipi di oggetto spazio-temporale; per particolari tipologie di oggetti si possono aggiungere attributi temporali con specifici significati, come, ad esempio, il *run time* (tempo di esecuzione del modello predittivo) per le feature prodotte da modelli matematici di previsione.

Feature History

Sono oggetti che cambiano la loro posizione o geometria e un qualsiasi altro attributo nel tempo. Possono essere:

- oggetti fisici, naturali o artificiali, semplici (un edificio, un fiume ...) o complessi (un insediamento, una foresta ...).
- fenomeni naturali o artificiali (un incendio, una tempesta, uno sversamento di petrolio in mare,...), cioè entità rappresentate da un'area che non è limitata da una confine ben definito.

Alcuni oggetto cambiano continuamente nel tempo, altri cambiano solo in coincidenza di particolari eventi che avvengono in istanti specifici. Per i primi normalmente si ha un tempo di campionamento (più o meno costante) ed i valori relativi campionati (immagini satellitari di un uragano, la serie temporale delle foto aeree di un parco naturale...); per gli ultimi si hanno informazioni solo relative a questi particolari eventi (la data dei documenti che autorizzano il cambiamento di sagoma di un edificio, un rilievo di un fiume dopo un episodio di straripamento).

E' importante sottolineare che un singolo oggetto mantiene la sua identità individuale attraverso i vari cambiamenti di stato per ragioni intrinseche o convenzionali: se un edificio aumenta la sua superficie o un fiume modifica il suo corso è banale capire che l'edificio è ancora lo stesso oggetto e che il fiume è ancora lo stesso fiume. Questo succede perché la definizione di cosa è chiamato fiume è molto chiara e per l'edificio sono ben definite le regole che determinano il suo ciclo di vita. Ad esempio, potremmo decidere che quando un edificio viene spezzato in due o più fabbricati, non si può più considerare lo stesso oggetto; stessa cosa se un edificio viene demolito e ricostruito anche se con la stessa forma.

L'interesse principale per l'utente è nella geometria e nella posizione dell'oggetto e anche in tutti gli altri attributi alfanumerici.

Feature Snapshot

Simili alle *Feature History*, ma con la differenza che tra uno stato e l'altro non è possibile dire quale oggetto si è trasformato in quale. Non è riconoscibile nemmeno un rapporto di parentela tra le feature e questo perché nessuna feature possiede in realtà una vera e propria identità anche se non consideriamo la dimensione temporale. Un esempio efficace può essere quello di mappe prodotte dalla classificazione automatica di immagini raster: qui i poligoni non si riferiscono ad un particolare oggetto fisico, ma a *pixel* adiacenti che hanno i valori delle diverse bande di frequenza che ricadono nello stesso intervallo. Quando classifichiamo la stessa area in tempi differenti, i nuovi poligoni non sono correlati a quelli vecchi solo per essere nella stessa classe o condividere la medesima porzione di territorio. Quindi è come se tutti gli oggetti precedenti venissero cessati e i nuovi venissero creati.

Prediction Model Feature

Per alcuni tipologie di *feature* spazio-temporali è opportuno considerare un'altra dimensione temporale. E' il caso delle simulazioni o delle previsioni derivanti dall'esecuzione di un modello matematico predittivo. La dimensione è il *run time*, ovvero il tempo di esecuzione del modello. Le feature prodotte da modelli predittivi sono solitamente *Feature Snapshot* dove ciascun singolo oggetto prodotto da un'esecuzione non ha nessuna relazione con le *feature* prodotte dall'esecuzione precedente o successiva.

Moving object

Sono oggetti che cambiano la loro posizione e altri attributi nel tempo. La loro geometria (forma) è sempre fissa e, per i nostri scopi, può essere rappresentata da un semplice punto. E' un oggetto fisico, spesso artificiale, che cambia posizione nel tempo perché ha capacità autonome di movimento (un veicolo, un animale, una barca...) o perché non è fissato al terreno ed è soggetto al moto del mezzo nel quale è immerso (una boa galleggiante, un pallone meteorologico,...). Normalmente questi oggetti cambiano continuamente la loro posizione e i dati sono basati su un periodo teoricamente costante di campionamento (un trasmettitore che spedisce i dati ogni 5min, un video o una sequenza di immagini che riprendono l'oggetto in movimento). L'interesse principale dell'utente è per la posizione stessa dell'oggetto e opzionalmente in qualche parametro relativo al moto (velocità, accelerazione). Altri attributi relativi all'oggetto o all'ambiente circostante possono essere di interesse (livello della benzina nel serbatoio, la frequenza cardiaca dell'animale monitorato, la temperatura dell'acqua...).

3. Dati raster

Un raster è una struttura complessa che descrive un insieme di *dataset* matriciali che hanno lo stesso dominio e stessa configurazione di bande. Solitamente può essere il risultato di osservazioni con sensori remoti, fotografie o esecuzioni di modelli matematici. Un raster multidimensionale, dove alle tipiche dimensioni X, Y della griglia si aggiungono, ad esempio, quella temporale (o quelle temporali, se ad esempio consideriamo anche il tempo di esecuzione di un modello, o run time) e l'elevazione, può essere schematizzato dalla figura seguente:

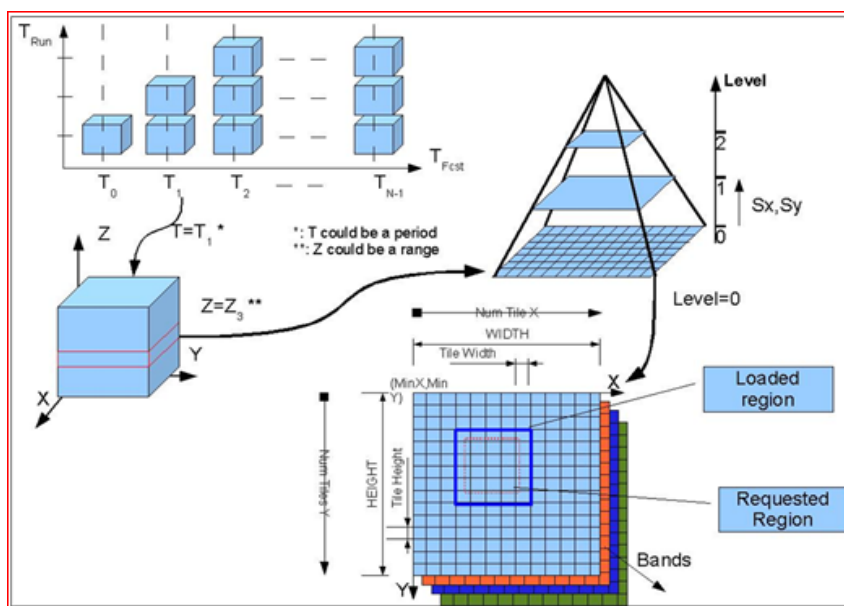


Figura 1 – Modello dati raster.

dove il primo livello di aggregazione è il tempo. Nel caso più generale l'ipercubo di dati può avere delle sovrapposizioni nel tempo, come ad esempio mostrato nel grafico in alto a sinistra dell'immagine (i raster sono in questo caso il prodotto di un modello di previsione che viene fatto girare in successivi T_{run} , producendo degli ipercubi di dati che si riferiscono a diversi T_{fcst} ; per lo stesso istante quindi posso avere più previsioni generate in tempi di esecuzioni diversi). Nel nostro

caso ipotizziamo che i dataset sia un insieme di fette (*slice*) costituite da raster bidimensionali corrispondenti alle dimensioni spaziali (lat, lon), che corrispondono ad un tempo ed ad una elevazione fissati. Ogni *slice* può essere composta da diverse bande. Una *slice* può essere anche suddivisa in “*tiles*”, cioè in sottoelementi di dimensione prestabilita; oltre a questo una *slice* può essere costituita da una piramide, ovvero può contenere delle “*overview*”, cioè delle rappresentazioni della *slice* a risoluzioni minori, precostruite solo per fini prestazionali.

4. "Time" e servizi OWS base (WMS, WFS, WCS)

Servizi WMS

Il WMS 1.1.1 è capace di esporre dimensioni aggiuntive rispetto alla X e Y o latitudine e longitudine; in particolare due di esse hanno i nomi prefissati *TIME* e *ELEVATION*. Esse sono pubblicizzate nel documento di *capabilities* e possono essere presenti tra i parametri di richiesta della GetMap per specificare un criterio di selezione sui dati.

Servizi WFS

Le specifiche WFS 1.0 e 1.1 non tengono in considerazione per nulla la dimensione temporale; con il WFS 2.0 e le relative specifiche per la definizione di filtri (FE 2.0) il tempo viene supportato con queste funzionalità:

- le FE vengono integrate con i “*temporal filter*”, ovvero con gli operatori corrispondenti alle 13 relazioni spaziali individuate da Allen.
- Supporto alle *join* temporali.

Dall’analisi dei requisiti non è emersa l’esigenza di arrivare a questo livello di funzionalità, non comprendendo nessun caso d’uso reale l’utilizzo di questi operatori o di *join*.

La scelta è stata quindi quella di rimanere alla versione 1.1, ma creare un profilo applicativo per il tipo di dati che si deve servire.

Altra scelta importante per i servizi WFS è stata quella di non servire *feature* complesse per evitare di richiedere implementazioni particolari sui client. Per questa ragione, il client dovrà conoscere a priori la semantica dei dati serviti, non derivabile completamente dal GML delle *feature*. Client al di fuori della *community* di Briseide, inconsapevoli quindi del significato particolare di alcuni attributi o delle relazioni che intercorrono tra diverse *feature type*, non vedranno compromesso il loro funzionamento, ma considereranno come normali *feature type* gli oggetti temporali serviti da Briseide. Utilizzando la possibilità che lo standard offre di estendere le “*capabilities*” del servizio, il WFS di Briseide pubblicherà le *feature* temporali servite attribuendole ad una delle 4 categorie individuate. Gli schemi dati delle *feature* conterranno delle convenzioni, ovvero ai nomi di alcuni attributi sarà legato un particolare significato; in altre parole si implementerà un profilo applicativo specifico del WFS, cioè una specializzazione del WFS che fornirà funzionalità aggiuntive per determinate tipologie di *feature*.

Servizi WCS

Similmente al WMS, il WCS supporta richieste che includono i parametri *TIME* ed *ELEVATION* (rispetto al WMS, c’è una piccola differenza che riguarda la gestione della *ELEVATION*, trascurabile in questo contesto). Quindi il WCS sarà capace di:

- Estrarre i valori *TIME* ed *ELEVATION* dal modello di dati del raster multidimensionale.
- Pubblicizzare i domini relativi alle due dimensioni nel documento di *capabilities*;
- Rispondere a richieste che coinvolgono solamente un valore di *TIME* e di *ELEVATION*.

E’ meglio sottolineare che al momento la risposta ad una GetCoverage non può essere un dato multidimensionale.

5. Ingestion

L'infrastruttura realizzata da Briseide permette l'ingestione automatica di dati geografici con dimensione temporale (vedi paragrafi precedenti).

I processi di *ingestion* consentono di catalogare automaticamente (ed in tempo quasi-real time) dati vettoriali e raster sia in GeoServer che i rispettivi metadati in GeoNetwork (service catalog Briseide).

Questo significa che l'infrastruttura rispetta una serie di requisiti per permettere la catalogazione "event-driven", come per esempio l'arrivo di file su un sito specifico FTP.

Per questa ragione i Servizi ingestione (IS) sono una componente essenziale in quanto rappresentano il punto di ingresso principale per l'ingestione dei dati. Inoltre, essi sono responsabili per la corretta archiviazione e catalogazione. I processi sono in grado di riconoscere anche la variabile "time", catalogando di conseguenza i layers nel wms-t di geoserver.

Il componente software scelto per realizzare i servizi di *ingestion* è GeoBatch.

GeoBatch è un progetto *open source*, basato su "eventi" per l'elaborazione batch automatica di dati geografici.

GeoBatch fornisce componenti di base per la raccolta, elaborazione e pubblicazione dei dati ad applicazioni esterne come GeoServer (<http://docs.codehaus.org/display/GEOBATCH/Geospatial+Batch+Engine>).

Un processo batch in GeoBatch è un file di configurazione XML denominato "flusso". Ogni flusso è costituito da tre sezioni: una parte descrittiva, una seconda dedicata ai dati di monitoraggio flussi (eventGeneratorConfiguration) e quello finale che è dedicato al riconoscimento di determinati file all'interno di un flusso, alla sua elaborazione e pubblicazione finale (eventConsumerConfiguration).

Nel progetto Briseide sono stati definiti 4 flussi di *ingestion*:

- Raster singola
- Imagemosaic
- ESRI Grid
- Shapefile

I quattro flussi possono essere attivati all'interno di ogni *pilot*, in base alla reale necessità e il formato dei dati forniti.

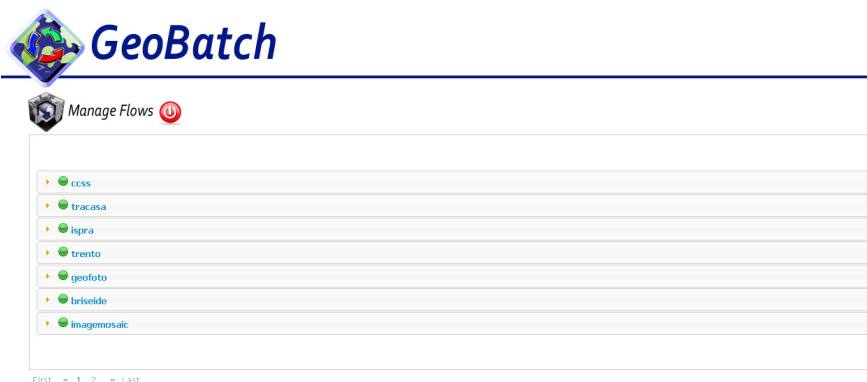


Figura 2 – Interfaccia amministrazione flussi di ingestione.

L'applicazione web di amministrazione di GeoBatch è disponibile all'indirizzo <http://briseide03.ingr.briseide.eu:8080/geobatch>: questo permette agli amministratori dei flussi di *ingestion* di monitorare i singoli flussi:

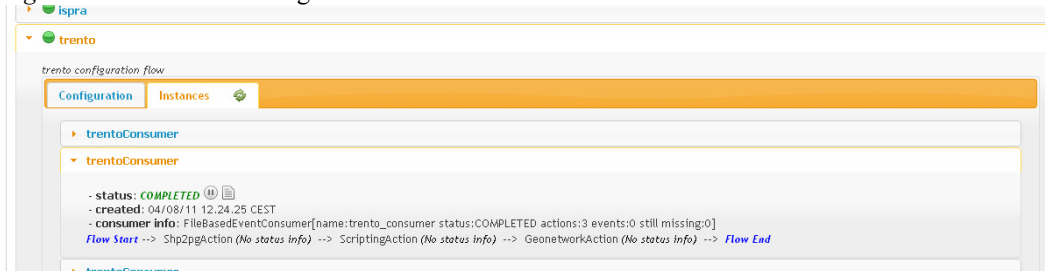


Figura 3 – Monitoraggio flusso di ingestion.

6. Processing

I servizi WPS sviluppati in Briseide sono stati implementati secondo la versione 1.0.0 , sono suddivisi in 7 tipologie:

- *topological* (buffer, union, intersection, inclusion,)
- *statistical* (media, mediana, minimo, massimo, ...)
- *transformation* (coordinate, formato)
- *change detection* (differenze tra coppie di *layer*, sia raster che vettoriali)
- *feature extraction* (estrazione *feature* vettoriali da raster)
- *raster algebra* (riclassificazione e operazioni tra raster)
- *statistic-time driven*

I primi sei WPS sono parte del progetto *open source* GeoServer: i primi tre servizi sono stati inclusi nella versione 2.1.1 rilasciata a giugno 2011 (<http://geoserver.org/display/GEOS/GeoServer+2.1.1>). Questo è un esempio concreto di contributo del progetto Briseide alla comunità *open source*.

Il settimo WPS, invece, è stato implementato utilizzando la soluzione R2WPS.

I servizi WPS sviluppati su GeoServer sono disponibili all'indirizzo <http://briseide02.ingr.briseide.eu/8080/geoserver>; è possibile testare i 6 WPS tramite la pagina di Request Builder disponibile all'indirizzo <http://briseide02.ingr.briseide.eu:8080/geoserver/web/?jsessionId=E02958C9CEDB526C7D994B7243D2C821?wicket:bookmarkablePage=:org.geoserver.wps.web.WPSRequestBuilder>, selezionando il processo che si vuole utilizzare e inserendo i parametri di *input*.

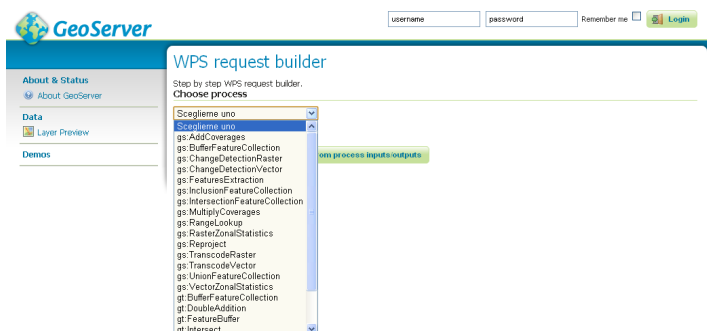


Figura 4 – Elenco WPS.

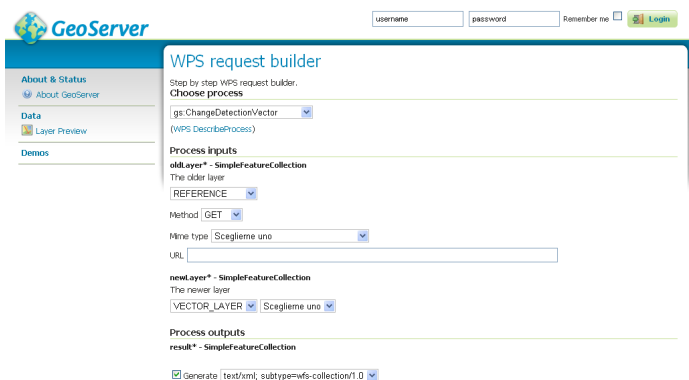


Figura 5 – Interfaccia test WPS.

Nell'immagine seguente c'è un semplice esempio di un'operazione di *buffer* (WPS “topological”): il *client* (gvSIG 1.9) utilizza un servizio WFS esterno e su una *feature* del *layer* “parks” definisce un *buffer* di 1000 metri, chiedendo come output al servizio WPS un layer di *buffer* in formato SHP. Inoltre è possibile concatenare il processi WPS in modo tale che l'*output* di un processo diventi l'*input* di un'altro processo (si pensi ad esempio ad una operazione di *buffer* su un *layer* ottenuto come intersezione o unione di altri due *layer*).

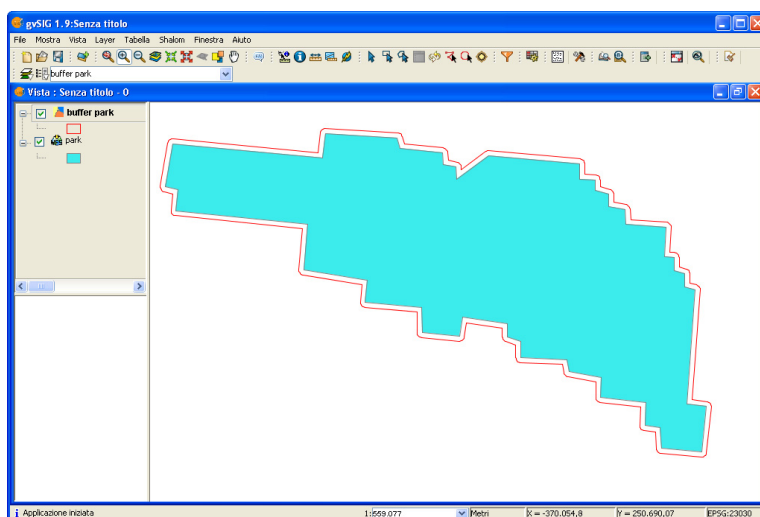


Figura 6 – Visualizzazione risultato buffer.

Analisi dell'azione del vento di Sirocco alle foci dei fiumi Brenta-Bacchiglione e Livenza durante l'evento alluvionale di ottobre-novembre 2010 in Veneto

Francesco Baruffi (*), Massimo Cappelletto (*), Angelo Zandonella (**)

(*) Autorità di Bacino dei Fiumi dell'Alto Adriatico, Dorsoduro 3593, 30123 Venezia

Tel. 041.714444, Fax 041.714313, sistema.informativo@adbve.it

(**) Collaboratore Tecnico-Scientifico, angelo.zandonella@ieec.org

Riassunto

L'azione del vento alle foci del Brenta-Bacchiglione e del Livenza, durante l'evento alluvionale di ottobre-novembre 2010 in Veneto, è stata valutata utilizzando i seguenti indicatori: l'orientamento degli assi fluviali, la persistenza dell'azione del vento, la velocità del vento e l'innalzamento del livello marino.

I dati utilizzati sono: satellitari (radar scatterometro dei venti e radar altimetro), meteorologici e mareografici. Vengono acquisiti con frequenza giornaliera e sono disponibili 24 ore dopo la loro acquisizione.

Le mappe di stima dei vettori di vento sono state prodotte con dati MetOP/ASCAT corretti, lungo le zone costiere, della forma del segnale (eco) di ritorno, mediante un metodo di *retracking*.

Le misure radar altimetro, multi-missione e prodotte con procedure "*near-real time*", utilizzate sono: le Anomalie in Altezza della Superficie del Mare (AASM) e la Topografia Dinamica Assoluta (TDA). Nella produzione delle mappe AASM e della TDA sono state omesse dalle elaborazioni i dati acquisiti in prossimità delle zone costiere, per ovviare agli effetti, sul segnale di ritorno, della irregolarità fra superficie del mare e terra.

La persistenza dei venti siroccali durante l'evento è stata ricavata dalle misure degli anemometri delle stazioni mareografiche costiere. La velocità del vento alle foci dei fiumi dai dati ASCAT. L'innalzamento del livello marino sia dalle misure idrometriche delle stazioni mareografiche che dall'analisi delle mappe AASM e della TDA.

Abstract

To assess wind action at Brenta-Bacchiglione and Livenza river mouths, during the flood event of october-november 2010 in Veneto region, the following indicators are used: river axes orientation, wind action persistence, wind speed and sea level rise measures.

Spaceborne (wind radar scatterometer and radar altimeter) data, meteorological data and coastal tide gauge stations data are used for this analysis. This data are acquired at daily basis and generally are user-available within 24 hours.

By using MetOP/ASCAT data, wind vector estimation maps are produced, the coastal area waveform data are reprocessed by a retracking method.

Sea Level Anomaly (SLA) and Absolute Dynamic Topography (ADT), derived by near-real time multimission radar altimetry data, are used. To reduced the waveform anomalies along the coastal areas, data acquired in these areas are omitted in SLA and ADT maps production.

The persistence of Sirocco wind during the flood event was obtained by anemometer measures of tide gauge stations. The river mouths wind speed by ASCAT data. The sea level rise by hydrometric measures of tide gauge stations and by SLA and ADT map data analysis.

Introduzione

“Dal 31 ottobre al 2 novembre il Veneto è stato interessato da piogge persistenti in particolare sulle zone prealpine e pedemontane, dove sono stati superati i 300 mm di pioggia ... L'evento è stato caratterizzato anche da venti di Sirocco lungo la costa ed in quota ... A seguito di tale evento gran parte del territorio del Veneto è stato interessato da fenomeni di dissesto idrogeologico e da situazioni di criticità lungo quasi tutti i principali corsi d'acqua, con rotture degli argini o superamenti delle sommità a causa del livello di piena, filtrazioni e allagamenti di ampie parti del territorio regionale ...” (da comunicato ARPAV, 2010 sull'evento alluvionale).

L'ARPAV ha messo a disposizione della comunità scientifica i dati pluviometrici e idrometrici registrati dalle stazioni attive nel corso dell'evento, auspicando che eventuali elaborazioni dei dati possano permettere una “più dettagliata e condivisa valutazione dell'evento occorso”.

Lo scopo di questa relazione è di dare un contributo alla comprensione delle cause che hanno dato luogo ai fenomeni di dissesto idrogeologico accennati.

A questo riguardo è stata condotta un'analisi per valutare l'azione del vento alla foce dei fiumi Brenta-Bacchiglione e Livenza utilizzando come indicatori:

- l'orientamento degli assi fluviali, favorevole allo stress dei venti siroccali;
- la persistenza dell'azione del vento;
- la velocità del vento e l'innalzamento del livello marino rilevati alle foci.

Come è noto, l'azione del vento sulla superficie del mare produce, oltre al moto ondoso, uno spostamento di masse d'acqua. Le conseguenze di questo trasporto sono: un accumulo d'acqua nelle zone costiere sottovento ed una sottrazione in quelle sopravvento. Nel primo caso il livello marino subisce un innalzamento mentre nel secondo un abbassamento.

I venti di Sirocco persistenti, anche se moderati, possono produrre notevoli innalzamenti del livello del mare nell'Adriatico settentrionale. Il fenomeno viene favorito dalla lunghezza della zona d'azione del vento (grossomodo dalla foce dell'Adige a quella dell'Isonzo) ed è amplificata dai bassi fondali (Polli, 1961).

L'innalzamento del livello marino e lo stress del vento lungo gli assi fluviali possono produrre una diminuzione della velocità di deflusso dei fiumi a mare. Questo fattore non è mai stato preso in considerazione nei modelli di trasporto.

Materiali e metodi

I dati utilizzati per questa analisi sono:

- satellitari: Radar Scatterometro (RS) dei venti e Radar Altimetro (RA);
- meteorologici: geopotenziale, pressione in quota ed a livello mare, vento;
- mareografici: delle stazioni mareografiche del litorale costiero Veneziano (Figura 1 – La stazione Piattaforma CNR-ISMAR si trova a 15 Km. dalla costa).

I dati sono di tipo “Near-Real Time” (NRT): vengono acquisiti con frequenza giornaliera e sono disponibili 24 ore dopo la loro acquisizione.



Figura 1 – Foci dei fiumi di competenza dell'Autorità di Bacino e stazioni mareografiche.

Misure radar scatterometro dei venti

Lo strumento non misura direttamente i campi di vento della superficie marina. Opera individuando i cambiamenti di riflessione radar della superficie del mare dovuti alla rugosità o scabrezza determinate dal vento. Le stime della velocità e della direzione del vento sulla superficie del mare vengono ottenute combinando misure di retrodiffusione acquisite da diverse geometrie di osservazione. Dai dati RS dei venti si ricavano le “mappe di stima dei vettori di vento della superficie del mare” al momento del passaggio del satellite.

Va osservato che le misure radar effettuate in prossimità delle zone costiere, possono essere poco accurate. Questo è dovuto alla complessa natura dell’eco di ritorno dalla superficie del mare a causa dell’irregolarità fra superficie del mare e terra lungo la traccia del satellite. Per migliorare la forma del segnale (eco) di ritorno vengono usate delle procedure di *post-processing* chiamate di *retraking*. Le mappe dei vettori di vento, riportate nel lavoro, sono state prodotte utilizzando dati dello scatterometro dei venti ASCAT del satellite MetOP, che è gestito da EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*).

La risoluzione dei campi di vento è di 25 Km. I dati ASCAT utilizzati nel lavoro sono corretti, lungo le zone costiere, della forma del segnale (eco) di ritorno.

La strategia di correzione utilizzata è basata sul metodo di filtraggio delle forme d’onda di Brown (Challenor e Srokosz, 1989). Tale metodo è stato oggetto di validazione e miglioramento nel progetto COASTALT finanziato dall’ESA (*European Space Agency*), Cipollini et. al. 2009.

L’accuratezza del metodo di correzione può essere desunto dall’esame delle correlazioni fra misure di velocità e direzione del vento rilevate da ASCAT e dagli anemometri delle stazioni mareografiche durante l’evento (Figura 2).

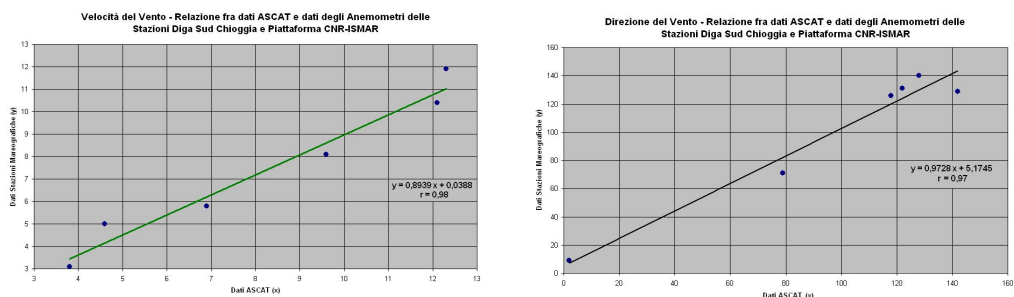


Figura 2 – Direzione e velocità del vento. Relazione fra dati ASCAT e dati degli anemometri delle stazioni mareografiche costiere durante l’evento.

Misure radar altimetro

Quelle prese in considerazione sono: l’Altezza della Superficie del Mare (ASM), le Anomalie in Altezza della Superficie del Mare (AASM) e la Topografia Dinamica Assoluta (TDA).

Le ASM sono misure di distanza della superficie del mare rispetto ad un ellissoide di riferimento. Vengono ottenute mediante differenza fra altitudine orbitale del satellite rispetto all’ellissoide di riferimento e *range* dell’altimetro (distanza fra altitudine orbitale e superficie del mare), corretto degli effetti strumentali.

Le AASM sono variazioni delle misure ASM rispetto alla Superficie Media del Mare (SMM) e corrette di alcuni effetti geofisici noti, come la circolazione oceanica e dei poli, l’inversione barometrica. Le misure AASM tengono conto della variabilità stagionale. Da questi dati si ricavano le Mappe AASM.

Le TDA sono misure di altezza della superficie del mare rispetto al geoide. Il modello di geoide usato è molto accurato ed è ottenuto con dati acquisiti per 4,5 anni dai satelliti della missione GRACE e dati acquisiti per molti anni dai satelliti con RA a bordo. Da questi dati si ricavano le

Mappe della TDA. La procedura usata per la produzione delle mappe è riportata in APPENDICE. Le misure AASM e TDA, usate in questo lavoro, sono misure RA prodotte con procedure NRT, per una rapida consegna all'utenza.

Dall'analisi di queste mappe, nel corso di una perturbazione, è possibile:

- localizzare le zone costiere di innalzamento del livello marino;
- localizzare le zone di spostamento e sollevamento delle masse d'acqua dovute a forzanti meteo.

Per ottenere stime quantitative (volume, altezza) della massa d'acqua spostata e sollevata è necessario utilizzare misure RA prodotte con procedure "Delayed Time" (RA-DT).

A differenza delle misure RA-NRT, quelle RA-DT utilizzano orbite precise, ma vengono fornite alcuni mesi dopo l'acquisizione.

Una descrizione più dettagliata di queste misure si può trovare nei manuali d'utenza dei vari satelliti e nei manuali dei prodotti multi-missione (AVISO, 2008, 2009)

Le misure ASM, AASM e TDA non sono direttamente confrontabili con quelle dei Livelli Medi Mareali (LMM) delle stazioni mareografiche costiere, se non mediante opportune correzioni e trasformazioni. In effetti, le misure LMM contengono contributi sia sulle variazioni reali del livello marino che su altri fattori, come i movimenti verticali della crosta terrestre (Woodworth et al., 1999, Fenoglio-Marc et al, 2004). A differenza delle misure RA quelle LMM non vengono corrette dalle anomalie gravimetriche, inversione barometrica, effetti delle correnti oceaniche, ecc. Inoltre le misure LMM, della Rete Telemareografica della Laguna di Venezia, fanno riferimento al piano fondamentale della Rete Altimetrica dello Stato del 1897, più basse di 23 cm. rispetto alla attuali.

Per ovviare alle limitazioni nelle misure RA lungo le zone costiere, dovute alla forma del segnale (eco) di ritorno (Fenoglio-Marc et al., 2007) nelle Mappe AASM e nelle Mappe della TDA prodotte e riportate nel lavoro, sono stati omessi dalle elaborazioni i dati RA-NRT relativi a tali zone.

Analisi dell'evento

Condizioni meteorologiche generali

Erano caratterizzate da una profonda depressione fra il Sud della Francia, Golfo di Biscaglia, Pirenei, allargatosi successivamente fra le Baleari e la Sardegna, (Figura 3), causando differenze di pressione fra il sud ed il nord Adriatico (in media 9 hPa nel corso della giornata del 31 ottobre, 8 hPa nel corso della giornata del 1 novembre, Figure 5 e 6).

Il fronte caldo, originato dai venti siroccali, è risalito lungo l'Adriatico e si è addossato al settore alpino (Figura 4). L'aria resa umida dal contatto con il Mediterraneo e sollevata da tali venti ha raggiunto le Prealpi ed è stata la causa delle forti piogge che hanno interessato vaste zone delle Prealpi e delle Alpi del Veneto.

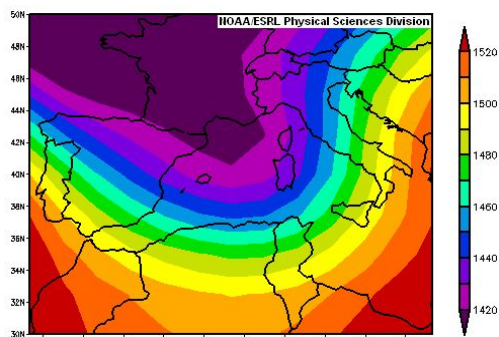


Figura 3 – Altezza del geopotenziale meteo (850 hPa) composto nel periodo 31 ott–2 nov 2010.

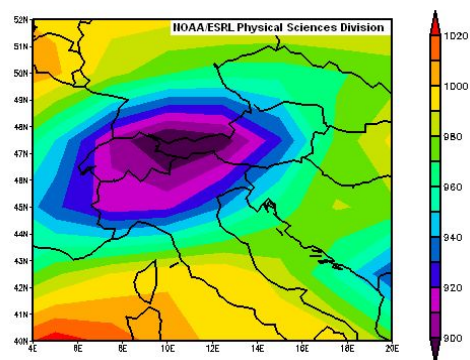


Figura 4 – Pressione in quota composta nel periodo 31 ott–2 nov 2010.

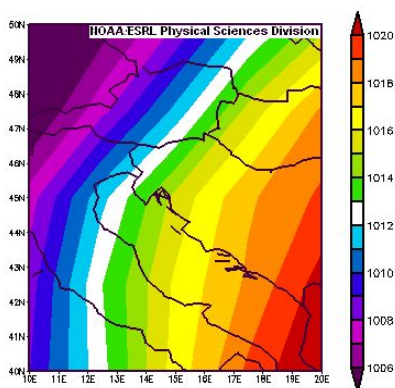


Figura 5 – Pressione a livello mare il 31 ottobre 2010.

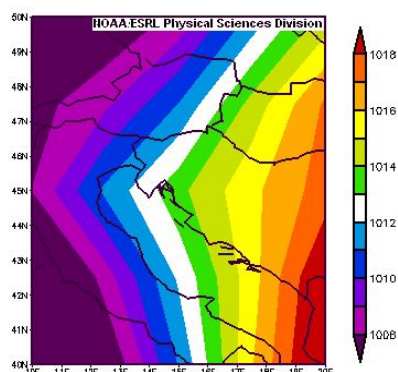


Figura 6 – Pressione a livello mare il 1 novembre 2010.

Venti siroccali

I campi di vento, rilevati da MetOp/ASCAT, evidenziano:

- Il 31 ottobre alle ore 20:17 UTC un intenso vento di Sirocco su tutto l'Adriatico, con velocità raggiungenti i 18 m/s lungo la costa Croata e 14 m/s lungo quella Italiana (Figura 7). Le velocità rilevate alle foci del Brenta-Bacchiglione e del Livenza erano, rispettivamente, di 13 m/s e di 15 m/s.
- Il 1 novembre alle ore 8:32 UTC un intenso vento di Sirocco su tutto l'Adriatico, con velocità raggiungenti i 18 m/s lungo la costa Croata dell'Adriatico centrale (Figura 8). Le velocità rilevate alle foci del Brenta-Bacchiglione e del Livenza erano, rispettivamente, di 7 m/s e di 13 m/s.
- Il 2 novembre alle ore 9:51 UTC un moderato vento di Sirocco sull'Adriatico, con velocità raggiungenti i 10 m/s lungo la costa Istriana e 5 m/s lungo quella Italiana (Figura 9). La velocità rilevata alla foce del Brenta-Bacchiglione era di 4 m/s, mentre alla foce del Livenza la direzione del vento era cambiata.

Va osservato che i dati ASCAT vengono acquisiti in circa 2 minuti per tracce del satellite MetOp longitudinali all'Adriatico e in circa mezzo minuto per tracce trasversali.

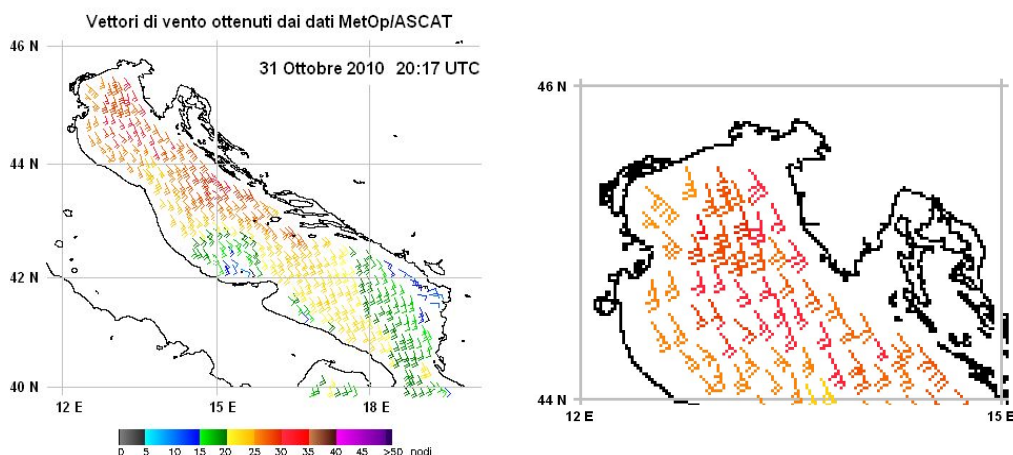


Figura 7 – Campi di vento rilevati da MetOP/ASCAT il 31 ottobre alle ore 20:17 UTC.

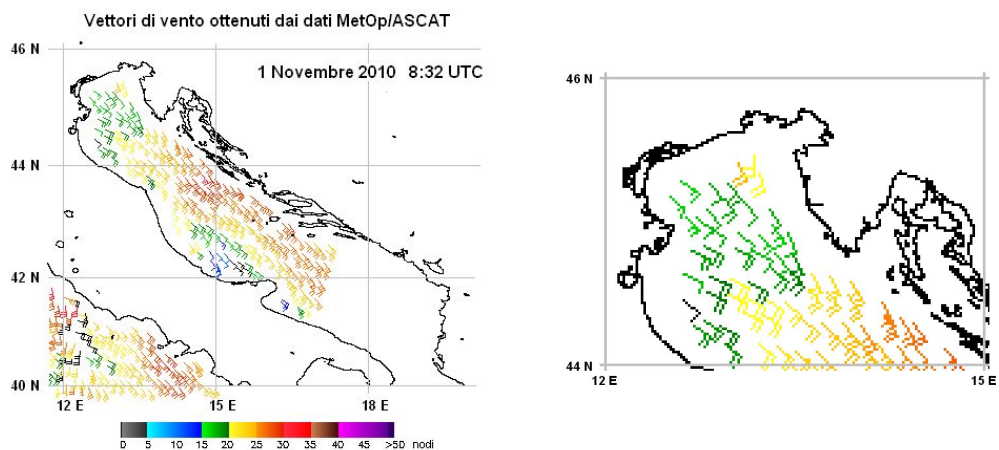


Figura 8 – Campi di vento rilevati da MetOP/ASCAT il 1 novembre alle ore 8:32 UTC.

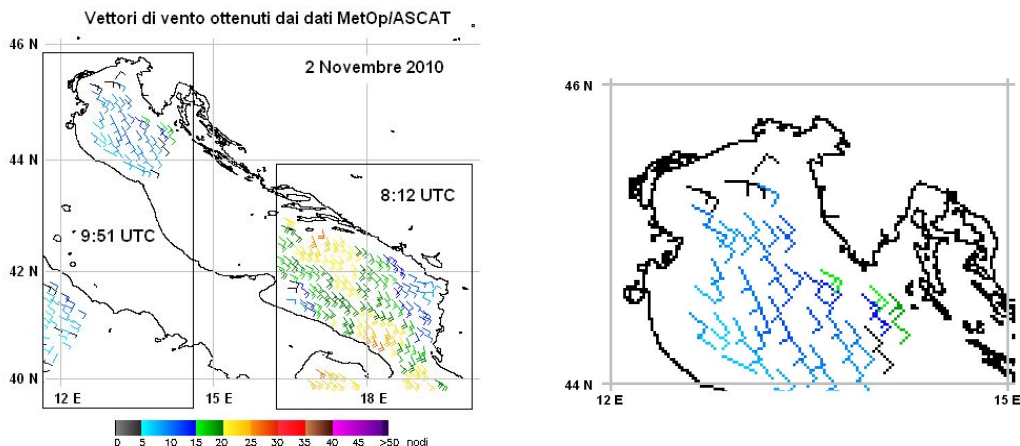


Figura 9 – Campi di vento rilevati da MetOP/ASCAT il 2 novembre alle ore 9:51 UTC.

Persistenza dei venti siroccali

L'azione continua e persistente dei venti di Sirocco (durata due giorni e mezzo) può essere desunta dall'esame delle misure degli anemometri delle stazioni mareografiche costiere riportate nella Tabella 1 e Figura 10.

Tabella 1 – Velocità minima e massima dei venti siroccali misurate dalle stazioni mareografiche.

Giorno	Ora		Stazione Diga Sud Chioggia		Stazione Piatt. CNR-ISMAR	
	Da	A	Min	Max	Min	Max
31 ottobre	3:00	24:00	6,8 m/s	11,7 m/s	9,1 m/s	14,4 m/s
1 novembre	1:00	13:00	4,5 m/s	10,7 m/s	6,5 m/s	12,5 m/s
	14:00	24:00	3,0 m/s	6,2 m/s	6,3 m/s	8,3 m/s
2 novembre	1:00	4:00	3,8 m/s	9,3 m/s	8,9 m/s	11,4 m/s
	7:00	13:00	3,0 m/s	3,7 m/s	4,2 m/s	9,9 m/s

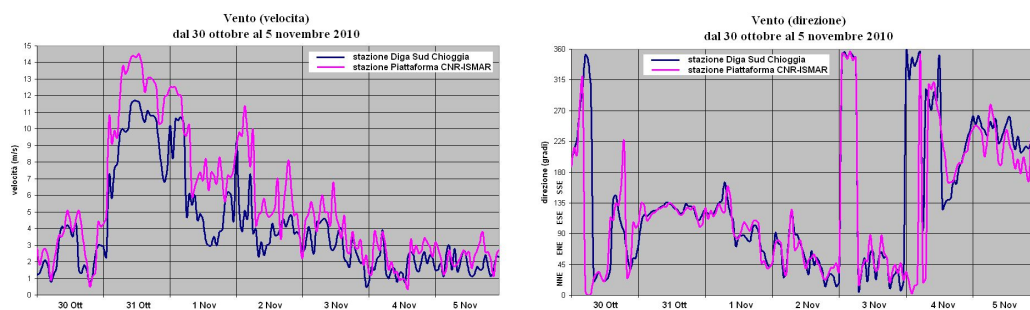


Figura 10 – Dati di vento registrati dagli anemometri delle stazioni Diga Sud Chioggia e Piattaforma CNR-ISMAR.

Innalzamento del Livello del Mare dovuto all'azione del vento

Dai dati LMM delle stazioni mareografiche (Diga Sud Chioggia, Piattaforma CNR-ISMAR e Diga Sud Lido) risulta che l'innalzamento medio del livello marino lungo il litorale costiero, fra il 30 ottobre ed il 1 novembre, è stato di circa 30 cm., passando da 40 cm. a 70 cm.

Il 2 novembre, con la riduzione degli effetti dei venti siroccali, inizia a ristabilirsi l'equilibrio del dislivello creato. Come è noto, per le caratteristiche del bacino dell'Adriatico, questo avviene mediante una successione di oscillazioni (oscillazioni libere) che gradualmente si smorzano.

Dal 2 novembre al 5 novembre il livello medio marino è passato da 70 cm. a 20 cm. (Figura 11).

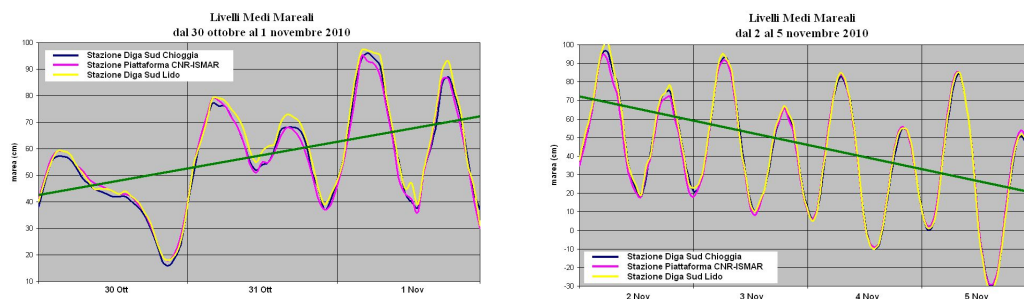


Figura 11 – Livelli Medi Mareali registrati dai mareografi delle stazioni: Diga Sud Chioggia, Piattaforma CNR-ISMAR e Diga Sud Lido.

Fenomeni Osservati dal 31 Ottobre al 2 Novembre

La giornata del **31 ottobre** era caratterizzata dai seguenti fenomeni:

- Forte vento di Sirocco, dalle ore 3 alle ore 24, con velocità da 6,8 a 14,4 m/s (Tabella 1).
- Un innalzamento del livello del mare lungo tutto il litorale costiero dell'Adriatico settentrionale, dovuto allo spostamento delle masse d'acqua prodotto dai venti siroccali.
- Uno spostamento e sollevamento di masse d'acqua di fronte alla costa occidentale dell'Istria, creando in tale zona un temporaneo dislivello.
- Un sollevamento del livello marino, in prossimità delle foci del Brenta-Bacchiglione e del Livenza, superiore a quello in prossimità della foce del Piave (cfr. Mappe AASM e della TDA della Figura 12).

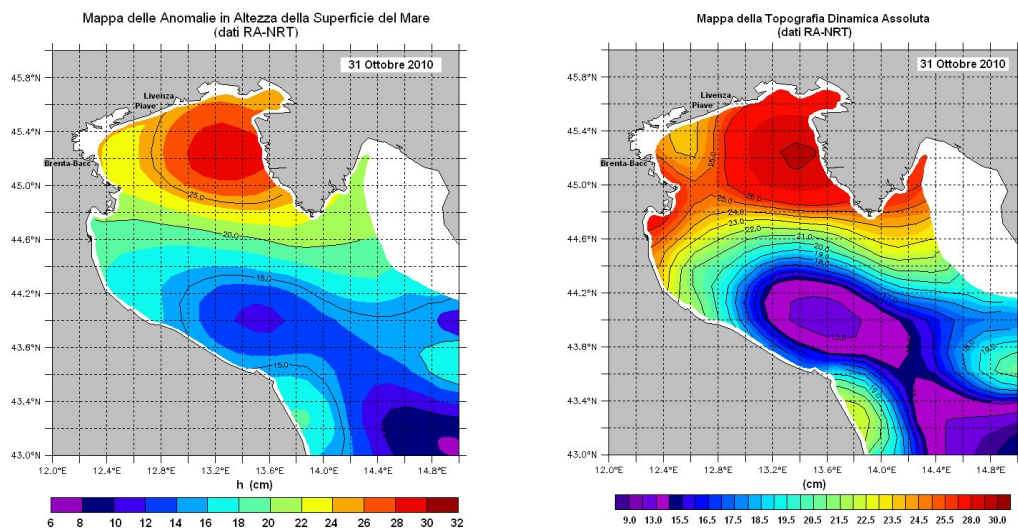


Figura 12 – Mappe AASM e della TDA ottenute da elaborazioni di dati RA-NRT del 31 ottobre 2010.

La giornata del **1 novembre** era caratterizzata da:

- Forte vento di Sirocco, dalle ore 1 alle 24, con velocità da 3 a 12,5 m/s (Tabella 1).
- Un ulteriore aumento del livello marino lungo il litorale costiero dell'Adriatico settentrionale e, in particolare, dalla foce del fiume Livenza a quella dell'Isonzo, dovuto all'azione continua e persistente dei venti siroccali (cfr. Mappe AASM e della TDA della Figura 13).

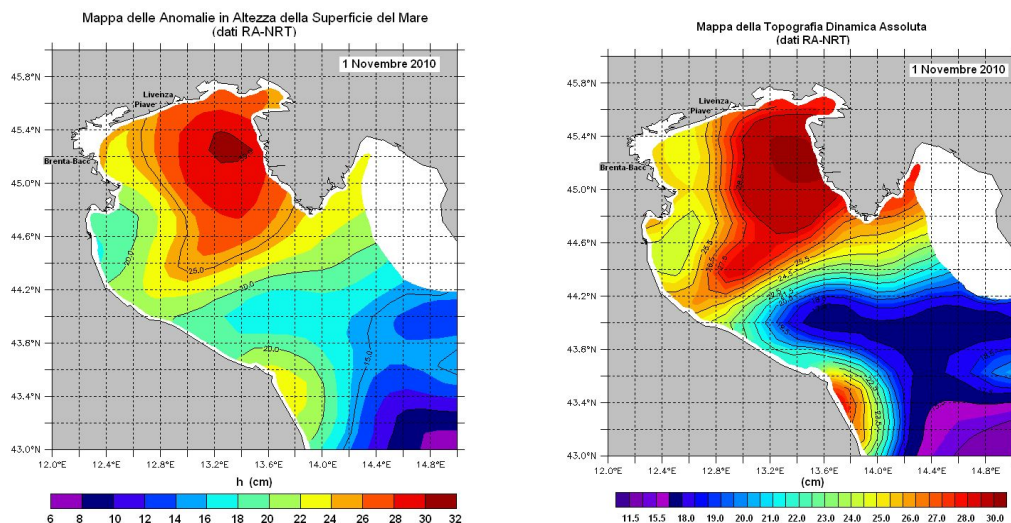


Figura 13 – Mappe AASM e della TDA ottenute da elaborazioni di dati RA-NRT del 1 novembre 2010.

La giornata del **2 novembre** era caratterizzata da:

- Vento di Sirocco, dalle ore 1 alle 4, dalle 7 alle 13, con progressiva riduzione della velocità nel corso della giornata (Tabella 1).
- Una lieve diminuzione dei dislivelli creati dai venti meridionali lungo la zona costiera del nord Adriatico.
- Permangono i maggiori dislivelli lungo la zona costiera fra la foce del Livenza e quella dell'Isonzo rispetto a quella fra la foce del Piave e quella del Brenta-Bacchiglione.
- Inizia la fase di ristabilimento dell'equilibrio marino (cfr. Mappe AASM e della TDA della Figura 14).

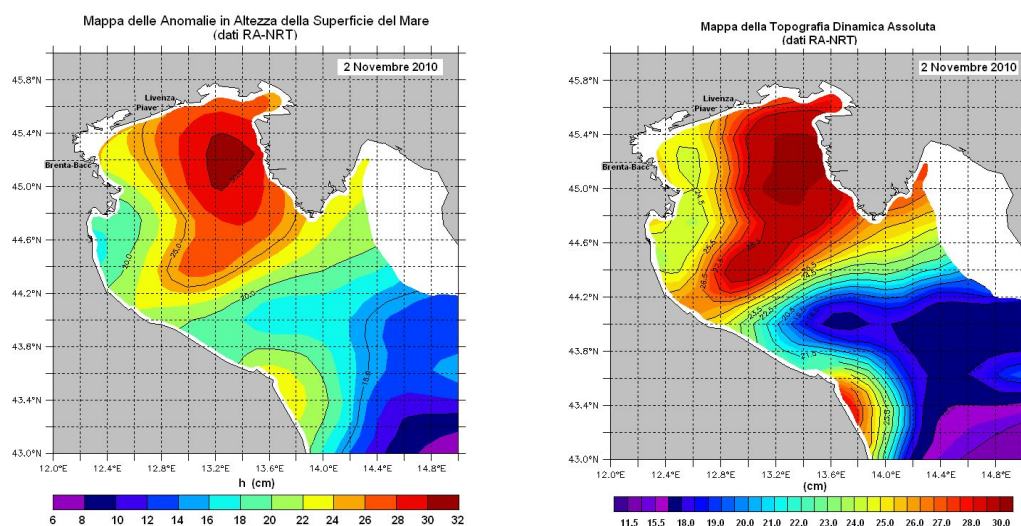


Figura 14 – Mappe AASM e della TDA ottenute da elaborazioni di dati RA-NRT del 2 novembre 2010.

Conclusioni

L'azione del vento di Sirocco alle foci del Brenta-Bacchiglione e Livenza è stata valutata mediante una serie di indicatori quali: l'orientamento degli assi fluviali, la persistenza dell'azione del vento, la velocità del vento e l'innalzamento del livello marino.

Dall'analisi dei dati satellitari e mareografici disponibili, acquisiti con procedure NRT, si può affermare quanto segue:

- L'azione del vento di Sirocco continua e persistente (durata due giorni e mezzo), la velocità del vento (da 3 m/s a 15 m/s) e l'innalzamento (di circa 30 cm) del livello marino alle foci dei fiumi Brenta-Bacchiglione e Livenza, possono aver contribuito ad un rallentamento del loro deflusso a mare.
- La maggiore velocità del vento rilevate da MetOp/ASCAT alla foce del Livenza rispetto a quella del Brenta-Bacchiglione il 31 ottobre ed il 1 novembre, il maggior innalzamento del livello marino rilevato dai RA lungo il litorale costiero fra le foci del Livenza e dell'Isonzo, rispetto a quello fra le foci del Piave e Brenta-Bacchiglione nei giorni 1 e 2 novembre, sono fattori che possono indicare una maggior diminuzione della velocità di deflusso a mare del Livenza rispetto a quello del Brenta-Bacchiglione.

Ringraziamenti

I dati delle stazioni mareografiche usati nel lavoro sono distribuiti dal Centro Previsioni e Segnalazioni Maree del Comune di Venezia.

Le immagini del geopotenziale, della pressione in quota ed a livello mare sono prodotte dalla NOAA/ESRL (*National Oceanic & Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory*).

I dati MetOp/ASCAT, usati per la produzione delle mappe dei vettori di vento, sono distribuiti dalla NOAA/NESDIS (*National Oceanic & Atmospheric Administration/National Environmental Satellite, Data, and Information Service*).

I dati RA-NRT, usati per la produzione delle mappe AASM e della TDA, sono distribuiti da AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*).

Bibliografia

ARPAV (2010), Comunicato ARPAV “Evento alluvionale ottobre – novembre 2010 in Veneto”.

<http://www.arpa.veneto.it>

AVISO (2009), “SSALTO/DUACS User Handbook: (M)SLA and (M)ADT Near-Real Time and Delayed Time Products”, Issue 1, Rev. 10.

AVISO (2008), “DT CorSSH and DT SLA Product Handbook”, Issue 1 Rev. 4.

Challenor P.G., Srokosz M.A. (1989), “The extraction of geophysical parameters from radar altimeter return from a nonlinear ocean surface”, *Mathematics in Remote Sensing*, Clarendon Press.

Cipollini P., Gommenginger C., Coelho H., Fernandes J., Gomez-Enri J., Martin-Puig C., Vignudelli S., Woodworth P., Dinardo S., Benveniste J. (2009), "Progress in Coastal Altimetry: the experience of the COASTALT Project", EGU 2009, Vienna, Austria.

Fenoglio-Marc L., Groten E. and Dietz C., (2004), “Vertical Land Motion in the Mediterranean Sea from altimetry and tide gauge stations”, *Marine Geodesy*, 27 (3-4): 683-701.

Fenoglio-Marc L., Vignudelli S., Humbert A., Cipollini P., Fehrlau M., Becker M. (2007), “An assessment of satellite altimetry in proximity of the mediterranean coastline”, *Proc. Envisat Symposium 2007*, Montreux, Switzerland (ESA SP-636, July 2007).

Polli S. (1961), “Sul fenomeno dell'acqua alta nell'Adriatico Settentrionale”, *Rapp. prelim. della commissione di studio per la conservazione della laguna di Venezia*, Vol. 1, Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti.

Woodworth P.L., Tsimplis M.N., Flather R.A., Shennan I. (1999), “A review of the trends observed in the British Isles mean sea level data measured by tide-gauges”, *Geophysical Journal International*, 136: 651-670.

APPENDICE

Procedura utilizzata per la produzione delle mappe AASM e della TDA

Fasi della procedura:

- Fase 1** - Eliminazione, dalle elaborazioni, dei punti della traccia fino a 25 Km dalla costa (Fenoglio-Marc et al., 2007).
- Fase 2** - Suddivisione dell'area di studio (Adriatico settentrionale) mediante una griglia con celle di 1/8 di grado per 1/8 di grado.
- Fase 3** - Assegnazione di pesi diversi ai dati della traccia acquisiti in tempi diversi: giorno t (= 1), giorno t-1 (da 0,9 a 0,4), giorno t-2 (da 0,3 a 0,1).
- Fase 4** - Stima del valore centrale "AASM" o "TDA" della generica cella in funzione della distanza (inferiore ad una distanza massima) fra l'i-mo punto della traccia ed il punto centrale della cella:

$$Z_k = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i / D_{i,k}}{\sum_{i=1}^n 1 / D_{i,k}} \quad \text{per } D_{i,k} \leq D_{\max,k} \quad [1]$$

$$D_{i,k} = [(X_k - X_i)^2 + (Y_k - Y_i)^2]^{1/2} \quad [2]$$

dove:

- Z_k Valore centrale stimato ("AASM" o "TDA") della k-ma cella della griglia.
 Z_i Valore osservato ("AASM" o "TDA") dell'i-mo punto della traccia.
 $D_{i,k}$ Distanza fra l'i-mo punto della traccia ed il valore centrale della k-ma cella della griglia.
 $D_{\max,k}$ Distanza massima di $D_{i,k}$.
 X, Y Coordinate.

- Fase 5** - Interpolazione dei dati di stima dei centri delle celle della griglia con una superficie polinomiale di ordine "L". La bontà dell'adattamento viene valutato mediante analisi della varianza. "L" deve risultare statisticamente significativo e non devono esserci differenze significative fra "L" ed "L+1".
- Fase 6** - Se l'andamento nel tempo dei dati AASM o della TDA, in prossimità delle zone costiere, non corrisponde all'andamento dei dati LMM delle stazioni mareografiche costiere vengono modificati i pesi e la distanza massima.

Si osserva che vi sono delle differenze fra questa procedura e quelle generalmente usate per la produzione delle mappe AASM o della TDA. In effetti, in queste procedure:

- Vengono considerate tutte le tracce utili fino a 7 giorni antecedenti. Ai dati delle tracce di giorni diversi vengono assegnati gli stessi pesi.
- Il valore centrale di stima della k-ma cella non viene pesato con una distanza di tipo $D_{i,k}$.
- L'interpolazione dei dati di stima dei centri delle celle della griglia viene effettuata con una interpolazione spaziale ottimale, non necessariamente valutata statisticamente.
- Non vi sono valutazioni sui risultati finali ottenuti.

Esperienze di utilizzo di Reti di SP GNSS per il monitoraggio

Riccardo Barzaghi, Letizia Cannizzaro, Carlo De Gaetani, Livio Pinto

Politecnico di Milano, DIIAR, sez. Rilevamento, P.zza L. da Vinci 32, 20133 Milano

Scopo principale della ricerca condotta con la collaborazione di Leica Geosystems è stato analizzare la possibilità di utilizzare una infrastruttura di rete per il calcolo della posizione di ricevitori posti su strutture da monitorare. Si parte dal presupposto che i movimenti non siano repentini e quindi che non sia necessario un posizionamento in tempo reale: l'infrastruttura di rete dovrà fornire i dati di una stazione master virtuale posta nelle immediate vicinanze del punto da monitorare da utilizzare per il calcolo, in post-processing, delle basi. In pratica un utilizzo della rete per la generazione di file Rinex virtuali.

Sono stati realizzati un numero considerevole di test dei quali qui si riportano solo i più significativi. Gli esperimenti sono stati realizzati con 30 gg di dati, suddivisi in file giornalieri, sia per la rete GPSLombardia, sia per la rete ItalPOS gestita da Leica su tutto il territorio nazionale (figura 1).



Figura 1 – Disposizione delle SP delle reti ItalPOS (sx) e GPSLombardia (dx).

In un primo test si è partiti dalla considerazione che i file Rinex virtuali possono essere generati in un qualunque punto della rete; ciò quindi non esclude che possa essere generato nei pressi del punto da monitorare, creando quindi una base di corta lunghezza. Come vertice da monitorare è stato scelto, un punto nel centro di Milano (coincidente con la SP gestita dalla Provincia di Milano in Corso di Porta Vittoria). I posizionamenti giornalieri sono stati calcolati con software commerciale LGO. I residui calcolati rispetto al valor medio, nell'ipotesi che il punto sia stabile, danno una indicazione della qualità del posizionamento utilizzando master virtuali. L' σ_{sqm} dei residui nelle tre coordinate vale rispettivamente 0.7, 0.8 e 4.3 mm mentre i valori massimi, in modulo, si attestano a 1.8, 1.9 e 10.1 mm. Il punto scelto è molto vicino (circa 3 km) ad una SP della rete GPSLombardia (quella sita sul tetto del Politecnico di Milano), per cui i risultati possono essere positivamente influenzati dalla generazione dei file Rinex nei pressi di un vertice di rete. Si è quindi realizzato un secondo test ponendo il vertice da monitorare (e quindi la VRS) circa nel baricentro di una maglia

di rete. Il test è stato condotto sia per la rete GPSLombardia e come punto da monitorare è stata presa la SP posta a Lodi sull'edificio che ospita gli uffici Leica Geosystems, sia per la rete ItalPOS e come punto da monitorare è stata presa la SP di Milano (MILA) monumentata sul tetto del Politecnico.

Visti i risultati ottenuti nell'esperimento precedente ci si aspettava, e si sono ottenuti, risultati più dispersi. Di essi non si dà conto in questa sede.

Come ultimo test ci si è chiesti che cosa sarebbe cambiato se, al posto di utilizzare una VRS, nelle condizioni di poter utilizzare una SP posta nelle vicinanze (nella logica di una rete di SP, quindi con distanze da 10 a 30 km), per differenziare le osservazioni dell'antenna posta sul punto da monitorare si fosse utilizzata una installazione fissa. A tale scopo sono stati messi in relazione i dati della durata di circa un mese, suddivisi in sessioni giornaliere, ed è stato realizzato un posizionamento differenziale rispetto a 3 stazioni: una VRS nei pressi del punto da monitorare e due SP a distanza di circa 18 e 30 km. Per tale esperimento come stazione da monitorare è stata presa la SP ItalPOS posta a Lodi e una VRS generata nelle sue immediate vicinanze con il servizio GPSLombardia. Come nel caso precedente ci si è posti in una situazione sfavorevole per quanto concerne la posizione della VRS: infatti essa è in un luogo circa baricentrico di una maglia di rete GPSLombardia, rete con la quale sono stati generati i file rinex virtuali. Come SP fisse sono state prese Crema (a 18 km) e Milano (a circa 30 km). Il valore degli sqm dei residui è riportato nella tabella 1. In essa è evidente il guadagno che la VRS può mettere a disposizione degli utenti. In particolare gli sqm dei residui planimetrici sono inferiori al mm e quelli altimetrici si attestano a circa 8 mm, mentre i corrispettivi da SP sono in entrambe i casi maggiori.

	Sqm dei residui [mm]		
	Nord	Est	H
VRS	0.6	0.8	7.8
SP 18 km	1.8	1.8	6.1
SP 30 km	3.5	2.4	11.1

Tabella 1 – Sqm dei residui di posizionamento con VRS rispetto a SP.

I servizi di rete di SP sono sempre più utilizzati dagli utenti che svolgono posizionamento di tipo topografico. In tale ambito la generazione di file rinex virtuali è recentemente diventata uno standard di servizio che i gestori stanno fornendo ai propri utenti. A tal fine è necessario che i dati siano di alta qualità, in particolare che i dati siano completi, facilmente reperibili e che la rete dai quali vengono generati sia inquadrata in un sistema di riferimento stabile. Questo prodotto può essere utilizzato per la differenziazione di dati finalizzata al posizionamento, senza dover ricorrere a stazioni master fisiche. Un utilizzo che richiede alte prestazioni di servizio è il posizionamento ai fini del monitoraggio, quando occorre che i dati abbiano una accuratezza massima, ad esempio millimetrica. In tale contesto sono stati realizzati svariati test, con due differenti reti di SP, dei quali si è dato conto nel lavoro e che hanno portato a concludere che è possibile utilizzare servizi di rete per il monitoraggio di strutture in un contesto di rete e con dati provenienti da VRS.

Riconoscimenti e ringraziamenti

E' doveroso ringraziare per la collaborazione prestata nella ricerca e per aver messo a disposizione strumentazione e i servizi di rete ItalPOS la Leica Geosystems. Si ringrazia altresì il personale di GPSLombardia sempre disponibile nel fornire dati e informazioni sulla propria rete.

Il programma COSMO-SkyMed: missione, sistema e principali risultati

Maria Libera Battagliere (*), Alessandro Coletta (**), Fabio Covello (***)

(*) Agenzia Spaziale Italiana (ASI), Viale di Villa Grazioli 23, 00198, Roma, Italia
06 8567449, assegnisat2.sky@est.asi.it

(**) Agenzia Spaziale Italiana (ASI), Viale di Villa Grazioli 23, 00198 Roma, Italia
06 8567864, alessandro.coletta@asi.it

(***) Agenzia Spaziale Italiana (ASI), Viale di Villa Grazioli 23, 00198 Roma, Italia
06 8567397, fabio.covello@asi.it

Abstract

COSMO-SkyMed (*Constellation of Small Satellites for Mediterranean basin Observation*) è il primo Sistema Spaziale di Osservazione della Terra a natura Duale (operante sia nel Dominio Civile sia nel Dominio Difesa) sviluppato per fornire dati prodotti e servizi su scala globale, a scopo scientifico e commerciale, per il monitoraggio ambientale, la sorveglianza spaziale, la prevenzione e gestione delle emergenze, la difesa e la sicurezza nazionali.

Il Sistema, concepito dall'Agenzia Spaziale Italiana e dal Ministero della Difesa, è stato interamente realizzato dall'industria italiana, con primo contraente l'azienda Thales Alenia Space Italia e con il coinvolgimento di un gran numero di Piccole e Medie Imprese italiane.

Il sistema COSMO-SkyMed è costituito da una costellazione di 4 satelliti equipaggiati con sensori SAR (radar ad apertura sintetica) ad alta risoluzione operanti in banda X e dotati di un sistema di acquisizione e trasmissione dati flessibile ed innovativo. Concepito come un sistema multi-missione in grado di integrarsi con altri sistemi spaziali per soddisfare le richieste di una vasta comunità di utenti, COSMO-SkyMed consente la copertura globale del pianeta operando in qualsiasi condizione meteorologica e di illuminazione, con tempi di rivisitazione sulla stessa area geografica entro le 12 ore.

Il Centro di Controllo della costellazione si trova presso il Centro Spaziale del Fucino (L'Aquila), mentre il Centro Spaziale di Matera è responsabile dell'acquisizione, dell'archiviazione, del processamento e della distribuzione dei dati rilevati dai satelliti, per applicazioni civili.

Il sistema è in grado di fornire un grande numero di immagini con elevata risoluzione: la costellazione completamente dispiegata può acquisire fino a 1800 immagini al giorno, mentre il segmento di terra è in grado di archiviare 560 immagini al giorno e di processare fino a 200 prodotti civili.

L'ASI gestisce e coordina gli utenti scientifici e istituzionali, mentre la distribuzione commerciale è affidata alla società e-GEOS, partecipata da ASI e da Telespazio S.p.a.

Il sistema prevede tre modalità operative: *Routine*, *Crisis* e *Very Urgent*, che consentono di gestire e soddisfare differenti necessità in termini di programmazione. La modalità *Routine* prevede una pianificazione della missione una volta al giorno; il piano potrà essere soddisfatto entro 72 ore. La modalità *Crisis* prevede la pianificazione della missione due volte al giorno e il piano potrà essere soddisfatto entro 72 ore. La modalità *Very Urgent* consente una richiesta di acquisirne con il minimo tempo di latenza e prevede che il piano sia soddisfatto entro le 18 ore.

Il sensore radar può acquisire immagini della Terra in modalità ScanSAR, che garantisce la copertura di grandi aree (100 km x 100km ScanSAR Wide e 200 km x 200 km per ScanSAR Huge) con una risoluzione spaziale media, corrispondente a 30 m per la modalità ScanSAR Wide e 100 m per la modalità ScanSAR Huge; in modalità StripMap, che garantisce la copertura di un'area di 40

km x 40 km con una risoluzione spaziale di 3 m; in modalità Spotlight per la copertura di un'area di 10 km x 10 km con risoluzione metrica per applicazioni civili. La modalità StripMap prevede anche la doppia polarizzazione, prodotto PING PONG corrispondente a una scena di 30 km x 30 km con una risoluzione di 15 m. Ogni satellite è in grado di acquisire quotidianamente fino a 75 immagini SPOTLIGHT e fino a 375 immagini StripMap o 150 immagini ScanSAR. La modalità di acquisizione nominale è quella Right Looking, ma è anche possibile fare acquisizioni in Left Looking mediante una manovra d'assetto. Gli angoli di incidenza variano tra 25° e 50° nominali, con la possibilità di essere estesi nell'intervallo 20°-59°.

Il primo satellite della costellazione è stato lanciato nel 2007 dalla base di lancio di Vandenberg in California. Dopo tre anni, la costellazione è stata completata con l'arrivo del quarto satellite nella sua posizione orbitale finale: COSMO 4 è stato infatti lanciato il 5 novembre 2010 dalla stessa base in California. Attualmente la costellazione è completa e pienamente operativa: il secondo e terzo satellite sono collocati in configurazione interferometria (a 1 giorno l'uno dall'altro), mentre il primo e quarto satellite della costellazione sono sfasati di 90° l'uno dall'altro sullo stesso piano orbitale. Altre configurazioni sono possibili per sfruttare le capacità interferometriche della costellazione.

Fin dall'inizio della sua fase operativa, COSMO-SkyMed è stato impiegato con successo nella gestione di emergenze e disastri ambientali sia nazionali (sisma dell'Abruzzo, Aprile 2009; esondazione del Tanaro in Piemonte, Aprile 2009) sia internazionali (sisma di Sichuan, Cina 2008; sisma di Haiti, Gennaio 2010; terremoto del Cile, Febbraio 2010; versamento di petrolio nel Golfo del Messico, Aprile 2010, terremoto in Giappone, Marzo 2011).

Inizialmente la modalità di ripresa è stata prevalentemente "on-demand", sulla base di richieste specifiche dell'utenza e di accordi opportunamente siglati: questo ha determinato un iniziale sottoutilizzo delle capacità del sistema, limitando, di fatto, anche la costruzione di un archivio. Caratteristica operativa del sistema è l'implementazione di una Background Mission di ampio respiro con l'obiettivo di generare un archivio con buona copertura spaziale e temporale attraverso l'osservazione sistematica e regolare delle aree di interesse, selezionate sulla base dei seguenti criteri: densità abitativa, rilevanza economica e strategica, presenza di fenomeni rilevanti di deformazione del terreno. Sulla base dei criteri sopra menzionati sono state identificate le seguenti aree di acquisizione: capitali di tutti gli stati del mondo, città con popolazione superiore a 200.000 abitanti nei Paesi con maggiore rilevanza economica, siti di estrazione mineraria, siti urbani di interesse culturale patrimonio dell'UNESCO, infrastrutture strategiche, principali vulcani attivi nel mondo e aree soggette a fenomeni di subsidenza.

Controllo qualità dei dati e interoperabilità in aggiornamento

Alberto Belussi (*), Mauro Negri(**)

(*) Università di Verona, Dipartimento di Informatica, Verona, Italy, alberto.belussi@univr.it

(**) Politecnico di Milano, Dipartimento DEI, Piazza L. Da Vinci 32, 20132 Milano, Italy, negri@elet.polimi.it

Riassunto

L'interoperabilità dei dati in una SDI di database topografici nei quali si scambiano dati o gli aggiornamenti degli stessi impone di avere una architettura che garantisca l'interscambio dei dati tra un insieme ampio ed eterogeneo di soggetti. Questo lavoro definisce le caratteristiche minime che i soggetti locali della SDI devono rispettare per garantire l'interoperabilità garantendo la massima indipendenza dalle tecnologie utilizzate a livello locale.

Abstract

This papers deals with interoperability of data in an integrated SDI in which several actors provide data and their updates for a portion of the whole territory and the SDI must guarantee their integration and harmonization. In particular, several crucial aspects for the realization of a real interoperability of data and of the updates are listed and analyzed.

Introduzione

Il lavoro svolto dall'IntesaGIS prima e dal comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle PA poi, ha permesso la definizione del contenuto del database topografico (DBT) da realizzare a livello regionale e nazionale (National Core). Diversi progetti regionali, alcuni dei quali supportati dal CISIS stanno sperimentando la produzione del DBT o lo hanno parzialmente già realizzato. La realizzazione dei DBT costituisce solo il primo passo per la costruzione di una SDI nazionale che coinvolge diversi attori dal livello locale a quello nazionale; i DBT locali dei comuni o dei centri servizi gestiscono i dati e forniscono le sintesi necessarie a livello regionale e nazionale. Per ottenere questo risultato è necessario che il sistema complessivo garantisca l'interoperabilità dei dati tra i diversi soggetti coinvolti e l'aggiornamento dei dati per garantire il mantenimento del sistema; l'aggiornamento dovrebbe essere eseguito da coloro che sono responsabili del dato e propagato poi agli altri soggetti, può essere periodico e interessare larghe porzioni di territorio o essere frequente ed essere apportato non appena si verifica e richiede l'integrazione e l'armonizzazione dei dati tra soggetti confinanti. L'interscambio ad esempio tra comuni e regione è complesso poiché deve garantire la massima indipendenza dei singoli attori nella scelta delle proprie tecnologie e d'altra parte deve permettere di integrare e armonizzare i dati locali per la coerenza del DBT regionale o nazionale garantendo una gestione centralizzata dei grandi oggetti condivisi. In questo contesto diventa fondamentale avere un modo unico e condiviso per il trasferimento e l'interpretazione dei dati oggetto di interscambio. Normalmente si confonde spesso l'interoperabilità con la definizione del solo formato fisico di interscambio, ma sebbene importante è solo la definizione di un aspetto sintattico dell'interoperabilità; infatti non appena definito il formato diventa fondamentale la capacità di associare la stessa semantica ai dati condivisi da parte dei vari soggetti. Per questo motivo prendendo spunto anche dalle esperienze nella produzione di DBT, in particolare di quello della Regione Lombardia, si identificheranno le caratteristiche che definiscono l'interoperabilità dei dati utilizzando come criterio di riferimento quello di definire tali caratteristiche in modo che siano indipendenti da una specifica tecnologia (GIS, DBMS,...). Si tenga presente che tali caratteristiche saranno da verificare e arricchite nel processo di realizzazione delle SDI e che la loro definizione è

presupposto per la definizione dei controlli che ne garantiscano la qualità attraverso procedure anch'esse indipendenti dalla specifica tecnologia. Nel seguito si descrivono tali caratteristiche definendo lo stato dell'arte e future possibili evoluzioni.

Modello dei dati condiviso

I dati di una SDI, indipendentemente dalla materializzazione o meno dei dati complessivi, sono memorizzati in sistemi diversi, con rappresentazioni differenti e trasferiti con formati talvolta non necessariamente identici. Diventa pertanto importante definire un modello dei dati (concettuale) in grado di descrivere le proprietà rilevanti dei dati astraendo dai dettagli tecnici specifici delle diverse tecnologie coinvolte. Il modello deve prevedere la definizione delle caratteristiche formali dei dati e quindi controllabili e di quelle informali e quindi non verificabili automaticamente ma comunque utili per la comprensione dei dati. Il modello definisce il concetto di classe, attributi descrittivi, identificatori, componenti spaziali e loro attributi e il testo informale può descrivere come identificare un oggetto della classe (ad esempio, come un'area stradale si spezza in un incrocio). A livello internazionale è stato adottato l'UML come modello standard per questo fine dall'OGC e dall'ISO TC211 ed è stato utilizzato da INSPIRE per la definizione dei propri schemi condivisi e pertanto può essere considerato il modello di riferimento.

Modello della geometria

L'OGC e l'ISO TC211 si sono concentrati sulla standardizzazione di un modello geometrico da utilizzare per le componenti spaziali dei dati (inesistente nell'UML) che fosse indipendente dalla specifica realizzazione tecnologica. E' stato definito lo standard 19107 (iso19107) che descrive i modelli geometrici e topologici in un'ottica "full 3D" che è da considerare il riferimento generale. Inoltre è stato definito un profilo del modello generale allo scopo di definire un modello a cui ogni tecnologia si debba conformare chiamato Simple Feature Model (SFM)(iso19125). Questo modello definisce una gerarchia di tipi geometrici (punti, curve, superfici e collezioni di questi tipi elementari) descrivendone le caratteristiche nello spazio euclideo (ad es., che una superficie semplice è una porzione di piano fortemente connessa e confinata da una curva semplice e chiusa). Definisce inoltre le operazioni disponibili sui diversi tipi tra le quali le relazioni topologiche applicabili (ad es., disjoint, touch,...).

SFM è un modello 2D, sebbene si stia lavorando ad una sua estensione parziale verso il 3D, e questo ne limita le potenzialità descrittive. A livello italiano è stata proposta una variante del SFM incorporata nel modello GeoUML (Belussi, 2010) proposto da SpatialDBgroup del Politecnico di Milano e adottata dal comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle PA per i DBT. Il geoUML si basa sull'UML e adotta il modello SFM della geometria estendendolo ai punti e curve 3D e alle superfici B3D ossia superfici che hanno la frontiera definita in 3D e la superficie (usata per le relazioni topologiche) ottenuta dalla proiezione della frontiera nel piano 2D.

I vincoli spaziali e metrici

Le componenti spaziali dei dati di uno stesso territorio interagiscono tra di loro spazialmente in base a vincoli più o meno forti (ad es., un marciapiede può essere al più adiacente all'impronta al suolo di un edificio). L'OGC e l'ISO TC 211 hanno riconosciuto la necessità di descrivere tali vincoli come parte aggiuntiva alla descrizione concettuale, ma si sono limitati ad indicare il linguaggio Object Constraint Language (OCL) dell'UML come lo strumento formale per la definizione dei vincoli. Non sono classificati i tipi di vincoli possibili e non viene specificato come usare il linguaggio. Lo stesso approccio è stato adottato anche da INSPIRE. L'OCL è un linguaggio formale di tipo generale e non orientato alla geometria che descrive un vincolo attraverso un'espressione logica. Il linguaggio è tuttavia difficile da scrivere e da leggere e ciò costituisce un grande ostacolo al suo uso da parte di personale non esperto; inoltre la sua generalità permette di descrivere uno stesso vincolo attraverso diverse formulazioni logiche creando un ostacolo alla comprensione e condivisione dei vincoli da parte di utenti diversi. Si aggiunga a questo l'inesistenza di traduttori delle formule OCL in programmi di controllo dei vincoli che rende la

gestione dei vincoli sui dati di fatto impossibile e rendendo i vincoli stessi puro testo descrittivo di scarso effetto pratico. Nell'ambito del progetto del DBT della Regione Lombardia si è invece dimostrato di cruciale importanza avere la possibilità di controllare tali vincoli. Un esempio di possibile evoluzione è dato dal GeoUML (Belussi, 2010) che preclassifica un insieme standard di vincoli spaziali basati sulle relazioni topologiche, la cui semantica è definita formalmente in OCL per conformità all'approccio ISO. La condivisione di un insieme di vincoli ha facilitato la definizione e la leggibilità dei vincoli e inoltre ciò ha permesso la predisposizione del GeoUML validator, ossia di uno strumento automatico per la verifica di tutti i vincoli definiti sui dati, ma in particolare di quelli spaziali. Infine la standardizzazione dei vincoli ha agevolato anche il riconoscimento, e quindi la correzione, degli errori rilevati dal GeoUMLvalidator.

In Figura 1 si mostrano la definizione informale INSPIRE di un vincolo spaziale sulla rete di trasporto, la descrizione in GeoUML e la formulazione in OCL.

Vincolo INSPIRE

In a Transport Networks data set which contains nodes, these nodes shall only be present where Transport Links connect or end

Vincolo GeoUML

TransportNode.Geometry (TC) exists (InNetwork = TransportNode.InNetwork) TransportLink.CenterlineGeometry

Possibile espressione OCL

context TransportNode

inv:TransportLink.allInstances ->

```
exists(a: TransportLink |
  self.InNetwork = a.InNetwork and
  self.Geometry.check(TC,
    a.CenterlineGeometry))
```

Figura 1 – La formulazione di un vincolo spaziale.

Modelli implementativi

Le precedenti caratteristiche hanno permesso la condivisione delle caratteristiche concettuali dei dati tra utenti indipendentemente dalle tecnologie adottate. Lo schema concettuale che raccoglie dati e vincoli deve poi essere tradotto su uno specifico formato di interscambio. I formati che possono essere considerati per il trasferimento dei dati sono il gml e lo shape file dove il primo è utilizzato in INSPIRE mentre il secondo può essere considerato il formato di riferimento in attesa che il gml si consolidi. Definito il formato è pertanto necessario definire un insieme di regole generali (chiamate modello implementativo) per la traduzione degli elementi concettuali nelle strutture dati dello specifico formato di interscambio (ad es., modello implementativo per shape), evitando regole ad hoc per ogni specifico schema concettuale. Avere regole generali e quindi condivise semplifica l'interpretazione dei contenuti dei file e inoltre il disaccoppiamento concettuale/fisico permette di unificare in un solo schema gli aspetti concettuali e di avere diverse rappresentazioni fisiche dello stesso schema in funzione delle tecnologie adottate.

Questo approccio permette di:

- stabilire un preciso e semplice collegamento tra concetti e loro realizzazione fisica;
- mantenere un legame tra diverse realizzazioni fisiche della stessa struttura concettuale dei dati, favorendo anche la realizzazione di convertitori di formato ad esempio utili per convertire il contenuto del proprio database nel formato di trasferimento;
- realizzare strumenti automatici di controllo "platform independent" in grado di riconoscere le strutture fisiche dei dati, di verificare sui dati i vincoli spaziali e infine di restituire una diagnostica espressa in termini concettuali e fisici.

Il modello implementativo traduce i concetti in strutture dati fisiche, ma non traduce i vincoli che rimangono descritti nella struttura concettuale, tuttavia il modello implementativo e la conoscenza

dello schema concettuale e delle strutture fisiche permette di realizzare procedure di controllo automatiche e non ad hoc (come ad esempio il GeoUML validator).

Si noti che INSPIRE non distingue il livello concettuale da quello fisico e la definizione UML degli schemi è in realtà orientata alla sola descrizione del contenuto dei file gml sottostanti. Ciò complica la comprensione degli aspetti concettualmente rilevanti e la realizzazione di procedure di controllo di qualità di validità generale.

La rappresentazione finita dei dati

La semantica del modello geometrico e delle sue operazioni è definita supponendo di essere nel modello matematico della precisione infinita delle coordinate dei dati. Invece le coordinate sono rappresentate sul calcolatore con un modello a precisione finita e ciò implica che sia l'intervallo delle coordinate rappresentabili sia finito, ma anche che la maggior parte delle coordinate reali esprimibili in tale intervallo non siano rappresentabili. Il primo problema in pratica non esiste in quanto considerando le coordinate dell'Italia nel sistema di riferimento UTM32/WGS84 ricadono tutte nell'intervallo rappresentabile, mentre il secondo problema viene risolto arrotondando la coordinata ad una di quelle rappresentabili sul calcolatore. A complicare questo problema abbiamo che esistono vari modi di rappresentare e manipolare i dati con conseguenze diverse e complicate sulla determinazione dell'arrotondamento generato. Questo problema non è rilevante fintanto che si lavora in un solo sistema e quindi meno sentito in fase di produzione di primo impianto dei DBT, ma diventerà più grave con l'interoperabilità a causa della maggior presenza di sistemi diversi e dell'interscambio. In questa sezione si cercherà di presentare il problema e di identificare un possibile percorso euristico per la determinazione di parametri da sperimentare al fine di ridurre o annullare il problema. I sistemi adottano diverse tecniche per la rappresentazione dei dati, tuttavia quasi tutti i programmi che elaborano i dati si basano sulla rappresentazione standard floating point a 64 bit IEEE754- 1985 (nel seguito chiamata FP64) che corrisponde normalmente al concetto di numero reale in doppia precisione. Nella figura 2 sono visualizzate due curve nel mondo della precisione infinita in relazione di touch (a sinistra) e di disjoint (a destra).



Figura 2 – Curve nello spazio euclideo.

Consideriamo ora cosa accade rappresentando le coordinate in FP64. L'FP64 descrive numeri reali in virgola mobile e distribuisce i 64 bit automaticamente per la descrizione delle parti intera e frazionaria del numero; in particolare, descrive prima la parte intera e poi dedica i bit rimanenti per la parte frazionaria e ciò significa che numeri più grandi lasciano meno bit per la parte frazionaria, comportando quindi approssimazioni maggiori delle coordinate. Considerando le coordinate degli estremi del *bounding box* dell'Italia in UTM32/WGS84 (coordinate tra 300.000 e 5.200.000) si determina che la precisione massima disponibile per la parte frazionaria delle coordinate è dell'ordine del 10^{-9} (si sottintende l'unità di misura che è il metro) in modo tale da garantire una corrispondenza biunivoca tra le coordinate decimali e le corrispondenti rappresentazioni binarie. Lo spostamento delle coordinate per l'approssimazione è dello stesso ordine di grandezza. Le coordinate sono poi manipolate dagli algoritmi geometrici (ad es., quelli di verifica delle relazioni topologiche) e ogni operazione eseguita sui dati produce a sua volta un arrotondamento nei calcoli dell'ordine di 10^{-9} metri. Algoritmi per operazioni diverse o algoritmi diversi per la stessa operazione agiscono quindi come moltiplicatori di tale approssimazione non quantificabili in modo

deterministico. Si tratta di spostamenti applicativamente non significativi, ma che possono cambiare la valutazione di un vincolo spaziale; ad esempio le geometrie precise di Figura 1 (curve continue in Figura 3) possono subire uno spostamento dei vertici e del potenziale punto di intersezione tanto da non escludere, l'inversione delle relazioni spaziali tra le geometrie (curve tratteggiate in Figura 3).



Figura 3 – Lo spostamento prodotto dalla rappresentazione finita.

I sistemi GIS cercano di ovviare al problema attraverso il concetto di tolleranza che dovrebbe annullare gli effetti di questi piccoli spostamenti; questa soluzione è utile nei sistemi locali per intercettare e correggere topologicamente i dati, ma non è praticabile per il sistema di interoperabilità per i seguenti motivi:

- sebbene la definizione di tolleranza sia intuitiva non esiste una formalizzazione di tale concetto e degli algoritmi e infatti gli standard ISOTC211 e OGC lasciano questo aspetto *implementation dependent*;
- i sistemi che si basano sulla tolleranza non specificano come gestirla e quindi non si garantisce che l'applicazione di un'operazione basata sulla tolleranza dia lo stesso risultato in sistemi differenti.

Per questi motivi si ritiene che il sistema di interoperabilità debba operare sui dati in modo preciso e definire invece dei vincoli sui dati per ovviare ai problemi dovuti alla rappresentazione finita dei dati. In particolare, si potrebbero imporre due vincoli sui dati:

- due geometrie che hanno punti di intersezione richiesti dalla relazione topologica precalcolano questi punti traducendoli in espliciti vertici coincidenti nelle geometrie (ad esempio generando un vertice nella curva orizzontale della precedente figura 3 a sinistra e imponendo che abbia lo stessa coordinata della curva verticale) in modo che qualsiasi perturbazione preservi l'uguaglianza delle coordinate;
- due geometrie che devono rimanere separate garantiscano che tra due punti o tra un punto/vertice e un segmento esista sempre una distanza minima D_m tale da mantenere le relazioni presenti nel piano euclideo di Figura 2.

La prima condizione è più semplice perché tende a imporre di spezzare tutto ciò che interseca, mentre la seconda impone di valutare D_m . Una soluzione euristica può stabilire che l'approssimazione dovuta ad un generico algoritmo non possa superare le 10/100 volte l'approssimazione della singola operazione implicando quindi che $D_m \geq 10^{-6}$.

Si consideri ora all'estremo opposto l'accuratezza del rilievo che è dell'ordine del 10^{-2} e la possibilità di rappresentare anche geometrie fittizie nella giusta dimensionalità (ad esempio, una parete verticale rappresentata come una piccolissima superficie ottenuta inclinando leggermente la parete stessa o una superficie degenerata a curva perché sotto la soglia di cattura); si può ipotizzare che queste geometrie siano descritte generando delle superficie in cui vertici e curve distino meno dell'accuratezza del rilievo, ad esempio millimetri (10^{-3}) quando l'accuratezza è al centimetro. Questa ipotesi determina che la risoluzione di riferimento non possa essere inferiore al millimetro necessario per le geometrie fittizie, ma d'altra parte impone un ulteriore vincolo a D_m che quindi viene ristretta all'intervallo

$$10^{-4} \leq D_m \leq 10^{-6}$$

per non ritenere troppo vicine le geometrie fittizie da un lato e da inglobare gli errori di computazione dall'altra. Rimane infine da valutare l'impatto delle perturbazioni delle geometrie dovuto all'introduzione di nuove intersezioni. Ogni volta che una geometria viene spezzata per introdurre un vertice a causa di un'intersezione con un'altra geometria si produce uno spostamento della geometria originaria (ad esempio, un segmento di retta diventa una spezzata di due segmenti non più collineari); tale spostamento è tanto più elevato tanto più la precisione è bassa (spostamenti di millimetri per precisioni al millimetro). La risoluzione di riferimento dei dati deve quindi essere più fine di quelle delle geometrie rilevate o fittizie e più alta di quella del FP64 per incorporare gli errori computazionali, ossia $10^{-4} \leq R_{rif} \leq 10^{-6}$.

Nelle sperimentazioni regionali effettuate nell'ambito dei progetti del CISIS si è scelto di adottare una risoluzione di riferimento $R_{rif} = 10^{-5}$ e una distanza minima $D_m = 10^{-4}$. Valori più piccoli non sono stati considerati anche per non complicare la rilevazione degli eventuali errori individuati nei dati negli usuali strumenti GIS.

Ciò ha un impatto anche sul controllo di qualità dei dati che deve quindi eseguire i calcoli con una risoluzione più fine di quella adottata nel sistema in modo da non introdurre ulteriori perturbazioni, che non deve inoltre adottare meccanismi basati sulla tolleranza e tantomeno deve correggere topologicamente i dati prima dei controlli.

Indici di accettabilità e metainformazione

La definizione condivisa delle proprietà dei dati permette il controllo della qualità dei dati. Le esperienze condotte in rilievo dimostrano che il controllo esaustivo dei vincoli definiti sui dati può trovare molti errori: errori sistematici o casuali che saranno corretti nel processo di consegna o aggiornamento. Diventa quindi importante arricchire i dati con la metainformazione di istanza che colleghi ogni errore all'oggetto considerato in modo che il soggetto gestore possa valutare la qualità dei singoli oggetti ricevuti. Inoltre è necessario definire nel sistema di interoperabilità degli indici di accettabilità che indichino dei livelli di errore che possono rendere complessivamente o parzialmente inaccettabile un insieme dei dati e questo è particolarmente importante nel caso di trasmissione di aggiornamenti che dovrebbero sostituire dati del proprio sistema. In alcune sperimentazioni si sono usati semplici indici basati sulla media percentuale degli oggetti con almeno un errore in base ad opportune categorie di appartenenza (ad es., reticoli stradali, copertura del suolo,...).

Conclusioni e sviluppi futuri

Gli aspetti trattati sono determinanti per realizzare sia i singoli sistemi locali e sia quello globale della SDI e può essere utile in generale per normare il trasferimento dati anche in contesti non SDI. Rimane da affrontare il problema dell'impatto di avere soggetti che adottino risoluzioni diverse nei sistemi locali, la gestione degli oggetti globali che si spezzano al confine tra i gestori locali, le regole di armonizzazione al confine considerando anche il problema delle perturbazioni dovute alla computazione numerica.

Bibliografia

Belussi A., Liguori F., Marca J., Negri M., Pelagatti G. (2010), "Il Modello GeoUML. Regole di Interpretazione delle Specifiche di Contenuto per i Database Geotopografici", approvata dal comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle PA (www.DigitPA.it)
iso19107 (2003) ISO/TC 211, ISO 19107:2003, Geographic information - Spatial schema, text for FDIS, doc. N 1324
iso19125 (2004) ISO/TC 211. ISO 19125-1:2004 Geographic information - Simple feature access - Part 1: Common architecture, text for IS, doc. N 1563, 2004-01-23
Thompson R.J., Van Oosterom P.(2006), "Interchange of spatial data – inhibiting factors", 9th AGILE conference.

Calcolo delle coordinate in una poligonale tridimensionale in metrologia meccanica

Battista Benciolini, Alfonso Vitti

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli studi di Trento, Via Mesiano 77, 38123 Trento
Tel. 0461.282632-08, Fax 0461 282672, E-mail: battista.benciolini@unitn.it, alfonso.vitti@unitn.it

Riassunto

Si descrive l'algoritmo che è stato codificato per eseguire il calcolo delle coordinate di una sonda meccanica. Il sistema di misura è costituito da una serie di aste collegate tra loro da cerniere cilindriche con la prima asta incernierata a un supporto e l'ultima che termina con la sonda.

Gli impieghi di un sistema di questo tipo includono il rilievo di piccole strutture o oggetti come telai, apparati sperimentali e meccanici, la verifica di conformità al progetto o la determinazione di deformazioni.

I dati del problema sono le dimensioni e l'orientamento delle aste e l'orientamento degli assi delle cerniere in una posizione base e le letture dei goniometri inseriti nelle cerniere che danno gli angoli tra la posizione base e la posizione attuale di misura.

Nell'articolo si mostra come la scelta di una opportuna rappresentazione delle rotazioni, cioè mediante quaternioni, renda sostanzialmente semplici tutte le fasi del calcolo incluso il concatenamento delle rotazioni e l'orientamento assoluto. L'orientamento assoluto è necessario per fornire il risultato in un sistema di riferimento definito sull'oggetto da rilevare.

Il programma realizzato costituisce ovviamente il nucleo di calcolo di un sistema più complesso.

Il problema affrontato è un problema di metrologia meccanica ma è stato risolto con la applicazione di conoscenze tipiche delle discipline geodetiche.

Introduzione

In questo lavoro si descrive una soluzione per il calcolo di coordinate in un sistema di misura elettro-meccanico per il rilievo di oggetti di piccole e medie dimensioni in ambito industriale.

Il sistema di misura consiste in una sonda meccanica composta da un insieme di aste collegate tra loro da cerniere cilindriche. La prima asta è collegata con una cerniera a un supporto mentre l'ultima asta termina con una marca di riferimento che viene portata sui punti dei quali si vogliono conoscere le coordinate. Sistemi di questo tipo si possono impiegare per il rilievo ex-novo o l'ispezione di piccole strutture o oggetti come telai, stampi, componentistica e pezzi meccanici, ma anche per la verifica di conformità al progetto o la determinazione di deformazioni.

Ciascuna cerniera è dotata di un elemento di misura delle rotazioni (goniometro) e sono note le dimensioni delle aste. Il sistema acquisisce le rotazioni che si applicano alle cerniere nel muovere la sonda e restituisce le coordinate della estremità libera dell'asta terminale. Le coordinate vengono determinate con un opportuno calcolo una volta noti i parametri geometri dello strumento in una qualche posizione che chiamiamo posizione base. Nella posizione base di devono conoscere:

- le dimensioni delle aste e il loro orientamento nello spazio;
- l'orientamento nello spazio degli assi delle cerniere;
- la lettura dei goniometri.

Dimensioni e orientamenti vengono espressi in un sistema di riferimento legato allo strumento.

Da un punto di vista geometrico, si deve considerare il sistema articolato di aste come una spezzata nello spazio tridimensionale. A ogni lato della spezzata, e quindi a ogni asta, si associa un vettore

che rappresenta la differenza di posizione tra un punto iniziale e un punto finale. Per calcolare le coordinate della marca di riferimento (ultimo punto della spezzata) si parte da un punto origine convenzionale e si sommano tutti gli incrementi dati dai vari lati della spezzata. Prima di fare questo i vettori devono essere opportunamente orientati nello spazio. L'orientamento effettivo deve essere calcolato tenendo conto dell'orientamento delle aste e delle letture dei goniometri nella posizione base. Le coordinate che si ottengono nel modo descritto sono date ovviamente nel sistema di riferimento legato allo strumento.

Qualora si vogliano esprimere le coordinate in un sistema diverso da quello strumentale, per esempio un sistema legato all'oggetto, si devono stimare i parametri della trasformazione tra i due sistemi. Per questo lo strumento può essere impiegato per rilevare una serie di punti dei quali siano note le coordinate nel sistema legato all'oggetto così da produrre un catalogo di punti doppi. Si può quindi procedere alla stima dei parametri della trasformazione. Una volta noti questi parametri, la trasformazione tra sistemi di riferimento può essere incorporata direttamente nella catena di calcolo delle coordinate per avere subito il risultato nel sistema legato all'oggetto.

Il problema è stato risolto applicando conoscenze consolidate e tutte reperibili in letteratura ma presenta alcuni aspetti di un certo interesse generale:

- il carattere interdisciplinare, perché si sono applicate nell'ambito della metrologia meccanica conoscenze acquisite in ambito geodetico;
- la applicazione di strumenti matematici che pur essendo ben noti e consolidati non sembrano impiegati di frequente;
- la realizzazione di una soluzione che deve essere implementata all'interno di un programma che presiede in tempo reale al funzionamento dello strumento di misura.

Problemi da affrontare

All'interno delle procedure di calcolo appena descritte si individuano due problemi significativi:

- il concatenamento delle rotazioni applicate alle cerniere, per calcolare l'orientamento nello spazio di ogni asta;
- la stima dei parametri della trasformazione tra sistemi di riferimento.

Rispetto a molti problemi tipici in topografia e fotogrammetria, in questo caso non esiste alcun legame a priori tra i due sistemi di riferimento, quindi non si può fare alcuna ipotesi sui valori dei parametri da stimare. Per questo, il problema dell'orientamento assoluto si deve risolvere utilizzando un algoritmo che possa funzionare con configurazione qualsiasi e senza informazioni a priori sulla soluzione.

Per risolvere questi problemi si fa uso dell'algebra dei quaternioni, un formalismo matematico forse poco noto e apparentemente legato a settori formali e astratti della matematica, ma capace in realtà di fornire una soluzione computazionalmente molto semplice. L'uso dei quaternioni per rappresentare le rotazioni è ormai diffuso in molti settori della tecnica e in particolare in geodesia, fotogrammetria, cinematica dei sistemi articolati (con applicazioni per esempio nella robotica), dinamica del corpo rigido (con applicazioni per esempio al controllo d'assetto dei satelliti artificiali).

Nel seguito si introducono brevemente gli strumenti matematici scelti per risolvere i problemi elencati poco sopra. In una sezione successiva si presenta in modo schematico la procedura di calcolo implementata.

Strumenti matematici

L'algebra dei quaternioni

Nell'algebra elementare si lavora con i numeri reali che possono essere combinati tra loro con le quattro operazioni: somma, sottrazione, moltiplicazione e divisione. Una prima generalizzazione è la costruzione dei numeri complessi. Ogni numero complesso ha due componenti che sono la parte reale e la parte immaginaria, quindi un numero complesso può essere considerato come una coppia

di numeri reali. Tra i numeri complessi si eseguono le quattro operazioni. Le operazioni tra numeri complessi sono una generalizzazione delle operazioni tra numeri reali.

Una ulteriore generalizzazione è costituita dai quaternioni che sono degli oggetti a quattro componenti: una reale e tre immaginarie. L'idea dei quaternioni si deve a Hamilton il quale cercava una generalizzazione nello spazio tridimensionale dei numeri complessi e del loro significato di operatori di rotazione nel piano.

Per indicare i quaternioni si usa la notazione: $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, cioè lettere minuscole in grassetto. Un quaternione $\mathbf{q}$ si descrive semplicemente con l'elenco delle sue componenti, secondo la notazione: q_0, q_1, q_2, q_3 . La prima componente è la parte reale, le altre tre componenti formano un vettore che è la parte immaginaria. Gli ordinari numeri complessi si possono considerare come l'insieme di una parte reale e una parte immaginaria, che sono entrambe scalari. I quaternioni si possono considerare come l'insieme di una parte reale scalare e una parte immaginaria vettoriale. Si usa quindi la notazione: $\mathbf{q} = q_0 + i\mathbf{q}$ dove le componenti di $\mathbf{q}$ sono q_1, q_2 e q_3 (si usa la sottolineatura per denotare i vettori).

Tra i quaternioni si definiscono quattro operazioni, che chiamiamo ancora somma, sottrazione, moltiplicazione e divisione, che sono una generalizzazione delle solite quattro operazioni tra numeri reali. La uguaglianza, la somma e la sottrazione tra quaternioni si definiscono sulla base dell'uguaglianza, della somma e della sottrazione delle singole componenti. Il prodotto di un quaternione per un numero reale si definisce con il prodotto delle singole componenti con il numero reale. Il prodotto di due quaternioni $\mathbf{q}$ e $\mathbf{p}$ è definito come:

$$\mathbf{qp} = (q_0 p_0 - \mathbf{q} \cdot \mathbf{p}) + i (q_0 \mathbf{p} + p_0 \mathbf{q} + \mathbf{q} \wedge \mathbf{p}).$$

La scrittura $\mathbf{q} \cdot \mathbf{p}$ indica il prodotto scalare tra vettori e la scrittura $\mathbf{q} \wedge \mathbf{p}$ indica il prodotto vettore. Il coniugato di un quaternione si indica con $\mathbf{q}'$ e ha la parte reale uguale a quella di $\mathbf{q}$ e la parte complessa opposta. Il modulo di un quaternione vale $|\mathbf{q}| = (\mathbf{qq}')^{1/2} = (q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2)^{1/2}$. Infine il reciproco di un quaternione è definito come: $\mathbf{q}^{-1} = \mathbf{q}'/|\mathbf{q}|^2$. Attraverso il reciproco si definisce coerentemente la divisione tra quaternioni. Le quattro operazioni così definite godono delle stesse proprietà delle quattro operazioni tra numeri reali o complessi con una unica eccezione: la moltiplicazione tra quaternioni, coinvolgendo un prodotto vettore, non è commutativa. Per i nostri scopi è importante che il prodotto sia associativo.

La rappresentazione delle rotazioni con i quaternioni

Mediante i quaternioni è possibile esprimere una rotazione nello spazio partendo dalla seguente corrispondenza:

$$\underline{x} \leftrightarrow \mathbf{x} = 0 + i \underline{x}$$

che associa un quaternione immaginario $\mathbf{x}$ al generico vettore $\underline{x}$ nello spazio tridimensionale. L'espressione:

$$\mathbf{u} \mathbf{x} \mathbf{u}'$$

con $|\mathbf{u}|=1$ e con $\mathbf{x} = 0 + i \underline{x}$ è lineare in $\mathbf{x}$ e ha come risultato un quaternione, pure immaginario, con la stessa norma di $\mathbf{x}$, perciò rappresenta una rotazione nello spazio tridimensionale. La corrispondenza e la espressione appena scritte dicono che si usano quaternioni immaginari per rappresentare i punti nello spazio e quaternioni con modulo unitario per rappresentare le rotazioni. In entrambi i casi si usano quattro parametri e un vincolo per descrivere gli elementi di una varietà a tre dimensioni.

In analogia con gli ordinari numeri complessi, un quaternione di modulo unitario si può anche esprimere come: $\mathbf{u} = \cos(\alpha/2) + i \sin(\alpha/2) \underline{u}$ dove $\underline{u}$ è un vettore ancora di modulo unitario e α un angolo generico. Il quaternione $\mathbf{u}$ rappresenta una rotazione nello spazio tridimensionale di un angolo pari a α attorno all'asse individuato dal versore $\underline{u}$, così come ogni numero complesso di

modulo unitario rappresenta una rotazione nel piano. Per quanto ci interessa, l'asse di rotazione è realizzato da una cerniera cilindrica e l'angolo è una variabile che viene misurata. La rotazione di un certo angolo α attorno a un dato asse $\underline{u}$ è allora rappresentata da un quaternionione $\mathbf{u}$ di modulo unitario che ha:

- la parte reale $u_0 = \cos(\alpha/2)$;
- la parte immaginaria che è un vettore orientato come l'asse di rotazione e di modulo pari a $\sin(\alpha/2)$.

In molti ambiti una rotazione nello spazio tridimensionale viene rappresentata da una matrice $\mathbf{R}$, ortonormale e con $\det(\mathbf{R}) = 1$, detta matrice di rotazione. A ogni matrice di rotazione si può allora associare un quaternionione di modulo unitario e viceversa. Il quaternionione che rappresenta una rotazione, e che quindi è associato a $\mathbf{R}$, è definito a meno del segno. La rappresentazione delle rotazioni mediante quaternioni ha un pregio molto significativo che è la facilità con cui si calcolano i parametri di una rotazione che sia la composizione di due rotazioni date. E' evidente che se consideriamo due rotazioni associate ai quaternioni di modulo unitario $\mathbf{a}$ e $\mathbf{b}$ la rotazione risultante dalla loro composizione è semplicemente associata al loro prodotto $\mathbf{ab}$.

La soluzione del problema di Helmert con l'uso dei quaternioni

Sfruttando ancora la corrispondenza $\underline{x} \leftrightarrow \mathbf{x} = 0 + i \underline{x}$, la nota trasformazione di Helmert si scrive:

$$\mathbf{y} = \rho \mathbf{q} \mathbf{x} \mathbf{q}' + \mathbf{b}$$

dove:

- $\mathbf{x}$ e $\mathbf{y}$ sono i quaternioni immaginari che rappresentano uno stesso punto in due diversi sistemi di riferimento;
- ρ è lo scalare che rappresenta il fattore di scala;
- $\mathbf{q}$ è il quaternionione di modulo unitario che rappresenta la rotazione;
- $\mathbf{b}$ è il quaternionione immaginario che rappresenta la traslazione.

In generale si stimano i parametri della trasformazione di Helmert a partire da un insieme di punti più numeroso di quello strettamente indispensabile applicando il criterio dei minimi quadrati. Sia m il numero dei punti noti in entrambe i sistemi di riferimento. Si usa $j = 1..m$ come indice che corre sull'insieme dei punti. Il problema da risolvere è dunque un problema di minimo che si scrive come:

$$\mathbf{v}_j = \mathbf{y}_j - (\rho \mathbf{q} \mathbf{x}_j \mathbf{q}' + \mathbf{b})$$

$$\sum_{j=1}^m |\mathbf{v}_j|^2 = \text{minimo.}$$

Si devono cercare i valori delle incognite ρ , $\mathbf{q}$ e $\mathbf{b}$ che rendono minimo il valore della sommatoria indicata. La soluzione deve rispettare il vincolo sulla norma di $\mathbf{q}$. Il problema di Helmert è un problema non lineare. Ciò non ostante sono state trovare varie soluzioni che permettono un calcolo diretto senza dover linearizzare le equazioni. Questo fatto è importante quando non si dispone di una soluzione approssimata nota a priori. In questo lavoro si usa la soluzione basata sui quaternioni data da Sansò (1973) e se ne riportano solo le parti essenziali per descrivere la procedura di calcolo.

La stima del termine di traslazione è semplice, e viene ottenuta in modo indiretto riducendo a baricentriche entrambi i pacchetti di coordinate. Nel seguito si suppone che le coordinate siano ridotte a baricentriche, ma si continuano a usare i simboli $\mathbf{x}$ e $\mathbf{y}$ e le notazioni già definite. Per indicare una particolare componente del vettore delle coordinate di un singolo punto si usano due indici come nell'esempio seguente: x_{kj} , dove si usa $k = 1..3$ per indicare la componente del vettore e $j = 1..m$ per indicare il particolare punto a cui appartiene la coordinata. Si costruisce la matrice $\mathbf{A}$ quadrata simmetrica di ordine 4:

$$\mathbf{A} = \sum_{j=1}^m \begin{bmatrix} -\sum_{k=1}^3 x_{kj} y_{kj} & -(x_{2j} y_{3j} - y_{2j} x_{3j}) & -(x_{3j} y_{1j} - y_{3j} x_{1j}) & -(x_{1j} y_{2j} - y_{1j} x_{2j}) \\ \sum_{k=1}^3 x_{kj} y_{kj} - 2x_{1j} y_{1j} & -(x_{2j} y_{1j} + y_{2j} x_{1j}) & -(x_{3j} y_{1j} + y_{3j} x_{1j}) & \\ \sum_{k=1}^3 x_{kj} y_{kj} - 2x_{2j} y_{2j} & & -(x_{3j} y_{2j} + y_{3j} x_{2j}) & \\ \sum_{k=1}^3 x_{kj} y_{kj} - 2x_{3j} y_{3j} & & & \end{bmatrix}.$$

La soluzione al problema di Helmert si ricava dalla coppia autovettore-autovalore con il valore minimo dell'autovalore, che sarà a sua volta un numero negativo. Le componenti dell'autovettore, eventualmente normalizzate, forniscono le componenti del quaternione di modulo unitario cercato, cioè il quaternione che risolve il problema. Il fattore di scala infine vale:

$$\rho = -\lambda / \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^3 x_{kj}^2$$

dove λ è l'autovalore minimo appena calcolato.

Procedure di calcolo

Nel seguito indichiamo con $\underline{r}_l$ i vettori che descrivono i lati della spezzata e con $\underline{t}_l$ i versori che descrivono gli assi delle cerniere nella posizione base e nel sistema di riferimento strumentale. L'indice (l) corre su tutte le aste e su tutte le cerniere. L'asta l parte dal punto l e va fino al punto $l+1$. Se vi sono in tutto n aste il punto $n+1$ è la marca di misura di cui si devono determinare le coordinate. Si indica con α_l l'angolo che viene letto nella cerniera nel punto l al momento della misura. Sia: $\mathbf{q}_l = \cos(\alpha/2) + i \sin(\alpha/2) \underline{t}_l$ il quaternione che rappresenta la rotazione della cerniera l . Questa espressione rappresenta la rotazione imposta dalla cerniera l all'asta l e alle aste successive. In pratica l'asta l subisce una rotazione nello spazio che è l'effetto combinato delle prime l cerniere. Questo effetto combinato si ottiene semplicemente moltiplicando tra di loro i corrispondenti quaternioni. Conviene dunque definire un nuovo quaternione $\mathbf{p}_l$ che sia la produttoria parziale dei quaternioni da $\mathbf{q}_1$ a $\mathbf{q}_l$:

$$\mathbf{p}_l = \prod_{s=1}^l \mathbf{q}_s.$$

Attraverso i quaternioni $\mathbf{p}_l$ è possibile operare la rotazione che dà a ogni lato della spezzata il suo corretto orientamento. Per fare questo si associa a ogni vettore $\underline{r}_l$ un quaternione puramente immaginario $\mathbf{r}_l = 0 + i \underline{r}_l$ e poi si applica la rotazione con la espressione:

$$\mathbf{s}_l = \mathbf{p}_l \mathbf{r}_l \mathbf{p}_l'$$

che produce il quaternione immaginario $\mathbf{s}_l$ la cui parte vettoriale è proprio il lato l della spezzata con il nuovo orientamento nello spazio. A questo punto, per ottenere il quaternione $\mathbf{x}$ la cui parte vettoriale contiene le coordinate del punto $n+1$ è sufficiente sommare tutti i lati della spezzata:

$$\mathbf{x} = \sum_{l=1}^n \mathbf{s}_l.$$

Le coordinate della marca di riferimento così ottenute sono date ancora nel sistema di riferimento strumentale.

A valle del rilievo di un adeguato numero di punti per i quali siano note le coordinate in un sistema di riferimento legato all'oggetto è possibile stimare i parametri della trasformazione di Helmert tra questo sistema e quello strumentale seguendo il procedimento descritto poco sopra. Successivamente sarà possibile produrre coordinate direttamente nel sistema di riferimento legato all'oggetto utilizzando i parametri appena stimati per applicare la trasformazione a tutti i nuovi punti rilevati.

Osservazioni conclusive

La procedura descritta fornisce risultati pienamente soddisfacenti. Il programma di calcolo realizzato è stato incorporato in un prodotto funzionante.

Sullo svolgimento del lavoro e sulle scelte operate si possono fare alcune osservazioni. Gli algoritmi che sono stati progettati e programmati sono piuttosto semplici e si sono dimostrati efficienti ed efficaci. Questo si deve soprattutto alla scelta dello strumento matematico più adatto per la rappresentazione delle rotazioni, cioè l'algebra dei quaternioni. Crediamo che i pregi di questa rappresentazione, già presentati nel testo, possano essere ribaditi:

- si utilizzano parametri di preciso significato geometrico intrinseco;
- non si hanno singolarità;
- è facile eseguire il concatenamento delle rotazioni;
- esiste una soluzione diretta al problema dell'orientamento assoluto.

E' importante notare che le prime tre caratteristiche del metodo sono strettamente legate tra di loro.

A noi risulta evidente il legame tra la semplicità degli algoritmi e le proprietà della rappresentazione utilizzata. Questo dovrebbe fare riflettere sulla convenienza e la utilità di affrontare i problemi, anche semplici, con un appropriato inquadramento teorico e di utilizzare anche, dove serve, strumenti matematici non abituali.

Una ulteriore e ultima osservazione riguarda l'ambito disciplinare del lavoro svolto. Il problema presentato ricade nell'ambito della metrologia meccanica per applicazioni in campo industriale ma è stato risolto utilizzando conoscenze tipiche delle discipline geodetiche.

Indicazioni bibliografiche

Una trattazione delle diverse rappresentazioni delle rotazioni si può trovare negli articoli di Nitschke e Knickmeyer (2000) e di Stuelpnagel (1964). Il libro di Altmann (2002) tratta le rappresentazioni intrinseche delle rotazioni e l'algebra dei quaternioni. Il libro di Kuipers (2002) ha un carattere molto pratico e didattico ed è dedicato alle applicazioni dei quaternioni in vari settori della meccanica. Nell'articolo di Sansò (1973) si trovano una essenziale introduzione all'algebra dei quaternioni, una trattazione della rappresentazione delle rotazioni mediante i quaternioni e la soluzione del problema della stima dei parametri della trasformazione di Helmert basata su tale rappresentazione.

Bibliografia essenziale

- Altmann S.L. (2002), *Rotations, Quaternions, and Double Groups*, Clarendon Press, Oxford
- Kuipers J.B. (2002), *Quaternions and rotation sequences: a primer with applications to orbits, aerospace, and virtual reality*, Princeton university press, Oxford
- Nitschke M. and Knickmeyer E.E. (2000), "Rotation parameters, a survey of techniques", *Journal of Surveying Engineering* 126 (3), 69-105
- Sansò F. (1973), "An exact solution of the roto-translation problem", *Photogrammetria* 29, 203-216
- Stuelpnagel J. (1964), "On the parametrization of the three-dimensional rotation group", *SIAM Review* 6 (4), 422-430

La mappa catastale nel sistema di riferimento WGS84, in regione Piemonte

Josif Horea Bendea (*), Antonio Chiaffrino (***), Alberto Cina (*),
Flavio Celestino Ferrante (****), Luigi Garretti (**), Ambrogio Maria Manzino (*),
Marzio Pipino (***), Marco Piras (*), Chiara Porporato (*), Gian Bartolomeo Siletto (**)

(*) Politecnico di Torino, DITAG, Tel. 011 5647658/30/61/75/61/87/, Fax 011 5647699

e-mail: (iosif.bendea/ alberto.cina/ ambrogio.manzino/ marco.piras/ chiara.porporato)/@polito.it

(**) Regione Piemonte. Direzione Programmazione Strategica, Politiche territoriali ed Edilizia.

Settore Cartografia e SIT. Corso Bolzano 44, 10121 Torino, Tel. 011 4324160, Fax +39 0114326462

e-mail: (luigi.garretti/ gianbartolomeo.siletto)/@regione.piemonte.it

(***) CSI Piemonte Corso Tazzoli 215/12b, 10137 Torino, Tel. +39 011.3168724, Fax +39 011.3169560

e-mail: (marzio.pipino/ antonio.chiaffrino)/@csi.it

(****) Agenzia del Territorio, Largo Leopardi 5, Roma, Tel. +39 06 47775596

e-mail: flavio.ferrante@agenziaterritorio.it

Keywords: Cartografia catastale, origine fittizia, Catasto, UTM-WGS84, ETRF2000, RDN, Cassini-Soldner

Riassunto

Sono in via di ultimazione nella Regione Piemonte le operazioni per la trasformazione della mappa catastale dai sistemi Cassini Soldner al nuovo sistema globale WGS84-ETRF2000, realizzato dalla Rete Dinamica Nazionale. L'attività è svolta in base ad accordi tra Agenzia del Territorio, Regione Piemonte, CSI Piemonte e Politecnico di Torino. Il problema del cambio di DATUM si presenta particolarmente complesso in questa regione, per la proliferazione di una grande quantità di sistemi d'asse, la cui ricomposizione ha comportato vari tipi di problemi teorici e pratici.

Nella nota verranno esposte le operazioni per la ricostruzione del sistema di riferimento catastale, per la conversione delle mappe raster e vettoriali nel sistema WGS84 e per la determinazione analitica di punti di "doppie coordinate", funzionali alla trasformazione. Le operazioni di verifica, tuttora in corso, mostrano una buona sovrapposizione tra le carte tecniche e le mappe catastali nei nuovi sistemi di riferimento.

Abstract

The operations of cadastral map transformation (from Cassini Solder to WGS84-ETRF2000, realized by the National Dynamic Network (RDN)) in Regione Piemonte is almost concluded. This activity is realized according to an agreement between Agenzia del Territorio (AdT), Regione Piemonte, CSI Piemonte and Politecnico di Torino. The DATUM's transformation is particularly complex in this area, because there are a large number of system of axes whose recomposition has caused several theoretical and practical problems.

The steps of the reconstruction of the cadastral reference system, with purpose to convert the raster and vector maps into the reference system WGS84 will be described in this paper. Furthermore, the operations devoted to analytically determine the couple of points with "double coordinates" will be shown. The control of the transformation is still in progress, but it shows a good overlapping between Carta Tecnica Regionale (CTR) and cadastral map defined in the new reference system.

Il FRAME del sistema Roma40 è realizzato dalla rete di triangolazione di 1° ordine IGM. A questo DATUM si sono appoggiate anche le reti catastali, utilizzando però a volte coordinate provvisorie prima della compensazione finale, la cui attesa avrebbe rallentato i lavori di realizzazione delle mappe. Il sistema di riferimento italiano, dal 1° gennaio 2009, è il WGS84, nella sua realizzazione ETRF2000. Il Frame di riferimento è la Rete Dinamica Nazionale (RDN) dell'IGM.

Si è già detto come il sistema di rappresentazione cartografica utilizzato prevalentemente dal Catasto sia quello Cassini Soldner, che appartiene alla categoria delle “rappresentazioni afilattiche”, ovvero che non conservano né angoli né aree. È altresì noto che il sistema Roma40 e WGS84 utilizzano la “rappresentazione conforme” di Gauss, nei sistemi rispettivamente Gauss Boaga e UTM-WGS84 nella realizzazione ETRF2000 (nel seguito UTM-WGS84). La trasformazione da sistema catastale ai nuovi sistemi di riferimento nella rappresentazione di Gauss, deve perciò tenere conto di una molteplicità di aspetti tra cui due i principali:

- diversità del DATUM: il problema è complicato ancora dall'utilizzo delle coordinate provvisorie prima dell'unificazione delle reti IGM;
- diversità della rappresentazione cartografica: uno stesso oggetto sulla stessa superficie di riferimento viene “deformato” in maniera diversa sui piani cartografici di Gauss o di Cassini Soldner (Figura 3).

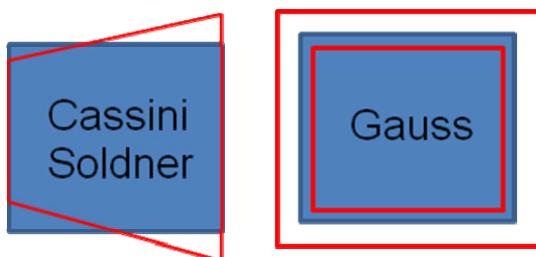


Figura 3 – Deformazioni nelle carte di Gauss e Cassini Soldner nel passaggio da superficie di riferimento (blu) a piano cartografico (rosso).

È naturalmente implicito che ogni errore sulle coordinate di un particolare cartografico della mappa nel sistema originario, risulterà di pari entità nel nuovo sistema di riferimento, anche a valle della più rigorosa procedura di trasformazione. Occorre allora distinguere tra procedure di trasformazione di tipo “globale” o “locale” (Barbarella et al., 2009). Le **trasformazioni globali** provvedono al trasporto delle coordinate catastali dal sistema originario verso Roma40 o WGS84 con procedure geodetiche rigorose. Le **trasformazioni locali** servono a rendere coerenti le geometrie catastali con quelle di altri DB topografici di riferimento. Con esse vanno assorbite sia deformazioni che possono essere state prodotte nella fase di rilievo d'impianto o di aggiornamento, sia degni di precisione che possono essersi generati nel processo di vettorizzazione delle mappe. Nella parte che segue sarà affrontato il solo problema delle trasformazioni di tipo globale, che possono per lo meno essere raggruppate nei due approcci:

1. **Trasformazioni con punti di doppie coordinate:** si basa sulla disponibilità di punti di note coordinate nei due sistemi di riferimento catastale, Roma40 o WGS84, ai quali vengono applicati consolidati algoritmi rigorosi di stima dei parametri di trasformazione (Di Filippo 1995 e 2003). In generale si ipotizza la coerenza dei fogli di mappa all'interno della stessa origine catastale in maniera che la ricerca dei punti di doppie coordinate possa essere fatta per sistema d'asse anziché per foglio di mappa. Il metodo richiede dunque la conoscenza delle doppie coordinate di punti omologhi, deducibili dalla documentazione di archivio delle reti geodetiche del Catasto e dell'IGM, ovvero anche da rilievo sul terreno o da misure cartografiche su DB topografici di adeguata precisione. Attualmente l'Agenzia del Territorio

basa la trasformazione delle mappe vettoriali nei nuovi sistemi di riferimento su tale metodologia, privilegiando l'impiego, ove possibile, di punti appartenenti alle reti geodetiche del Catasto e dell'IGM. Tale metodologia è già stata utilmente applicata per la trasformazione della cartografia catastale su circa il 60% del patrimonio cartografico catastale.

2. **Trasformazioni a partire dall'origine dei sistemi d'asse:** si basano su considerazioni geodetiche e cartografiche che mostrano come sia possibile "riproiettare" i punti dal sistema cartografico catastale a Gauss-Boaga o UTMWGS84, a partire da elementi superficiali (azimut e lunghezza della geodetica) praticamente indipendenti dal cambio di forma dell'ellissoide (Cina, 2008). Il metodo presuppone la conoscenza delle coordinate dell'origine catastale nel solo sistema di riferimento "di arrivo", oltre che i parametri di trasformazione (orientamento e scala tra DATUM), espressi nel piano di Gauss. I parametri di trasformazione possono essere ricavati con le stesse procedure geodetiche a partire da pochi punti doppi ma ben rappresentativi del sistema di riferimento, anche su vaste estensioni o su singole origini o gruppi di origini. Se l'origine non è nota, essa può essere ricavata con procedure minimi quadrati: due per lo meno i metodi utilizzabili che chiameremo dell' "*Origine fittizia (O.F.)*" o della "*Triangolazione Aerea Catastale (T.A.C.)*".

Metodo dell'origine fittizia (O.F.): per ogni sistema d'asse catastale vengono stimate le coordinate dell'origine a partire da punti di doppie coordinate (Cassini-Soldner e Gauss) con un metodo geodetico iterativo (Bendea, 2009), a partire da una posizione del centro di emanazione di prima approssimazione. Il calcolo, rapidamente convergente, fornisce la stima minimi quadrati delle coordinate dell'origine nel sistema "di arrivo" con la relativa matrice di varianza covarianza. Con questo metodo è possibile eseguire operazioni di *data snooping* e individuare eventuali vertici di coordinate non coerenti nei due sistemi di riferimento.

Metodo della Triangolazione Aerea Catastale (T.A.C.): può essere applicato per la stima delle coordinate delle origini quando non si possiede un sufficiente numero di punti di doppie coordinate per ogni sistema d'asse. Analogamente alla TA fotogrammetrica (Krass, 1994) per modelli indipendenti, la TA catastale si basa su punti comuni a più origini (punti di legame) e pochi vertici trigonometrici di doppie coordinate (Figura 4). Il blocco viene compensato e orientato nel sistema di riferimento di arrivo con procedimento di stima minimi quadrati con la stima della matrice di varianza covarianza dei parametri stimati (Cina et al., 2011).

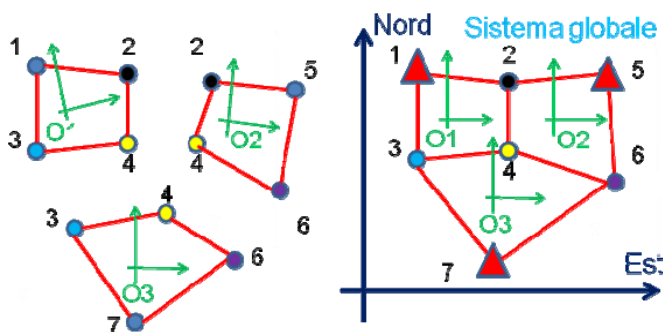


Figura 4 – TA catastale: nell'esempio 3 origini (O1, O2, O3) con punti di legame (2, 3, 4, 6) e 3 punti di doppie coordinate (1, 5, 7), ricomposti nel sistema globale (Est e Nord).

I due metodi, per punti doppi o per origini, possono essere visti come un diverso approccio allo stesso problema e come tali possono utilmente integrarsi. Disporre di punti di doppie coordinate può permettere la rideterminazione delle origini catastali che li hanno generati, consentendo una verifica della precisione e affidabilità delle loro coordinate. Al contrario, col metodo per origini, si possono generare analiticamente punti di doppie coordinate nella densità voluta, a supporto della prima trasformazione. Proprio questo è il cuore dell'attività eseguita in Regione Piemonte, dove sono stati generati punti di doppie coordinate col metodo per origini, a supporto delle trasformazioni per punti di doppie coordinate che l'Agenzia del Territorio ha da tempo implementato all'interno del proprio sistema. In tutti i casi è di grande importanza la ricostruzione del sistema di riferimento attraverso l'acquisizione degli elementi geodetici dei vertici che lo hanno storicamente generato.

Tutti gli algoritmi di cui all'approccio per origini catastali, sono stati studiati e implementati in linguaggio Matlab® presso il gruppo di ricerca al Politecnico di Torino – DITAG.

La ricomposizione dei sistemi d'asse catastali in Regione Piemonte

La situazione dei sistemi d'asse catastali in Regione Piemonte si presenta particolarmente complessa per la proliferazione dei sistemi di piccola estensione, presenti in numero di 547. Alcuni comprendono più comuni, altri sono coincidenti con un intero comune, ma troviamo ancora casi di più sistemi all'interno dello stesso comune, generati da variazioni territoriali di comuni adiacenti. Due sistemi di grande estensione completano lo scenario: le grandi origini di Alessandria e di Vercelli, ai quali sono riferite intere provincie e parti di esse. In particolare l'origine di Vercelli è su un "punto ideale" chiamato Ω , che non ha alcuna materializzazione ma corrisponde ad un valore intero di primi di latitudine e longitudine. Il dettaglio e la numerosità dei sistemi d'asse sono riportati in Tabella 1, assieme alla tipologia di materiale geodetico reperito presso gli uffici dell'AdT e acquisito per la ricostruzione del sistema di riferimento e delle origini catastali.

Provincia	n. piccole origini	grandi origini	Documentazione geodetica messa a disposizione da AdT	Metodo di verifica origini
TO	320		Registri con elenco coordinate di circa 16.000 punti CS e GB	O.F.
CN	101		Monografie di circa 4200 punti doppi (CS e GB)	O.F.
AT	24		Monografie di circa 500 punti doppi (CS e GB)	O.F.
AL	37	ALESSANDRIA osservatorio	Registri con monografie di circa 700 punti CS e Rabbini (no GB)	T.A.C.
NO	62	VERCELLI Punto ideale Ω	Registri con monografie di circa 2400 punti CS e Rabbini (no GB)	T.A.C.
VC	3		Monografie di circa 1400 punti doppi (CS e GB) e registri Con coordinate CS GB	O.F.
BI				
VCO				

Tabella 1 – Piccole e grandi origini in Regione Piemonte con tipologia di monografie ritrovate negli uffici AdT e metodi di verifica (O.F. = Origine Fittizia, T.A.C. = Triangolazione Aerea Catastale).

Il materiale geodetico si presentava diversificato nelle varie provincie: a volte sono stati ritrovati elenchi o monografie di punti di doppie coordinate (Cassini Soldner e Gauss Boaga) che hanno consentito la ristima dell'origine col metodo dell'*Origine Fittizia (O.F.)*, in altri casi, essendo disponibili solo le coordinate Cassini Solner e pochi vertici trigonometrici IGM di note coordinate catastali, si è applicato il metodo della *Triangolazione Aerea Catastale (T.A.C.)*, secondo quanto riportato in

Tabella 1. I risultati ottenuti circa la precisione della stima delle coordinate delle origini con i metodi *O.F.* o *T.A.C.* sono risultati soddisfacenti solo dopo operazioni di *data snooping* a partire dai residui minimi quadrati delle stime. Dette operazioni hanno permesso di eliminare *outlier* generati sia nella digitazione delle coordinate delle monografie (operazione eseguita manualmente), sia errori presenti sui cataloghi storici oppure omonimie di punti o altro ancora. In Figura 5 si può apprezzare come lo scarto quadratico medio σ delle coordinate planimetriche stimate non ecceda i 30 cm nel 95% dei casi. Gli scarti a valle della stima minimi quadrati, dopo l'eliminazione degli *outlier*, sono risultati contenuti entro 1 m.

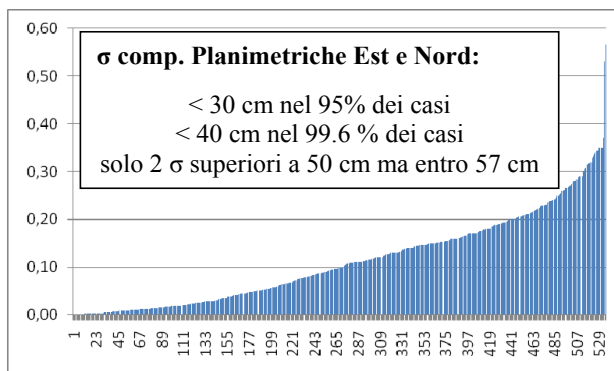


Figura 5 – *Sqm in cm delle componenti planimetriche (in ordinata) nella ristima delle origini (in ascissa).*

Verificata la precisione e affidabilità delle coordinate delle origini catastali, è ora necessario passare alla stima dei parametri di trasformazione fra DATUM.

I parametri di trasformazione tra DATUM

La trasformazione fra DATUM avviene, in generale, confrontando fra loro punti di doppie coordinate in sistemi coerenti, per stimare minimi quadrati i parametri necessari. Nel nostro caso, note le origini catastali (vedi precedente paragrafo), è sufficiente stimare i soli parametri di rotazione e scala tra DATUM di partenza (Catastale) e di arrivo (Roma40 o WGS84). La stima è stata eseguita attraverso le stesse procedure geodetiche precedentemente richiamate.

Va ricordato che la trasformazione fra DATUM è un problema geodetico e non solamente geometrico: confrontando fra loro punti di doppie coordinate la stima dei parametri non è esente dagli errori con i quali esse sono note. I parametri di trasformazione non è detto possano essere estesi a tutta la Regione ma anche solo a parte di essa.

I vertici selezionati sono stati, quando possibile, IGM di elevato ordine di cui erano note anche le coordinate catastali: a partire da essi sono state eseguite varie prove che hanno portato a individuare come ottimali tre macro zone (Figura 6):

- zona ovest, estesa alle provincie di Cuneo e Torino;
- zona est, estesa alle provincie di Alessandria, e Asti, riferite in maggior parte alla grande origine di Alessandria;

- c) zona nord, estesa alle provincie del Verbano Cusio Ossola, Biella Vercelli e Novara, riferite in buona parte alla grande origine di Vercelli.

La stima dei parametri ha portato ai valori riportati in Figura 6, con scarti minimi quadrati sui punti doppi contenuti entro 50 cm. La variazione dei parametri non porta a discrepanze significative, da un punto di vista cartografico, nelle zone di confine.

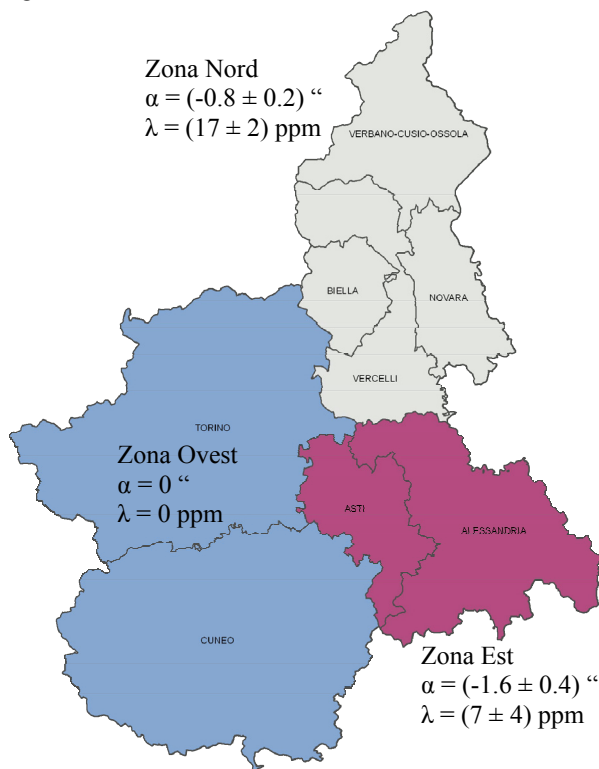


Figura 6 – Parametri di trasformazione tra DATUM in Regione Piemonte, suddivisi in 3 zone rappresentate con diverso colore. I valori angolari e di scala si intendono dal vecchio al nuovo sistema di riferimento.

Trasformazione di mappe catastali e generazione di punti di doppie coordinate

Note le origini e i parametri di trasformazione è ora possibile procedere alla conversione delle mappe catastali verso i nuovi sistemi di riferimento, con estensione a tutta la Regione Piemonte. Questa fase di produzione ha riguardato 3 tipi di prodotti:

- 1) File di “triple coordinate”, catastali, Roma40 e UTM-WGS84 in formato .CSV, funzionali alle operazioni da parte dell’AdT di cambio di sistema di riferimento, all’interno del proprio sistema, con algoritmi rigorosi basati su punti doppi (Di Filippo, 2003). Essi vengono generati con la procedura geodetica per ogni origine catastale, in ragione di uno per foglio di mappa e posto in posizione centrale.
- 2) Mappa raster originale d’impianto: a partire dai world file di georeferenziazione (.TFW) prodotti da CSI Piemonte per la georeferenziazione nel sistema Cassini Soldner. Con la stessa procedura geodetica viene stimata una trasformazione affine per ogni foglio di mappa, da Cassini Soldner a UTM-WGS84, e viene generato un nuovo world file sfruttando le proprietà delle trasformazioni affini.

- 3) Mappe vettoriali: la trasformazione è eseguita “punto per punto” con la procedura geodetica applicata a tutte le coordinate presenti nel file vettoriale. Le mappe catastali vettoriali possono però non essere esenti da imprecisioni legate al processo produttivo di vettorizzazione e il loro utilizzo al momento è stato unicamente a scopo di verifica, per sovrapposizione cartografica.

A valle della procedura di calcolo, vengono generati report sulle operazioni eseguite, sui file trasformati ed eventuali problemi di file non trovati, in modo da rendere agevole una verifica. Un primo grossolano controllo avviene poi sovrapponendo i centroidi dei fogli di mappa a Google Earth, tramite la creazione di un file in formato KML. Questa prima semplice verifica permette di evidenziare immediatamente fogli mal collocati o errori nell'attribuzione delle origini o l'applicazione o meno di false origini.

I file generati sono relativi a circa 30.000 fogli di mappa in Regione Piemonte. Le procedure di calcolo sono state eseguite in modalità *batch*, a partire da file di lancio opportunamente compilati e contenenti gli abbinamenti tra i fogli, le origini e i parametri di trasformazione tra DATUM. La generazione dei file di doppie coordinate e dei world file viene eseguita in tempi di calcolo minori di 1 ora per provincia, utilizzando un moderno PC di buone caratteristiche. La conversione dei file vettoriali comporta tempi maggiori e dipendenti dalla complessità del file cartografico. Sullo stesso PC è ipotizzabile un tempo medio di circa 4000 fogli in 24 ore di calcolo.

Conclusioni e risultati delle prime verifiche

La verifica del risultato della trasformazione può in parte essere già eseguita con criteri statistici, esaminando i risultati ottenuti della stima delle coordinate dei sistemi d'asse. Naturalmente, il risultato finale deve portare ad una “buona sovrapponibilità” della mappa catastale con una moderna carta tecnica (o DBT) assunta come riferimento.

La verifica cartografica è utile anche per individuare errori grossolani legati a errate attribuzioni di origini a fogli di mappa o all'applicazione di false origini. Se la mappa catastale vettoriale è quella maggiormente usufruibile e aggiornata, il confronto più significativo da un punto di vista metrico va eseguito però sulla mappa d'impianto. Le mappe vettoriali possono infatti aver subito deformazioni legate al processo produttivo di scansione e vettorizzazione, nonché essere soggette ad errori nel rilievo di aggiornamento dall'impianto ad oggi. Tali errori prescindono da considerazioni geodetiche e vanno affrontati caso per caso, ancora con trasformazioni locali.

Le verifiche, tuttora in corso, sono condotte effettuando controlli complessivi dell'insieme dei fogli di una provincia e controlli localizzati a campione. Attualmente la sola carta tecnica 1:10.000 è disponibile in maniera completa su tutta la Regione; in Provincia di Torino è disponibile la Carta Tecnica Provinciale in scala 1:5000 e solo in un numero limitato di zone sono presenti DB topografici a scala maggiore. La problematica riscontrata nelle verifiche, soprattutto nei controlli localizzati a campione, è stata quella di individuare gli oggetti (es. edifici) presenti sugli originali d'impianto e ancora presenti, immutati, sulla cartografia di riferimento. Dalle prime verifiche si nota come ci sia in linea di massima una buona corrispondenza tra gli originali d'impianto e la carta tecnica, con scarti compatibili con le precisioni della mappa catastale e delle mappe utilizzate per il confronto.

Le attività, in corso di completamento, consentiranno all'Agenzia del Territorio, di ultimare, anche nella Regione Piemonte, la trasformazione della propria cartografia, dai vari sistemi di riferimento locali, dapprima al sistema di riferimento nazionale Roma40 e successivamente al sistema globale WGS84, utilizzando e mantenendo una unica procedura di calcolo. Consentiranno, inoltre, di disporre delle immagini georiferite delle mappe originali di impianto, utili per il recupero delle deformazioni dei file vettoriali e per la costruzione delle congruenze topologiche tra fogli di mappa adiacenti.

Bibliografia

- Barbarella M., Radicioni F., Sansò F. (2009), *Lo sviluppo della tecnologia per le reti geodetiche*. Pubblicato a cura del CISIS, Perugia, 2009. 217 pag. ISBN:978-88-904629-0-0.
- Bendea H., Cina A., De Agostino M., Manzano A., Piras M., Porporato C., (2009), La ricomposizione dei piccoli sistemi d'asse catastali nel sistema WGS84. *Atti della 13ª Conferenza nazionale ASITA, Bari*, 1-4 dicembre 2009.
- Brovelli M.A., Zamboni G. (2003), Procedure automatiche per l'integrazione di diverse basi cartografiche. *Atti della 7ª Conferenza nazionale ASITA, Verona*, ottobre 2003.
- Cina, A., (2008). La carta catastale in un sistema globale. *Rivista dell'agenzia del Territorio*, vol. 1; 13-26.
- Cina A., Ferrante F. C., Manzano A.M., Porporato C. (2010), Metodologie geodetiche e cartografiche per la ricomposizione della mappa catastale nel sistema UTM-ETRF2000, *Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia*, 1: 27-40
- Cina A., De Agostino M., Manzano A.M., Piras M. (2010), Valorizzazione metrica della mappa d'impianto catastale, *Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia*, SIFET, 1: 41-54.
- Cina A., Caione S., Chiaffrino A., Ferrante F.C., Garretti L., Manzano A.M. Pipino, M. Piras, M. Porporato C., Siletto G.B. (2011), La trasformazione di mappe catastali in Regione Piemonte, nel sistema WGS84. In corso di Stampa su *Bollettino della SIFET*, 2011.
- Crespi M., Reina G. (2004), Inquadramento di mappe catastali nel sistema cartografico UTM-WGS84 – ETRF8 mediante rilievi GPS RTK rispetto a stazioni permanenti. *Atti dell'8ª conferenza ASITA, Roma*, 2004.
- Di Filippo S. (2003), Sul passaggio delle coordinate plano-cartografiche al sistema WGS84 e viceversa. *Rivista dell'Agenzia del Territorio*, 2003.
- Di Filippo S. (1995), Sulla trasformazione delle coordinate plano-cartografiche dalla rappresentazione di Cassini-Soldner alla rappresentazione di Gauss-Boaga e viceversa (parte 1ª). *Rivista del Dipartimento del Territorio*, n.3, 1995. 151-186.
- Di Filippo S., Ferrante F., Garnero G., Gnesivo P. R., Rao S. (2005), Unificazione dei sistemi d'asse catastali di piccola estensione. La produzione pilota del Piemonte orientale. *Atti della IX Conferenza Nazionale ASITA, Catania*, novembre 2005.
- Ferrante F., Garnero G. (2009), La valorizzazione delle mappe originali di impianto del catasto per la ricostruzione delle congruenze topologiche tra fogli adiacenti. *Atti della 13ª Conferenza nazionale ASITA, Bari*, 1-4 dicembre 2009.
- Kraus K. (1994). *Fotogrammetria. Vol.1 – Teoria e applicazioni*. Traduzione di Sergio Dequal. Torino, Levrotto & Bella, 518 pagg.
- Pàroli A. (1943), Il problema della trasformazione delle coordinate nella rappresentazione conforme di Gauss e l'unificazione delle reti trigonometriche del nuovo stato. *Rivista del Catasto e dei Servizi Tecnici Erariali*, 3: 213-227.
- Pàroli A. (1948), *Triangolazioni topografiche e del Catasto*, Hoepli, Milano.
- Surace L. (2004), La georeferenziazione delle informazioni territoriali. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, III, 168-179.

Utilizzo del laser scanner per i beni culturali: analisi dell'assetto geometrico strutturale e di specifiche anomalie geometriche

Bertacchini E. (*), Capra A. (*), Castagnetti C. (*), Dubbini M. (**),
Rivola R. (*), Toschi I. (*)

(*) DIMeC, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile, Università di Modena e Reggio Emilia
Strada Vignolese 905, 41125 Modena

(**) DiDiSAG, Dipartimento di Discipline Storiche, Antropologiche e Geografiche, Università di Bologna
Via Zamboni 33, 40126 Bologna

Riassunto

La tecnologia Laser Scanner Terrestre (LST) permette di ottenere il modello tridimensionale complessivo di qualsiasi oggetto con elevata accuratezza e, per questo motivo, risulta oggi sempre più applicata in ambito architettonico. E' tuttavia necessario identificare l'approccio più adeguato in relazione alla tipologia di oggetto e allo scopo finale del rilievo, intendendo con questo sia la scelta della strumentazione da utilizzare sia l'adozione di specifiche tecniche per il trattamento dei dati.

Il presente lavoro si propone di sperimentare l'applicazione della tecnologia LST a strutture di elevato pregio architettonico – culturale: la Torre degli Asinelli e la Torre Garisenda (Bologna).

Entrambe richiedono un'attenta analisi strutturale in quanto il loro prevalente sviluppo verticale, denotato da altezza e snellezza significative, le rende una tipologia costruttiva particolarmente delicata. In entrambi i casi il rilievo, eseguito con un laser scanner distanziometrico ad impulsi, ha permesso di ottenere il modello complessivo della struttura con risoluzione sub-centimetrica. Nello specifico, lo studio applicato alla Torre degli Asinelli è stato volto alla determinazione di informazioni generali sull'assetto geometrico della struttura: sono stati infatti ricavati l'altezza della Torre, lo sviluppo del suo asse longitudinale e lo strapiombo. Le analisi relative alla Garisenda hanno invece interessato la fascia selenitica della Torre: all'analisi geometrica delle sezioni orizzontali è stata affiancata quella relativa al fenomeno di "spanciamento" particolarmente evidente su uno dei quattro lati. Le scelte adottate per l'esecuzione del rilievo e l'estrazione delle informazioni hanno permesso un'analisi limitata allo stato di fatto; in futuro verranno messe in campo strategie atte a permettere la ripetibilità nel tempo delle misure e delle successive analisi, al fine di porre le basi per un monitoraggio strutturale. A tale scopo, sarà necessario sperimentare un'adeguata e proficua integrazione tra differenti tecniche e strumentazioni, inquadrando tutte le future sperimentazioni e misure nel medesimo sistema di riferimento assoluto.

Abstract

Terrestrial Laser Scanning Technology (TLS) allows to obtain the overall three-dimensional model of the investigated object with high accuracy. For this reason, such a technology is now increasingly applied in architecture as well. However, strongly fundamental is the choice of the most appropriate approach depending on the type of the object and the final purpose of the survey. Both the choice of the most suitable instrumentation and the use of specific data processing strategies are of concern.

This paper aims to test the use of TLS for studying structures with high value from architectural and cultural points of view: Asinelli Tower and Garisenda Tower (located in Bologna-Italy).

Both structures require to be carefully analyzed for controlling stability because of their dominant vertical dimension along with their significant slenderness. Those details make them particularly

sensitive. The survey was performed with a time-of-flight (pulsed laser) laser scanner and resulted in the overall model of the structure with sub-centimeter resolution. For the Asinelli Tower, the goal was the identification of general information about the geometry of the structure such as the height of the tower, the development of its longitudinal axis and its overhang. Furthermore, for the Garisenda Tower, the analysis was mainly focused on the selenitic area located at the base of the Tower: both the geometry of horizontal sections and the phenomenon of the "belly flops" were investigated. This last one is particularly evident on the East side.

All the analyses allowed to extract information about the actual geometry and attitude of the structure at the present. Strategies to enable repeatability of measurements and deeper analyses are planned for the future. This plan could put the base for a future structural monitoring, that requires the integration of different techniques with measurements referred to the same reference frame.

Introduzione

La tecnologia Laser Scanner Terrestre (LST) sfrutta il principio su cui si basano tutti gli strumenti a scansione, ovvero la possibilità di convertire la forma fisica di un oggetto in un elevato numero di punti di coordinate note. Le potenzialità offerte sono interessanti, soprattutto se confrontate con quelle tipiche di un rilievo metrico tradizionale: basti pensare alla rapidità e sostanziale facilità con cui è possibile ottenere, tramite LST, un modello 3D quasi continuo di qualsiasi superficie e a qualsiasi scala, dall'ambito architettonico fino a quello ambientale. Tali vantaggi, però, perdono il proprio valore se non vengono affiancati da un rigoroso approccio metrico, per il quale il concetto di accuratezza è determinante e deve essere commisurato alle finalità del rilievo in ciascuna sua fase, dalla scelta della strumentazione all'analisi finale del dato estratto. Questa prerogativa risulta imprescindibile soprattutto se l'oggetto del rilievo è costituito da strutture particolarmente delicate, come quelle a prevalente sviluppo verticale: esse richiedono un'attenta analisi strutturale e un appropriato monitoraggio nel tempo (Bertacchini et al., 2009).

A tal proposito, il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile (DIMEC) dell'Università di Modena ha avviato una proficua attività di ricerca applicata alle Torri degli Asinelli e della Garisenda (Bologna), le quali rappresentano due esempi concreti di questa problematica. Lo studio, ancora in itinere, ha come obiettivo principale quello di mettere a punto una metodologia di rilievo specifica e ripetibile nel tempo, a partire dalla definizione di un sistema di riferimento assoluto rispetto al quale svolgere anche le sperimentazioni future. Per entrambe le Torri è stata scelta la tecnologia Laser Scanner Terrestre come metodologia di base; essa è però stata finalizzata ad analisi geometriche condotte a due scale differenti: per la Torre degli Asinelli la sperimentazione è stata indirizzata all'estrazione di informazioni geometriche sull'assetto globale della struttura (quota e strapiombo), per la Garisenda, invece, l'obiettivo peculiare era rappresentato dall'analisi del comportamento anomalo assunto dalla fascia inferiore della Torre.

1. Acquisizione dei dati LST

Il rilievo delle Torri è stato eseguito nel mese di Luglio 2009 tramite lo strumento HDS ScanStation 2 di Leica Geosystems (Figura 1). Si tratta di un Laser Scanner Terrestre ad impulsi con campo di vista panoramico e in grado di acquisire decine di migliaia di punti al secondo con portata massima di 300 m. Per garantire la correzione automatica dell'errore di verticalità su entrambe le letture angolari, lo strumento è inoltre dotato di un compensatore bi-assiale ad alta precisione (risoluzione 1").

Per entrambe le Torri la fase di acquisizione è stata preceduta da un'accurata definizione delle posizioni di presa che, sulla base della geometria dell'opera e dell'accessibilità dei luoghi, ha portato all'adozione dello schema di Figura 2. In particolare, per acquisire dati sull'intero sviluppo verticale della Torre degli Asinelli sono state eseguite 15 stazioni di scansione, comprensive di punti di presa in quota (simboli in ciano, verde e fucsia). Da ciascuno di essi, le nuvole di punti sono state acquisite con passo di campionamento sulla superficie di interesse pari a 8 mm, uniforme



Figura 1 – Il Laser Scanner utilizzato: Scan Station 2.

in orizzontale e verticale. Le scansioni della Torre Garisenda sono state invece effettuate da tre punti di presa (simboli in rosso), senza prevedere stazioni in quota: in questo caso, infatti, l'attenzione è stata volta principalmente a studiare il comportamento dei primi quattro metri circa di altezza della struttura, corrispondenti alla zona ricoperta di lastre in gesso selenitico. Il passo di scansione è stato scelto in modo tale da acquisire una nuvola di punti in grado di descrivere tale porzione strutturale con sufficiente densità di informazioni (risoluzione spaziale di 1 cm circa). Infine, da ogni punto di stazione sono state acquisite le immagini, con la fotocamera integrata della ScanStation2, per la texturizzazione del modello 3D a punti.

La registrazione delle nuvole di punti acquisite da ciascuna stazione di presa è stata condotta primariamente utilizzando dei target retro-riflettenti che fungessero da punti omologhi facilmente riconoscibili dai software per l'elaborazione dei dati. Per quanto riguarda la Torre degli Asinelli, sono stati posizionati sulle pareti della struttura e sugli edifici

limitrofi 44 target da 3 pollici di carta retro-riflettente 3M di colore blu (Figura 3): per permettere l'esatta identificazione del punto centrale, essi sono stati inoltre dotati di un marker bianco avente diametro di 2.5 cm. Allo scopo di inquadrare il modello 3D della Torre in un sistema di riferimento assoluto esterno, si prevede inoltre la futura realizzazione di una rete topografica con l'acquisizione dei markers suddetti tramite strumentazione ad alta precisione. L'allineamento delle scansioni della Garisenda è stato realizzato mediante 6 target, tutti disposti esternamente rispetto alla struttura; sulla base di quanto già realizzato con successo per gli Asinelli, si applicheranno alle pareti delle mire idonee a resistere nel tempo, ma tali da non danneggiare le superfici murarie. Esse saranno oggetto di idonei rilievi topografici per poter effettuare in futuro dei controlli puntuali con un grado di accuratezza decisamente superiore a quello ottenibile da semplici scansioni delle facciate della Torre.



Figura 2 – Lo schema di acquisizione della Torre degli Asinelli (punti di presa in ciano, verde, fucsia) e della Garisenda (punti di presa in rosso).



Figura 3 – L'applicazione dei target retro-riflettenti alle pareti della Torre degli Asinelli.

2. Elaborazione dei dati LST

L'elaborazione dei dati relativi alla Torre degli Asinelli è stata condotta utilizzando il software Cyclone 6.0 di Leica Geosystems e si è articolata in varie fasi successive. Inizialmente, ogni nuvola di punti è stata filtrata manualmente per eliminare i dati ridondanti e/o non appartenenti alla struttura; le nuvole "pulite" sono state quindi allineate in un unico sistema di riferimento, generando

infine il modello 3D complessivo della Torre (Figura 4 a sinistra). Quest'ultimo è risultato costituito da oltre 150 milioni di punti e tale da descrivere in modo integrale ed accurato tutte le principali componenti strutturali. L'errore massimo di registrazione, inteso quale distanza tra le posizioni del medesimo vertice in nuvole di punti distinte, è sempre stato contenuto al di sotto del centimetro.

Il modello 3D della Garisenda (Figura 4 a destra) è stato invece ottenuto elaborando i dati con il software JRC 3D Reconstructor di Gexcel. Le nuvole grezze sono state pre-processate e pre-allineate utilizzando i target esterni, andando poi a perfezionarne la registrazione tramite l'algoritmo di ICP (*Iterative Closest Point*) del software. L'ICP ha innescato un processo iterativo che, ricercando in modo automatico le coppie di punti omologhi nella zona di sovrapposizione tra due scansioni, ne è andato a correggere la posizione relativa, fin tanto che le distanze tra i vertici scelti non risultassero inferiori all'errore massimo prestabilito. In questo modo, è stata ottenuta una precisione media di registrazione pari a 1.2 mm, valore ritenuto accettabile anche in relazione alla risoluzione spaziale delle scansioni. Si è quindi proceduto al filtraggio manuale del modello 3D a punti, andando ad eliminare rumore e *outliers*; infine è stato generato il modello a superfici continue della Torre (*Digital Surface Model*), adottando una modellazione multi-risoluzione a maglia triangolare. Tale algoritmo di *Meshing* ha creato delle superfici triangolari semplificate nelle aree più regolari, andando invece a descrivere le zone più complesse dal punto di vista geometrico tramite la creazione di mesh più dense.

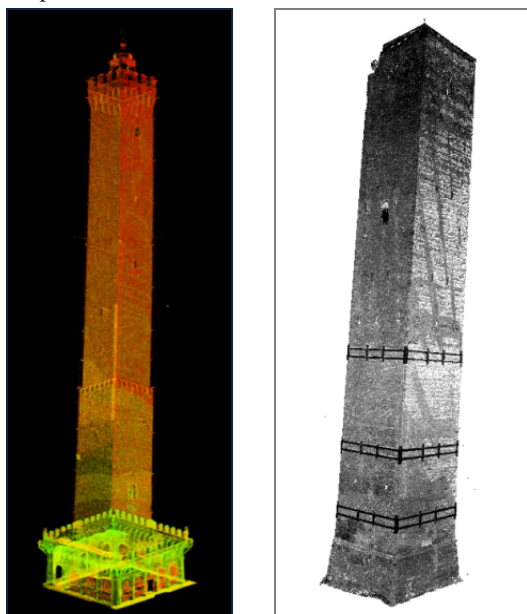


Figura 4 – Il modello 3D degli Asinelli (sinistra) e della Garisenda (destra).

3. Analisi dei dati LST

I modelli 3D generati hanno rappresentato il punto di partenza per estrarre le informazioni geometriche di interesse per entrambe le Torri. L'analisi dei dati relativi agli Asinelli è stata indirizzata alla determinazione dell'assetto geometrico globale della struttura, andando a valutare nello specifico sia l'altezza che lo sviluppo verticale del suo asse longitudinale.

Per quanto riguarda il primo dato, l'altezza della Torre degli Asinelli è stata misurata direttamente sul modello 3D ed è risultata pari a 97.38 m, intesi come distanza lungo l'asse longitudinale della torre tra il piano di calpestio in corrispondenza dell'ingresso e la base della sfera posizionata sulla sommità della cupola. La valutazione dello strapiombo, invece, è stata eseguita dopo aver esportato

delle sottili *slices* orizzontali dal modello 3D. Esse sono state quindi vettorializzate e analizzate in ambiente CAD (Figura 5), così da poter determinare la posizione del baricentro di ciascuna sezione.

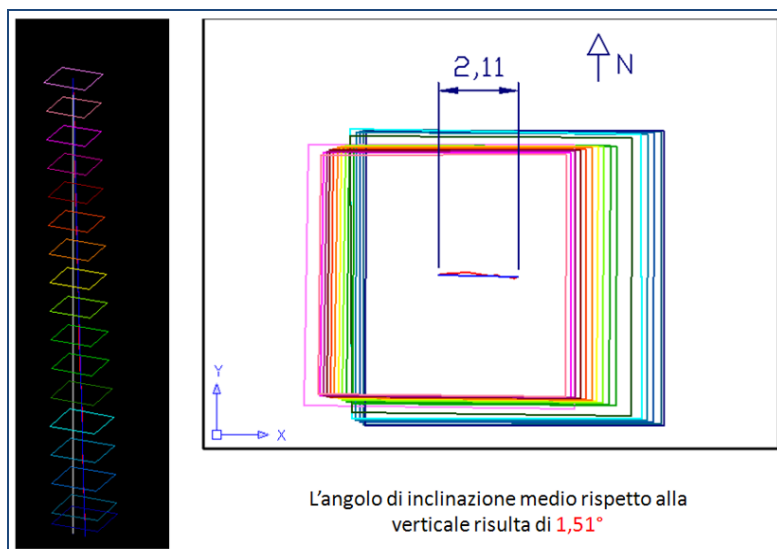


Figura 5 – Lo strapiombo della Torre degli Asinelli tra quota 10 m e la sommità.

La struttura è stata suddivisa in tre tronchi di piramide, per ciascuno dei quali è stato ricavato l'andamento dell'asse baricentrico mediante regressione lineare (Capra et al., 2011). La Torre è risultata significativamente inclinata solo verso Ovest, con un angolo di inclinazione medio rispetto alla verticale pari a 1.51°, a cui è corrisposto un fuori centro complessivo pari a 2.38 m. Se in modulo tali valori, confrontati anche con quelli pubblicati dal Cavani (Cavani, 1912-13-17-19), non sono stati giudicati pericolosi allo stato attuale per la stabilità statica della struttura, essi hanno comunque fornito un'ulteriore motivazione alla predisposizione di un sistema di monitoraggio degli eventuali spostamenti e/o deformazioni strutturali, soprattutto in virtù dell'altezza e della snellezza da cui è caratterizzata la Torre. Il primo passo in questa direzione sarà rappresentato dal rilievo topografico dei markers applicati alle pareti, così da effettuare controlli puntuali "inquadrati" all'interno un sistema di riferimento assoluto rispetto al quale saranno elaborati tutti i dati futuri.

Il modello 3D della Torre Garisenda è stato analizzato per indagare nello specifico il comportamento assunto dalla fascia selenitica inferiore della struttura; in particolare, dato che la Torre è caratterizzata da un'accentuata inclinazione verso Est, si è voluto valutare l'eventuale effetto di "spanciamento" presente sul lato orientale. Come è già stato precisato, sulla struttura non sono tuttora presenti dei target: nonostante se ne preveda l'applicazione per il monitoraggio nel tempo della Torre, il primo problema che è stato affrontato nel presente studio è stato quello di individuare un sistema di riferimento assoluto "richiamabile" anche in futuro. A tale scopo, sono stati individuati tre punti sulla facciata Est, in corrispondenza degli spigoli esterni della catena di contenimento inferiore (Figura 6): essendo ritenuti solidali alla struttura e privi di movimenti relativi significativi, essi sono infatti stati utilizzati per definire il sistema di riferimento per le future analisi. La terna di coordinate destrorsa (Figura 7) è stata scelta con origine nel punto 1, asse z secondo la verticale strumentale, asse x appartenente al piano passante per i tre punti e asse y univocamente determinato di conseguenza.

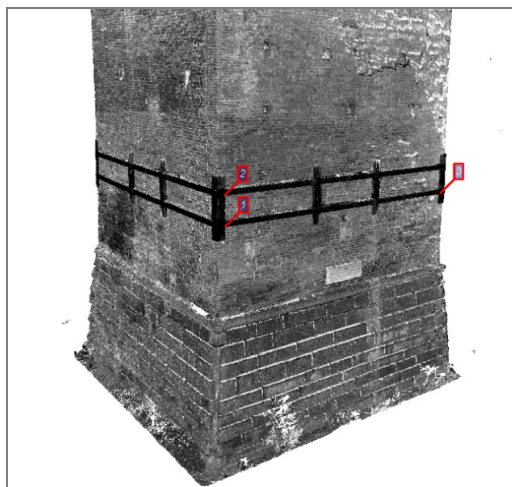


Figura 6 – Lo spigolo Sud-Est della Garisenda con l'indicazione dei tre punti scelti.

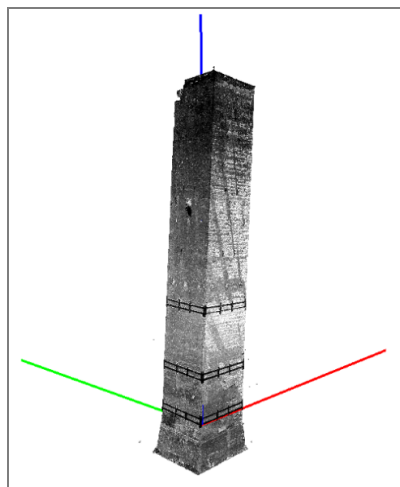


Figura 7 – Lo spigolo Sud – Est della Garisenda con il sistema di riferimento adottato.

Come per gli Asinelli, dal modello 3D sono state estratte delle sezioni orizzontali a diverse quote: in questo caso, però, sono stati sezionati solo i primi 4 m di altezza, estraendo 40 *slices* orizzontali con passo 10 cm l'una dall'altra. Inoltre è stata evitata la fase di vettorializzazione: le sezioni orizzontali sono infatti state esportate in ambiente CAD direttamente come polilinee 3D. Tale analisi ha evidenziato un comportamento singolare assunto dal lato orientale della fascia selenitica, effetto particolarmente apprezzabile se confrontato con l'assetto geometrico dei lati esposti a Nord, Ovest e Sud. Mentre questi ultimi presentano, procedendo dal basso verso l'alto, una costante ed omogenea inclinazione della propria parete verso l'interno della struttura, il lato orientale assume un'inclinazione decisamente minore e non omogenea su tutta la lunghezza della facciata.

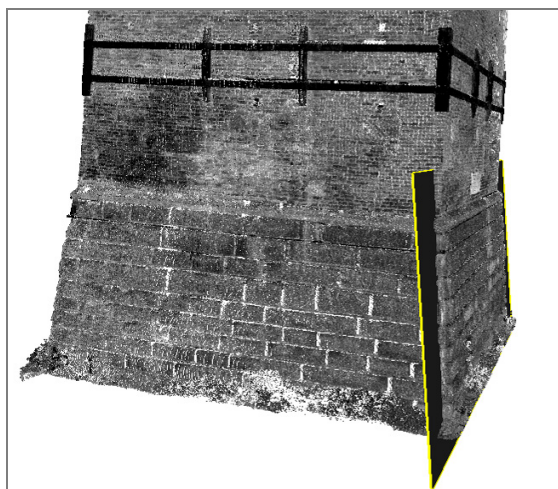


Figura 8 – Il piano di best fit del lato Est.

Si è dunque voluto procedere con un'indagine più approfondita di tale effetto e a questo scopo è stato utilizzato l'algoritmo di *inspection* del software JRC 3D Reconstructor. Esso è in grado di calcolare le distanze relative tra una nuvola di punti e una superficie di riferimento, distanze misurate lungo la normale a ciascun triangolo della mesh. Nel caso in esame, per ciascun lato della Torre sono stati individuati quattro punti in corrispondenza degli spigoli della fascia selenitica e, a partire da essi, è stato generata una superficie piana: come è evidente dalla Figura 8, tale piano risulta approssimare l'andamento complessivo di ciascuna parete. I quattro piani di *best fit* sono stati quindi traslati parallelamente a se stessi di 50 cm verso l'interno della Torre e

assunti quali superfici di riferimento, rispetto alle quali effettuare l'*inspection* delle nuvole di punti corrispondenti alle quattro facciate. Tali punti sono stati quindi colorati in base alle distanze misurate, sempre positive in seguito alla traslazione del piano, e secondo la medesima scala

cromatica: si è assunto 50 cm come distanza minima (colore blu) e 70 cm come massima (colore rosso). Il colore blu evidenzia quindi i punti che si trovano lungo il piano di *best fit* della parete, mentre procedendo verso la colorazione rossa vengono evidenziati eventuali fenomeni geometricamente anomali rispetto a tale piano.

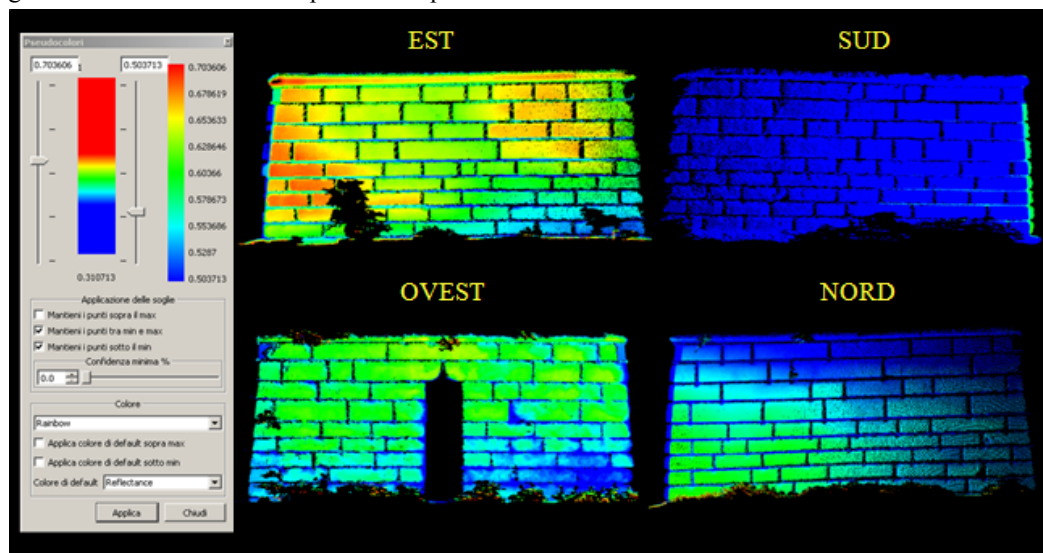


Figura 9 – I risultati dell'inspection: le quattro facciate della fascia selenitica sono colorate in base alla distanza dal proprio piano di riferimento, dal blu (distanza di 50 cm) al rosso (distanza di 70 cm).

Analizzando i risultati riportati in Figura 9 è stato confermato il comportamento anomalo del lato Est della fascia selenitica: la colorazione, molto meno omogenea rispetto a quella degli altri lati, ha evidenziato la presenza di scostamenti dal piano di riferimento con picchi massimi dell'ordine di 20 cm (colore rosso) in corrispondenza dello spigolo Sud-Est e della parte alta verso Nord. Tali due zone sono quindi risultate oggetto di un significativo fenomeno di “rigonfiamento”, inteso come anomalia geometrica rispetto ad un assetto teorico, la cui entità suggerisce anche per questa Torre la predisposizione di un idoneo sistema di monitoraggio futuro.

Conclusioni

La sperimentazione posta finora in essere ha dimostrato che l'utilizzo della tecnologia Laser Scanner Terrestre può essere correttamente finalizzato all'estrazione di informazioni relative all'assetto geometrico strutturale, a patto però che l'approccio adottato risulti metricamente rigoroso. Ciò appare imprescindibile soprattutto se si ha a che fare con strutture alte e snelle, come le Torri degli Asinelli e della Garisenda, oggetto del presente studio. Sia l'analisi geometrica globale applicata alla prima, che quella relativa alla fascia selenitica della seconda, hanno infatti evidenziato la necessità di predisporre un adeguato sistema di monitoraggio che controlli nel tempo il “comportamento” strutturale. Tali osservazioni dovranno, in particolare, registrare le variazioni di strapiombo della Torre degli Asinelli e l'andamento degli spancamenti presenti sul lato orientale della Garisenda, in corrispondenza della sua fascia inferiore, che possono essere letti come anomalie geometriche rispetto ad assetti teorici. La presente ricerca è dunque stata un interessante punto di partenza e dovrà proseguire nella direzione di una proficua integrazione di tecniche e strumentazioni differenti, inquadrando tutte le analisi future nel medesimo sistema di riferimento. A questo scopo, e per effettuare controlli puntuali ad alta precisione, saranno utilizzati i marker a parete presenti sugli Asinelli e ne saranno posizionati di analoghi sulla superficie della Garisenda.

Bibliografia

- Bertacchini, E., Boni, E., Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M. (2010), "Terrestrial laser scanner for surveying and monitoring middle age towers", *Proceedings of XXIV FIG International Congress 2010* (ISBN 978-87-90907-87-7)
- Bertacchini, E., Boni, E., Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M. (2009), "Rilievo laser scanner per lo studio e l'analisi di strutture a sviluppo prevalentemente verticale: Torre Asinelli (Bologna), Torre Ghirlandina e della Sagra di Carpi (Modena)", *Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA09*
- Bertacchini, E., Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M. (2008), "Il Monitoraggio della Torre civica di Modena detta della 'Ghirlandina'", *Atti Convegno Nazionale SIFET08*
- Bertacchini, E., Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M. (2008), "Il rilievo laser scanner 3D della Torre Campanaria della Pieve di Santa Maria in Castello, detta La Sagra", *Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA08*
- Capra A., Bertacchini E., Castagnetti C., Dubbini M., Rivola R., Toschi I. (2011), "Rilievi Laser Scanner per l'analisi geometrica delle torri degli Asinelli e della Garisenda", *INARCOS*, 719: 35-42
- Castagnetti C., Bertacchini E., Boni E., Capra A., Dubbini M. (2011), "Il laser scanning terrestre per l'analisi di edifici di interesse storico ed artistico", *Geomatica – Le radici del futuro, Tributo a Sergio Dequal e Riccardo Galetto*, 99-107 (ISBN 88-901939-6-4)
- Castagnetti, C., Cielo, R. (2009), "Il rilievo laser scanner 3D della villa romana di Montegibbio (Sassuolo, MO)", *Collana Quaderni di Archeologia dell'Emilia Romagna* (ISSN 1593-2680)
- Cavani F. (1912), *Sulla pendenza e sulla stabilità della torre degli Asinelli di Bologna*, Bologna
- Cavani F. (1913), *Movimenti della sommità rispetto alla base della torre degli Asinelli*, Bologna
- Cavani F. (1917), *Sulla pendenza delle principali torri di Bologna, Modena e Pisa*, Bologna
- Cavani F. (1919), *Su alcune questioni relative alla pendenza delle torri*, Bologna

Estrazione di DTM da immagini satellitari WorldView-1: procedure per la classificazione degli edifici

Eleonora Bertacchini, Alessandro Capra, Isabella Toschi

Università di Modena e Reggio Emilia, DIMeC, Strada Vignolese 905, 41125 Modena (MO)

Abstract esteso

L'utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione per l'estrazione di Modelli Digitali tridimensionali del Terreno (DTM) e della Superficie (DSM) offre oggi allettanti potenzialità, legate soprattutto a vantaggi quali tempi di acquisizione e costi di realizzazione abbastanza contenuti. Perché tale metodologia possa rispondere pienamente alle esigenze di molti settori applicativi, in primis a quella di conoscere e monitorare nel tempo la morfologia del terreno, è necessario che l'informazione altimetrica estratta presenti almeno due requisiti basilari: un'adeguata accuratezza del dato metrico e la rimozione dallo stesso del "rumore" dovuto agli elementi in elevazione. La presente sperimentazione, volta a testare entrambe le suddette condizioni, nasce in collaborazione con Planetek Italia, che ha gentilmente fornito al Laboratorio di Geomatica due immagini pancromatiche WorldView-1 (risoluzione spaziale media di circa 0.60 m) acquisite in modalità stereoscopica e la suite ERDAS Imagine 2011. L'area di studio scelta si estende per circa 100 km² nella zona dei colli Albani, a Sud-Est di Roma: si tratta di un territorio nel quale, a una copertura del suolo varia e complessa, si associa anche un interessante assetto morfologico.

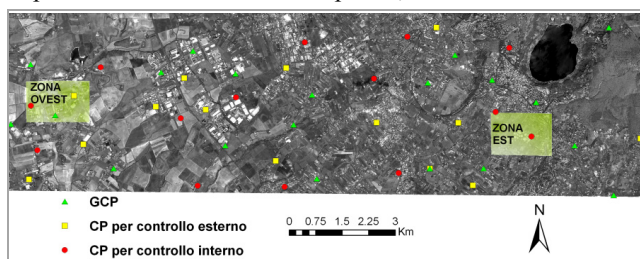


Figura 1 – L'area di studio, GCP e CP.

ETRF2000 (*European Terrestrial Reference Frame*) con precisione centimetrica; le quote ortometriche sono state calcolate con il software Verto2mila (ITALGEO99), fornito dall'IGM (Istituto Geografico Militare). La correzione geometrica delle immagini, necessaria per eliminare le deformazioni spaziali dovute al sistema e all'oggetto dell'acquisizione (Toutin, 2004), è stata condotta con ERDAS-LPS, utilizzando sia il modello rigoroso (*Orbital Pushbroom modeling*) che quello polinomiale in esso implementati. Per entrambi sono stati effettuati 4 test di orientamento, utilizzando di volta in volta un numero crescente (5-10-15-20) di *Ground Control Points*, GCP, cercando sempre di ottenerne una distribuzione omogenea nello spazio. Sono stati quindi analizzati i RMSE (*Root Mean Square Errors*) su 14 *Check Points* (CP di colore rosso in Figura 1) a partire dai report generati dal software in ciascun test eseguito. I risultati hanno mostrato che, già a partire dall'utilizzo di 5 GCP, entrambi i modelli sono caratterizzati da un'accuratezza plano-altimetrica confrontabile con la risoluzione spaziale delle immagini (c.a. 0.60 m); in particolare, l'impiego di 20 GCP permette una stabilizzazione dei residui su valori intorno a 0.40 m. E' stata inoltre effettuata una convalida a posteriori dell'accuratezza del modello fotogrammetrico orientato con 20 GCP: a tale scopo, sono stati riconosciuti su di esso ulteriori 14 CP (di colore giallo in Figura 1),

I 48 punti necessari per l'orientamento e la valutazione dell'accuratezza ottenuta (Figura 1) sono stati acquisiti con sistema GPS (*Global Positioning System*) in modalità RTK (*Real Time Kinematic*) con correzioni derivate dalla rete di stazioni permanenti ITALPOS della Regione Lazio. Sono state così ottenute le coordinate

confrontando le coordinate degli stessi con quelle misurate tramite rilievo GPS. Il modello rigoroso è apparso maggiormente accurato (RMSE inferiori a 0.50 m), nonostante anche la correzione polinomiale abbia mostrato residui di orientamento confrontabili con la risoluzione spaziale media delle immagini. L'estrazione automatica del DSM è stata effettuata con il modulo ERDAS-eATE a partire dal modello fotogrammetrico orientato con 20 GCP. Il DSM estratto in formato GRID con risoluzione pari a 1 m (Cilloccu et al., 2009) è stato quindi convalidato tramite il software Surfer 9.0, stimando la differenza altimetrica tra le quote del modello digitale estratto e le corrispondenti quote dei restanti punti. Le statistiche hanno evidenziato RMSE in quota pari a circa il doppio della dimensione media del pixel immagine ed ulteriormente ridotti (RMSE inferiori a 0.80 m) se non vengono presi in considerazione punti sui bordi dell'immagine (Crespi et al., 2009).

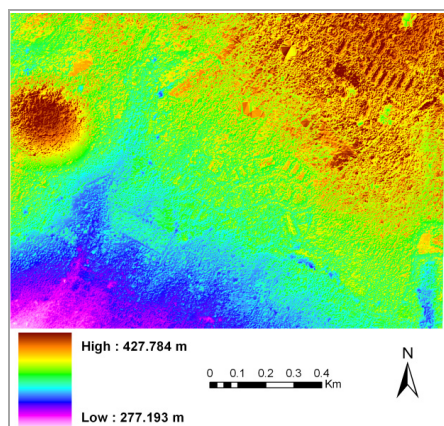


Figura 2 – Il DSM della zona Est

Inoltre, si sono sperimentati gli algoritmi per la classificazione degli edifici disponibili nel software ERDAS con quelli di un software dedicato alla classificazione *object oriented* delle immagini satellitari (eCognition Developer vs. 8.64.1), utilizzando per l'orientamento 20 GCP e il modello rigoroso, fisicamente basato. A questo scopo, sono state individuate due aree campione: la “zona Ovest” con carattere prevalentemente industriale e la “zona Est” di vocazione residenziale (Figura 1). Il primo approccio è stato condotto utilizzando l'algoritmo di classificazione automatica di ERDAS-eATE, agente contestualmente alla fase di estrazione del DSM. Esso si basa sulla definizione da parte dell'utente di parametri di forma, quali area, altezza e angolo di discontinuità, diversificati nei due casi in esame, per meglio rispondere alle specificità di ciascuno di essi. La seconda metodologia valutata ha richiesto una fase preliminare di classificazione *object oriented* delle due immagini originali, prima dell'estrazione del DSM. Impostati i parametri desiderati e realizzata la classificazione, ai fotogrammi è stata applicata una maschera in corrispondenza degli oggetti riconosciuti quali “edifici”; dopo la fase di orientamento con metodo rigoroso, dalle immagini mascherate è stato infine estratto il modello digitale 3D con ERDAS-eATE. I risultati ottenuti con i due approcci sono stati confrontati dopo aver effettuato una differenziazione altimetrica tra il DSM delle due zone campione (in Figura 2 quello della zona Est) e i due modelli digitali “depurati” dagli edifici. Sovrapponendo i raster delle differenze (DSM - DTM) sull'ortofoto realizzata a partire dal DSM convalidato, è stato possibile valutare qualitativamente gli edifici riconosciuti e gli errori commessi dalle due procedure. Tale analisi ha evidenziato che entrambi gli approcci mostrano potenzialità interessanti e ulteriormente migliorabili. Sicuramente, poter utilizzare un classificatore nella fase di estrazione del modello digitale tridimensionale, agevola e snellisce notevolmente il processo complessivo di estrazione del DTM. Abbinare all'estrazione del modello una preliminare classificazione degli oggetti in elevazione con software dedicato, richiede uno sforzo maggiore in termini di costi e tempo, ma potenzialmente può portare a risultati migliori.

Bibliografia

- Cilloccu F., Dequal S., Brovelli M.A., Crespi M., Lingua A. (2009), *Ortoimmagini 1:10.000 e modelli altimetrici – Linee Guida*, Collana di documenti CISIS
- Crespi M., Colosimo G., Fratarcangeli F., Jacobsen K., Pieralice F. (2009), “Valutazione dell'accuratezza del DSM estratto da una stereo coppia WorldView-1”, *Atti XIII Conferenza Nazionale ASITA*, Bari 1-4/12/2009, 815-820
- Toutin T. (2004), “Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods (review paper)”, *International Journal of Remote Sensing*, 10: 1893-1924

Un nuovo modello radiometrico per l'identificazione di hot spot di incendi boschivi e come strumento di valutazione delle performance dei sensori in ambienti ad orografia complessa

Silvano Bertoldo (*), Lorenzo Corgnati (**), Giovanni Perona (***)

(*) Politecnico di Torino, Dipartimento di Elettronica, corso Duca degli Abruzzi 25, Torino
Tel. 0110904623, Fax 0115644200, e-mail silvano.bertoldo@polito.it

(**) Politecnico di Torino, Dipartimento di Elettronica, corso Duca degli Abruzzi 25, Torino
Tel. 0110904623, Fax 0115644200, e-mail lorenzo.corgnati@polito.it

(***) CINFAI, Consorzio Interuniversitario per la Fisica delle Atmosfere e delle Idrosfere
Tel. 0110904067, Fax 0115644200, e-mail giovanni.perona@envisens.com

Abstract

Il monitoraggio degli incendi boschivi presenta molte criticità dovute alla conformazione del territorio, alla copertura vegetativa e alla presenza di elementi naturali e artificiali che possono causare falsi allarmi. Inoltre, è spesso necessario disporre di uno strumento per valutare le performance di differenti sensori per scegliere il più adatto per le attività di monitoraggio da effettuare.

Al fine di migliorare le prestazioni di un sistema di monitoraggio degli incendi boschivi, e di fornire un'utilità di supporto nella scelta del sensore idoneo per le attività da svolgere, è stato sviluppato un nuovo modello radiometrico. Tale modello integra le caratteristiche climatologiche, ambientali, meteorologiche, orografiche e vegetative dell'area monitorata insieme alle specifiche tecniche dei sensori utilizzati. E' basato su un DEM e può essere personalizzato in relazione alle analisi che si intende effettuare, a particolari esigenze di monitoraggio oltre che sulle caratteristiche del territorio stesso da monitorare.

Nella modalità di impiego per l'identificazione di hot spot, il funzionamento è basato sull'analisi di un set di immagini multispettrali, rilevate da sensori a basso costo, e sulla definizione del migliore insieme di soglie per l'identificazione di un principio di incendio, risultato al quale si giunge in automatico in seguito ad una fase di training. Al fine di ridurre le false identificazioni è prevista dal modello la possibilità di applicare una maschera alle immagini rilevate, in modo da escludere dall'elaborazione ogni elemento i cui comportamenti radiometrici possono alterare le performance dell'algoritmo causando falsi allarmi.

Volendo invece valutare le performance dei sensori per le attività di monitoraggio è sufficiente conoscerne le specifiche tecniche ed integrarle nel modello, il quale fornisce un'indicazione della distanza alla quale un hot spot può essere identificato.

Il modello radiometrico in questione è la base del modulo di "hot spot detection" del sistema SIRIO (Sistema Integrato di Monitoraggio degli Incendi bOschivi), ideato e sviluppato dai ricercatori del Remote Sensing Group del Politecnico di Torino.

Abstract (ENG)

Forest fire monitoring presents lots of criticities due to territory orography, particular vegetation and natural and artificial elements which may cause severe false alarm and missing detection problems. Moreover it is always necessary to have a simple tool to evaluate the best sensor for specific monitoring activities.

In order to improve the forest fire monitoring systems and to give a valuable aid in experimental activities, aiming at innovative forest fires fight technologies and devices development and calibration, a new radiometric model has been developed.

The radiometric model evaluates the sensed scenarios by the integration of radiometric, climatologic, environmental, meteorological, orographic and vegetative characters with the sensors technical specifications. The model is based on a DEM and allows the tailoring of the identification method on the territory to be monitored.

When it is used in forest fire hot spots identification activities, the radiometric model evaluates the sets of multispectral images (related to the same scenario) to be processed, and automatically defines the best set of identification thresholds on the basis of the overall conditions. The system is thus capable in identification and localization of fire hot-spot pixels. Often, particular "non-dangerous" features and elements occur in sensors field of view. The radiometric behavior of these elements could affect the performances of the identification system. The algorithm features a masking tool in order to eliminate from the images the 'non dangerous' elements, thus reducing the false alarm rate and the computational load of the automatic procedure.

Knowing sensors technical specifications it is also possible to include them into the model which gives in output the distance limit at which a hot spot can be identified without problems.

The presented radiometric model is the basis of SIRIO, the system planned and developed by the researcher of Remote Sensing Group of the Politecnico di Torino. SIRIO optimizes performances and resources operating in wildfires fight in complex orography regions.

Introduzione

Gli attuali sistemi di monitoraggio degli incendi boschivi hanno raggiunto, negli anni, alti standard operativi e sono costituiti da integrazioni più o meno complesse di svariati tipi di sensori, sia satellitari che installati su piattaforme terrestri, operanti in diverse bande spettrali.

I sistemi di monitoraggio diretto, impiegati nell'area mediterranea e nelle zone alpine, risentono spesso di problemi legati alla copertura vegetativa, alle condizioni climatiche e alla presenza di elementi naturali e artificiali che possono generare falsi allarmi. Gli incendi che si sviluppano in ambienti naturali differenti presentano inoltre specifiche caratteristiche: fiamma ben visibile, rapida combustione delle piante resinose e stagionalità estiva se si sviluppano all'interno della macchia mediterranea, lungo periodo di diffusione nel sottosuolo prima della manifestazione di fiamma e stagionalità autunno-invernale se si sviluppano nei boschi alpini. Infine la complessa orografia delle regioni rende spesso difficoltose le procedure di monitoraggio a causa della presenza di valli, insenature, rientranze e montagne che possono limitare il campo di vista dei sensori.

Per questi motivi è necessaria, in fase di progettazione, un'attenta analisi dei sensori da utilizzare nei nuovi prototipi di sistemi di monitoraggio degli incendi boschivi e, al fine di ridurre i falsi allarmi e i mancati rilevamenti, una continua evoluzione della ricerca di nuove tecniche per identificare un principio di incendio (*hot spot*) con sufficiente tempestività e precisione da comunicare alle squadre di intervento l'allarme, prima che estensione ed intensità diventino pericolose.

In questo lavoro viene presentato un nuovo modello radiometrico che può essere utilizzato sia nella fase di identificazione degli hot spot come supporto ai sistemi di monitoraggio degli incendi boschivi, sia nella fase di progettazione di un nuovo apparato di monitoraggio, poiché costituisce uno strumento per la valutazione della scelta del sensore da utilizzare, in relazione alle caratteristiche degli incendi da monitorare e alle caratteristiche orografico-vegetative della zona di impiego.

Descrizione degli elementi del modello radiometrico

Considerando le varie fasi della combustione del legno (preriscaldamento, combustione gassosa, combustione solida) e le temperature che vengono raggiunte durante la nascita e lo sviluppo di un incendio boschivo e utilizzando la legge di Wien è possibile notare che si hanno le massime

emissioni di radiazione nelle regioni dello spettro elettromagnetico identificate come infrarosso termico (TIR, 6 μm - 14 μm), infrarosso medio (MIR, 1.7 μm - 6 μm) e in parte nell'infrarosso vicino (NIR, 0.78 μm - 1.7 μm).

Si è pensato quindi di realizzare il modello basandosi sulle leggi radiometriche e sul trasferimento delle radiazioni in atmosfera, nell'ipotesi di effettuare le procedure di monitoraggio utilizzando sensori da installare su piattaforme terrestri a basso costo, come termocamere commerciali o comuni macchine fotografiche reflex debitamente adattate alla visione nell'infrarosso.

Il modello radiometrico è costituito da quattro blocchi di input fondamentali: specifiche tecniche del sensore, parametri atmosferici, caratteristiche orografiche e vegetative dell'area da monitorare, modello dell'incendio che si intende identificare. Tutti i dati vengono integrati in un software che ricostruisce la geometria di riferimento e, sulla base delle leggi radiometriche, determina la massima distanza alla quale un determinato tipo di incendio può essere monitorato senza generare falsi allarmi o mancati rilevamenti, considerando di operare in condizioni ideali.

Partendo dalla modellazione dell'incendio vengono di seguito analizzati i quattro blocchi fondamentali di cui si compone il modello, utilizzando una termocamera come sensore, necessaria ad individuare gli incrementi di temperatura causati da un hot spot.

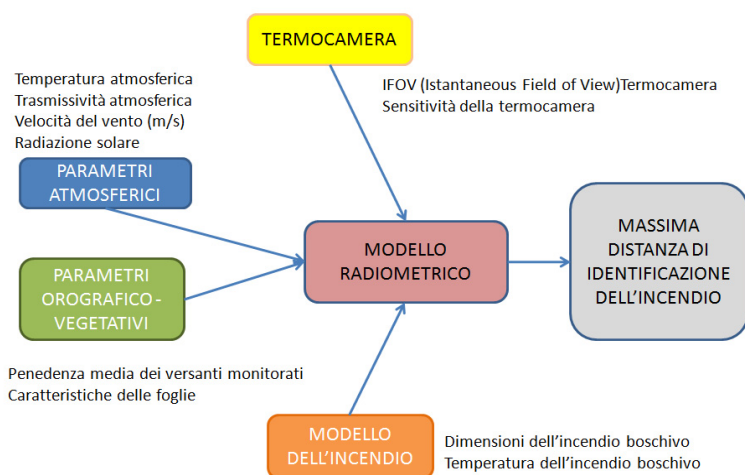


Figura 1 – Rappresentazione schematica del modello radiometrico.

La parete che rappresenta il modello dell'incendio si basa sulla classificazione degli incendi di Brown e Davis (Brown et. al, 1973).

Il fronte di fiamma è modellizzato come un corpo nero lambertiano, di forma rettangolare ad una temperatura T_{fire} variabile tra i 400 °C e i 1100 °C, per modellare tutte le fasi della combustione. Al fine di ottenere una stima quantitativa dell'estensione della parete che rappresenta il fronte di fiamma, si utilizzano due relazioni che, partendo dall'altezza delle fiamme, forniscono la lunghezza di fiamma. La *lunghezza di fiamma* è un concetto legato alla presenza di vento: le fiamme sono dirette verso l'alto solamente in assenza di aria (solamente in questo caso sarebbe rigorosamente corretto parlare di *altezza di fiamma*), mentre in caso contrario tendono ad inclinarsi e ad allungarsi nella direzione opposta a quella in cui proviene il vento. Si tratta pertanto di un concetto utilizzato in modo improprio, le cui equazioni sono quindi "prese in prestito", poiché non fornisce esattamente una misura della larghezza del fronte di fiamma. Risulta però utile avere a disposizione

questa informazione, poiché la parete considerata deve simulare l'estensione dell'incendio in un modo il più possibile simile ad una situazione reale.

L'altezza della parete corrisponde pertanto all'altezza delle fiamme in base alla classificazione degli incendi boschivi di Brown e Davis, mentre la larghezza è determinata osservando le descrizioni riportate nella medesima classificazione rapportate con i risultati forniti per la lunghezza delle fiamme.

Le relazioni utilizzate che legano l'altezza della fiamme (f_height) con la lunghezza (f_length) sono le seguenti (Bovio G., 1988)

$$\text{Intensità lineare dell'incendio} \quad I = 273 \cdot f_height^{2.17} \quad (1)$$

$$\text{Lunghezza di fiamma} \quad f_length = 0.45 \cdot I^{0.46} \quad (2)$$

Lo spessore della parete viene infine supposto infinitesimo poiché tutti i comportamenti radiativi dell'incendio vengono riportati in superficie dal momento che il modello non considera l'estensione in profondità dell'incendio.

Tipo di incendio	Altezza fiamma [m]	Lunghezza Fiamma [m]	Temperatura [°C]	Modello fronte di fiamma [m]
Hot spot	Non presenti	Non presenti	100 - 400	1 x 0.5
Sotterraneo	Non presenti	Non presenti	400	10 x 0.5
Di lettiera	Max 2	11.87	600 - 1100	10 x 2
Strato erbaceo / sottobosco	1 – 4	5 – 23	600 - 1100	20 x 2

Tabella 2 – Caratteristiche degli incendi e relativo modello del fronte di fiamma utilizzato nel modello radiometrico.

Il sensore considerato è costituito da una termocamera. E' importante conoscere alcune sue specifiche tecniche ed in particolare l'IFOV (*Istantaneous Field Of View*, campo di vista istantaneo), elemento fondamentale per la definizione della geometria del modello. Tale valore è tipico di ciascuna termocamera e determina la porzione di territorio monitorata istantaneamente e rappresentata su un singolo pixel della mappa termica acquisita dal sensore.

Tra la parete che rappresenta il fronte di fiamma dell'incendio e il sensore è presente uno strato d'aria caratterizzato da determinati parametri atmosferici. Per la modellizzazione dello strato d'aria interposto, sono necessarie la conoscenza della trasmissività atmosferica τ , considerata pari a 0.88 (Manuale dell'operatore per la termocamera ThermovisionTM A40M), dell'irraggiamento solare, pari a 833 W/m² alle latitudini in corrispondenza dell'Italia (Dawson T., 2005), della temperatura dell'aria e della velocità del vento, poiché come è noto, in presenza di forte vento, sono altamente favoriti sia l'innesco che la propagazione degli incendi.

La temperatura dell'aria può essere determinata considerando una media dei valori comunemente raggiunti in primavera-estate nelle regioni mediterranee ed alpine o prealpine. In seguito ad una serie di ricerche si è stabilito che un valore di T_{air} pari a 25 °C rappresenta una temperatura alla quale, in condizioni ottimali, può generarsi un principio di incendio.

L'ultimo gruppo di dati necessario per completare l'insieme di informazioni necessarie a costruire il modello è determinato dalle caratteristiche orografico-vegetative della porzione di territorio da

monitorare. Disponendo di un DEM è possibile determinare la pendenza media dei versanti osservati dai sensori. Si tratta di un'analisi preliminare che può essere eseguita disponendo di un qualsiasi DEM poiché, ai fini del comportamento del modello è necessario esclusivamente il valore di pendenza media. Nel caso di orografia complessa (come nelle vallate alpine o nelle coste in cui prevale la mappa mediterranea) è richiesto pertanto un'attento studio della zona da monitorare, prima di poter applicare correttamente il modello.

La conoscenza del tipo di vegetazione e, in particolare del tipo di foglie delle piante della zona (sono importanti le dimensioni e l'inclinazione delle foglie rispetto ai raggi solari), consente di determinare la temperatura dell'area vegetativa monitorata dal sensore.

Costruzione del modello

Una termocamera, in generale, è uno strumento che rileva le radiazioni termiche emesse dall'oggetto sotto osservazione. Tali radiazioni provengono anche dall'area circostante l'oggetto e vengono riflesse dalla superficie stessa dell'oggetto monitorato: tutte insieme vengono quindi attenuate dall'atmosfera presente nel percorso di misurazione. A queste radiazioni deve inoltre aggiungersi la radiazione proveniente dall'atmosfera stessa.

Al fine di comprendere il funzionamento della termocamera e le modalità di calcolo della temperatura dell'area monitorata utilizzate nel modello radiometrico, si può fare riferimento allo schema in figura 3.

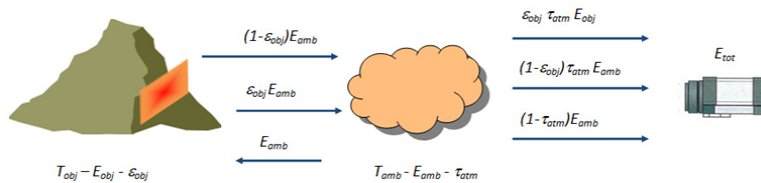


Figura 3 – Schema di funzionamento della termocamera e delle modalità di acquisizione dell'energia radiante da convertire in temperatura.

Considerando le emissività ε , la trasmittanza τ e le temperature T , i contributi di irradianza che giungono alla termocamera sono di tre tipi:

- 1- *emissione dell'oggetto (incendio)* pari a $\varepsilon_{obj} \tau_{atm} E_{obj}$;
- 2- *emissione riflessa proveniente dalle sorgenti ambiente* pari a $(1-\varepsilon_{obj}) \tau_{atm} E_{atm}$ dove $(1-\varepsilon_{obj})$ è la riflettanza dell'oggetto: in questa situazione, per semplicità, si suppone che la temperatura delle sorgenti che emettono radiazione, che viene poi riflessa dall'oggetto sotto osservazione, sia la stessa per tutte le superfici emittenti interne alla semisfera viste da un punto sulla superficie dell'oggetto, e che tale valore di temperatura sia esattamente quello dell'atmosfera; inoltre per ipotesi l'emissività dell'area circostante all'oggetto ε_{refl} è pari a 1, rispettando così anche la legge di Kirchhoff per corpi non assorbenti;
- 3- *emissione dell'atmosfera* pari a $(1-\tau_{atm}) E_{atm}$ dove $(1-\tau_{atm})$ è l'emissività dell'atmosfera.

Sulla base di questi tre termini è possibile scrivere la relazione generale di energia radiante ricevuta (E_{tot}), la quale attraverso la legge di Steffan-Boltzmann verrà convertita in temperatura.

$$E_{tot} = \varepsilon_{obj} \tau_{atm} E_{obj} + (1-\varepsilon_{obj}) \tau_{atm} E_{atm} + (1-\tau_{atm}) E_{atm} \quad (3)$$

Calcolata l'irradianza complessiva E_{tot} , (e quindi la corrispondente T_{tot}), per determinare il valore di temperatura associato ad un singolo pixel si suppone che il sensore effettui la media di tutta la radiazione incidente sulla sua superficie. Il seguente esempio serve per chiarire il concetto: se

l'incendio, osservato ad una certa distanza, occupa solamente metà dell'area definita dall'IFOV, e su tale area incide la radiazione dovuta ad una T_{tot} letta pari a 1000 °C, e il resto è tutto alla temperatura T_{leaf} pari a 20 °C, il valore T_{mis} osservato sul pixel corrispondente sarà pari a 510 °C.

Stabilite le dimensioni del fronte di fiamma dell'incendio dim_f e conoscendo l'IFOV della termocamera, tramite calcoli trigonometrici si calcola la minima distanza d alla quale la parete che simula l'incendio rientra completamente in un pixel della termocamera (per valori inferiori a d si suppone che l'incendio venga sempre identificato dal modello). Nel fare ciò si considera anche la pendenza media del versante monitorato. Conoscendo quindi la temperatura corrispondente all'irradianza totale e l'area occupata dall'incendio, si determina la porzione di area occupata sul pixel solamente da parte dell'incendio e si effettua la media delle temperature (T_{tot} e T_{leaf}) pesata opportunamente; questa operazione fornisce il valore di temperatura effettivamente letto sul singolo pixel.

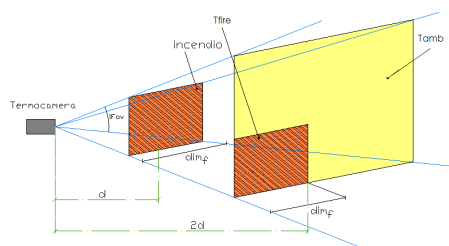


Figura 4 – Rappresentazione del calcolo della temperatura media rilevata dal sensore della termocamera.

$$T_{mis} = area_fire \cdot T_{fire} + (1 - area_fire) \cdot T_{leaf} \quad (4)$$

A questo punto, conoscendo il valore di temperatura medio misurato dalla termocamera e la minima distanza alla quale la parete dell'incendio rientra in un pixel, si aumenta la distanza considerandone i multipli ($2d$, $3d$, $4d$...); con questa operazione la porzione di area occupata dall'incendio si riduce progressivamente, così come il valore di temperatura che viene calcolato. Si procede ciclicamente fino a quando il valore di temperatura calcolato è superiore a 45 °C, identificato come estremo inferiore dei valori di temperatura utili per individuare un principio di incendio.

Il risultato così ottenuto è l'obiettivo del modello radiometrico: rappresentare cioè la massima distanza alla quale un certo tipo di sensore riesce ad individuare un incendio con determinate caratteristiche.

E' bene specificare che mentre la parete monitorata può avere una certa inclinazione, poiché rappresenta appunto un versante montuoso o collinare, si suppone sempre che il fronte di fiamma sia perfettamente parallelo rispetto al sensore della termocamera. Quest'ultimo occuperà quindi solamente una porzione dell'intera area di forma trapezoidale che viene monitorata considerando l'IFOV della termocamera e la pendenza del versante.

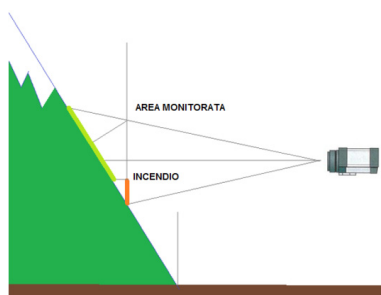


Figura 5 – Inclinazione del versante monitorato e del fronte di fiamma dell'incendio, come considerato nel modello radiometrico.

E' altrettanto importante sottolineare come, mentre la temperatura dell'incendio (T_{fire}) è determinata in base ai valori raggiunti durante le fasi della combustione, quella dell'area monitorata (T_{leaf}) viene calcolata utilizzando il cosiddetto modello di calcolo della *Dry Leaf Temperature*, necessario per ottenere la temperatura delle foglie in determinate condizioni di vento, irraggiamento solare, dimensione media delle foglie, inclinazione media delle foglie rispetto alla direzione dei raggi solari, e condizioni di bassa umidità atmosferica.

Applicazioni

Conoscendo le specifiche del sensore e le caratteristiche della zona monitorata, il modello radiometrico descritto può essere utile innanzitutto per determinare la massima distanza alla quale un principio di incendio può essere identificato.

Parallelamente può essere utilizzato per valutare le performance di termocamere di diverso tipo. Infatti, a parità di caratteristiche dell'incendio e di caratteristiche orografico-vegetative dell'area in cui si intende installare una termocamera per operazioni di monitoraggio, disponendo di sensori con diversi IFOV, è possibile determinare qual è il più adatto ad essere impiegato nel sistema da installare.

Una seconda modalità di impiego sfrutta invece proprio l'inclinazione media della parete monitorata. E' possibile infatti valutare la differenza di temperatura che la termocamera misurerebbe per un determinato tipo di incendio, ad una certa distanza, tra il caso in cui la parete monitorata sia verticale (quindi perfettamente parallela rispetto al sensore) e quello in cui sia inclinata (come è nella realtà). La differenza ottenuta serve per compensare la diminuzione della temperatura media misurata. Tale diminuzione, dovuta alla crescente porzione di area che rientra nella misurazione della temperatura media effettuata per ciascun pixel, è sempre maggiore all'aumentare dell'inclinazione del versante, e rende più difficile identificare incendi di dimensioni contenute come sono gli hot spot.

Il modello radiometrico è stato integrato nel modulo di *Hot Spot Detection* del sistema SIRIO (Sistema Integrato di Rilevamento degli Incendi bOschivi) ideato e sviluppato dai ricercatori del Remote Sensing Group del Politecnico di Torino e realizzato come prototipo in collaborazione con Envisens Technologies srl, spinoff del Politecnico di Torino, e SVM srl di La Spezia. In questo contesto il modello radiometrico è stato modificato prevedendo la possibilità di adattare dinamicamente la soglia di temperatura minima alla quale si considera identificato un incendio (trattandosi di identificazione di principi di incendio si è considerato come incendio standard da individuare l'hot spot della tabella 1), ed è stata aggiunta la possibilità di mascherare zone i cui comportamenti radiativi causerebbero un eccessivo numero di falsi allarmi.

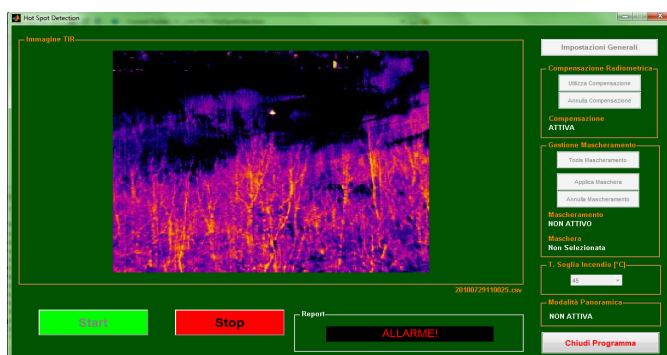


Figura 6 – Interfaccia del modulo di Hot Spot Detection del sistema prototipale SIRIO.

Sempre nell'ottica di ridurre i falsi allarmi è stato anche integrato nel sistema prototipale SIRIO un modulo denominato *False Alarm Reduction* basato sull'analisi di immagini nel vicino infrarosso, per il quale si stanno studiando possibili applicazioni e modifiche del modello radiometrico qui presentato, al fine di utilizzarlo in modo completo su un set di immagini multispettrali della stessa zona monitorata.

Risultati sperimentali

Nella figura 6 sopra riportata, oltre all'interfaccia del modulo di *Hot Spot Detection* del sistema sperimentale SIRIO si può notare un focolaio rilevato durante il primo periodo di sperimentazione, nell'ambito di un progetto in collaborazione con la Regione Piemonte, nell'anno 2008, in ambiente alpino in provincia di Torino. Il fuoco identificato si trovava a circa 2 km di distanza dal sensore ed è stata misurata una temperatura superiore ai 60 °C. Considerando che le dimensioni del fuoco erano circa 1m x 1m e che l'area monitorata era inclinata di circa 35° rispetto all'orizzontale si può affermare che l'incendio è stato identificato correttamente con un buona misura della temperatura. Vengono ora presentati i risultati di alcune simulazioni di applicazioni (differenti dall'impiego all'interno del sistema SIRIO) del modello radiometrico. La tabella 7 contiene i dati generali che sono stati utilizzati. Gli ulteriori dati specifici per ogni applicazione descritta nel seguito, saranno citati di volta in volta.

Temperatura atmosferica	25 °C
Trasmissività atmosferica	0.88
Vento	1 m/s (valore comune per spazi aperti non ventosi), (Dawson T., 2005),
Irraggiamento solare	833 W/m ²
Inclinazione media dei versanti monitorati rispetto all'orizzontale	40 °
Larghezza media delle foglie	0.1 m
Inclinazione media delle foglie rispetto all'irraggiamento solare	45 °
Emissività delle foglie	0.96 (Dawson T., 2005),
Tipo di incendio	Hot Spot, 1 x 0.5 m, 400 °C

Tabella 7 – Dati generali utilizzati nelle applicazione del modello radiometrico.

Nella tabella 8 sono presentati la massima distanza alla quale possono essere monitorati gli incendi con sei diverse termocamere commerciali, delle quali sono state considerate le specifiche tecniche. Si nota come all'aumentare dell'IFOV diminuisce la distanza.

Utilizzando questo modello è pertanto possibile scegliere in modo semplice la termocamera più adatta per specifiche esigenze di monitoraggio, realizzando un compromesso tra costi e funzionalità ricercate.

Modello della termocamera	IFOV [mrad]	Masima distanza di detection per un Hot Spot [m]
Fluke TiR 32 con teleobiettivo	0.63	3250
NEC TS9230	1.2	1490
FLIR A40M	1.3	1340
FLIR A320	1.36	1260
RayCam C. A 1884	2.2	600
NEC AVIO TVS500 EXz	2.35	520

Tabella 8 – Massima distanza di detection per modelli diversi di termocamere commerciali considerando il modello di hot spot.

La figura 9 mostra invece la variazione della temperatura misurata al variare della pendenza, per un modello di hot spot, fissata una distanza termocamera – incendio pari a 2 km e un IFOV della termocamera pari a 1.3 mrad (FLIR A40M). Si nota l'incidenza della pendenza del versante monitorato nella determinazione delle temperatura media misurata in un pixel: più la parete è parallela rispetto al sensore, maggiore è il valore di temperatura misurato.

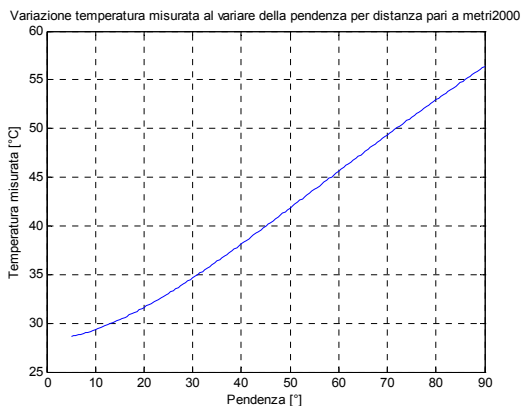


Figura 9 – Variazione della temperatura misurata al variare della pendenza.

Osservando la tabella 10 si nota, infine, come è importante ed utile utilizzare il modello radiometrico per effettuare una compensazione del valore di temperatura misurato considerando l'inclinazione dei versanti monitorati. E' infatti possibile osservare come, introducendo la compensazione dell'inclinazione, per il medesimo tipo di incendio, aumenta la distanza alla quale questo può essere identificato. La termocamera utilizzata è la FLIR A40M con IFOV pari a 1.3 mrad posta a 2 km dall'incendio. Sono stati considerati solamente il modello di hot spot e quello di incendio sotterraneo, gli unici utili per le operazioni di monitoraggio antincendi boschivi. Per gli altri tipi di incendio, essendo già manifestata la fiamma, le operazioni di monitoraggio preventivo sono superflue.

Tipo di incendio	T_{mis} [°C] senza compensazione dell'inclinazione	T_{mis} [°C] con compensazione dell'inclinazione
Hot spot	36	52
Incendio sottettaneo	49	92

Tabella 10 – Temperatura misurata, secondo il modello radiometrico, sia con che senza la compensazione dell'inclinazione della parete monitorata.

Conclusioni e sviluppi futuri

In futuro si procederà con lo sviluppare nuove applicazioni e studiare nuovi adattamenti del modello radiometrico per sensori non termici e operanti nelle bande spettrali dell'infrarosso e, soprattutto, nel vicino infrarosso. Infatti i CCD delle comuni macchine fotografiche reflex sono già di loro sensibili al vicino infrarosso, qualora non vengano opportunamente trattati in modo tale da filtrare tutte le componenti spettrali non appartenenti alla banda del visibile. Si procederà in questa direzione con l'obiettivo di utilizzare sempre più sensori a basso costo nei sistemi di monitoraggio antincendio.

Si procederà inoltre con la realizzazione di un modello dell'incendio con caratteristiche sempre più simili a quelle reali, considerando sia articoli accademici già pubblicati, sia esperienze dirette nelle attività di spegnimento degli incendi svolte dalle istituzioni preposte.

Punto fondamentale nell'automatizzazione completa del modello sarà poi costituito dalla possibilità di stabilire la pendenza dei versanti monitorati direttamente da parte del modello radiometrico, il quale integrerà le funzioni opportune che lavoreranno direttamente su un DEM del territorio monitorato che verrà fornito in input al software.

Infine, per poter fornire una buona valutazione delle performance verranno eseguite analisi su larga scala, valutando sia incendi in ambienti mediterranei, che in ambienti alpini, incendi che presentano caratteristiche completamente differenti ma che costituiscono sempre un grosso problema per quanto riguarda le operazioni di monitoraggio e tempestiva identificazione.

Riferimenti bibliografici

Bovio G. (1988) Come proteggersi dagli incendi boschivi. Regione Piemonte, Torino
 Brown A.A., Davis K.P. (1973), *Forest Fire: Control and use*, McGraw-Hill, New York
 Dawson T. (2005), *Plant Physiological Ecology course documentation*, Integrative Biology, University of California, Berkeley
 Manuale dell'operatore per la termocamera ThermovisionTM A40M, FLIR Systems

Metodologia GIS per il rilevamento dei Geositi

Sara Bertozzi, Elvio Moretti

Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo" Dipartimento di Scienze di Base e Fondamenti:
Matematica, Informatica, Fisica, Chimica, Epistemologia e Storia della Scienza Campus Scientifico Sogesta
61029 Urbino (PU), Phone +39 0722304277, Fax +390722304220
e-mail: sara.bertozzi@uniurb.it, elvio.moretti@uniurb.it

Abstract

We would like to propose a new methodological approach that can be used in different geological and geomorphological contests to analyze Geosytes through the realization of vectorial maps and the construction of relational database. General finalities of the project are to represent the territory in all its different aspects in a way the most possible close to reality. Landscape analysis happens through a process of census and integration among elements that characterize it enhancing scientific and environmental meanings with use of a particular form produced by ISPRA turning it into a relational database connected with a specific GIS cartography. This standardized methodology is based on Minimal Land Unit, that define in a unique way the Geosyte with its areal characteristics, as units of 1 Km². With use of a square grid every goods can be placed in one or more square of the grid. Every Geosyte can be identify both spatially through the square Km where it is and in its descriptive features through the relational database associated. Area analysis could be deepen with some thematic maps, and especially land use with Biohab, a methodology for survey, surveillance and monitoring of habitats that is standardized at European level, based on the classification of Raunkiaer plant life form. Really important is the use of a global georeferencing system, WGS84, integrated with UTM, a projected system that allow areal elaborations too. Geosyte study is completed by tridimensional elaborations and marking out some paths based on precises travelling times with use of particular Arcgis tools, always taking into account interoperability concept and an easy access for geoturistic purpose through an interaction with open source site as Google Earth, Arcgis Explorer and use of Qrcode. Finally there is a valuation of some specify study case that allow the application of this methods in heterogeneous situations, as Temporal Geosytes, marine areas and archeological areas.

Riassunto

Si intende proporre un nuovo approccio metodologico applicabile in diversi contesti geologici e geomorfologici, per una valutazione dei geositi attraverso la realizzazione di carte vettoriali e la costruzione di database relazionali. Le finalità più generali sono quelle di rappresentare un territorio nei suoi molteplici aspetti e darne una percezione il più possibile vicino alla realtà. L'analisi del paesaggio avviene attraverso un processo di censimento ed integrazione degli elementi che lo caratterizzano valorizzandone il significato scientifico e di rappresentatività ambientale tramite l'utilizzo della scheda proposta dall'ISPRA ma trasformata in un database relazionale collegato ad una specifica cartografia GIS. La metodologia standardizzata prevede delle Aree Minime Campionabili, che definiscano in modo univoco il geosito con le sue caratteristiche areali, definite in unità di 1 km², utilizzando una rete chilometrica in cui ogni bene sarà collocato in uno o più quadrati della maglia. Ogni geosito viene così identificato sia spazialmente attraverso il km² in cui ricade, sia nelle sue caratteristiche descrittive attraverso il database relazionale associato. Si approfondisce poi l'analisi dell'area in considerazione tramite una serie di cartografie tematiche, in particolare quella dell'uso del suolo attraverso l'utilizzo del Biohab, una metodologia di

rilevamento, sorveglianza e monitoraggio del paesaggio standardizzato a livello europeo, basata sulla classificazione delle forme di vita delle piante di Raunkiaer. Fondamentale è l'utilizzo di un sistema di georeferenziazione a scala globale WGS84 integrato ad un sistema di proiezione UTM che consente anche elaborazioni areali. L'analisi dei Geositi viene completata da elaborazioni tridimensionali e dalla definizione di tracciati identificati secondo dei precisi tempi di percorrenza utilizzando specifici tools di Arcgis di ESRI, tenendo sempre in considerazione il concetto di interoperabilità ed il facile accesso a scopo geoturistico attraverso l'interazione con siti open source quali Google Earth, Arcgis Explorer e l'utilizzo del Qrcode. Si valutano infine casi di studio particolari che consentano l'applicazione del metodo in situazioni eterogenee, quali i Geositi Temporal, aree prevalentemente marine o aree archeologiche.

Introduzione

Non sempre la conoscenza del patrimonio geologico nazionale è completa ed adeguata, anche se negli ultimi decenni sicuramente è cresciuta parallelamente alla strategia intrapresa dalle autorità nazionali, responsabili dell'attuazione delle politiche di conservazione della natura, attraverso la nuova istituzione di parchi, riserve naturali, reti ecologiche ecc. Molto spesso però, anche a livello internazionale, è stata lamentata una assenza di strategia comune per arrivare a dare corso ad un inventario sistematico del patrimonio geologico (Dingwall 2000; Brilha 2002) e tanto meno a delle norme di gestione adeguate per evitare molto spesso la distruzione definitiva di geositi di rilevanza scientifica, spesso di spessore internazionale.

Riconoscere il *"Geoheritage"* come patrimonio culturale comporta per il territorio possedere una risorsa in più su cui costruire lo sviluppo locale senza esercitare pressioni ed impatti con i relativi problemi legati ad inquinamento e degrado. Spesso la conoscenza del patrimonio ambientale può essere utilizzato per istituire parchi, aree protette e riserve che tendono ad accrescere ulteriormente il valore ambientale, ad esempio, sfruttando il geoturismo che è un modo differente per aiutare la transizione attraverso la sfide economiche portate dalla globalizzazione.

Il costante ed aumentato interesse verso questi temi porta inevitabilmente ad allargare l'orizzonte e si tende sempre con maggiore frequenza a sostituire il concetto di "geosito" che potevamo definire come: *"Aree più o meno delimitate che offrono insieme di oggetti geologici o geomorfologici dotati di un interesse scientifico e alcuni valori aggiuntivi paesaggistici e/o ambientali suscettibili di sostegno per fini educativi o di un loro uso geoturistico"* con quello di "geosito" proposto in questo lavoro che potremmo definire come: *"Porzione geografica definita di un territorio gestita nei suoi aspetti spaziali e nei suoi contenuti culturali attraverso un Sistema Informativo Territoriale"*. Come si può notare questa definizione non disconosce quanto contenuto in quella precedente ma tende soltanto a dare al prefisso "geo" una connotazione essenzialmente geografica e non geologica oppure geomorfologica e questo è dovuto al fatto che si individua il GIS come l'unico strumento capace di gestire complessi archivi cartografici e contemporaneamente altrettanto estese basi di dati relazionali.

Il Geographic Information System (GIS)

Un sistema informativo geografico (GIS) integra hardware, software e dati per acquisire, gestire, analizzare e visualizzare tutti i tipi di informazioni di tipo geografico. Il GIS quindi ci permette di visualizzare ed interrogare i dati inseriti in molti modi per generare soprattutto mappe ma anche modelli, tendenze, geostatistica, grafici e report. In definitiva lo scopo principale di chi si appresta ad utilizzare questo strumento per elaborare un progetto è quello di ricavare un vantaggio tra la fase piuttosto complessa di "input" dei dati e quella di "output" delle informazioni. Con dato si intende ciò che si immagazzina nel database, ovvero la registrazione della descrizione di una qualsiasi caratteristica della realtà che necessita tuttavia di un'interpretazione per produrre conoscenza, mentre l'informazione è quello che si richiama dal database, ovvero il risultato dell'interpretazione dei dati, e comporta la produzione di variazione nel patrimonio conoscitivo del soggetto. Nell'ultimo decennio anche sulla base dei grandissimi progressi fatti dal software

L'utilizzo dei GIS ha cominciato ad essere percepito da molti come uno degli strumenti più potenti tra tutte le tecnologie dell'informazione e come strumento interoperabile ed internazionale ha permesso di integrare le conoscenze da sorgenti multiple e di creare un ambiente trasversale di collaborazione tra operatori e discipline differenti. Il GIS unisce in un potente ambiente di visualizzazione la struttura analitica e la modellazione dei dati che hanno le proprie radici nelle scienze geografiche e quindi applicabili con una certa facilità a discipline delle Scienze della Terra. Nel settore dei beni culturali in genere invece, ma archeologici-architettonici in particolare, l'impiego del GIS è stato dettato soprattutto dalla necessità di archiviare, processare e analizzare le qualità spaziali di grosse quantità di dati e presentare i risultati in modo veloce ed efficiente ma non è ancora diventato parte integrante della ricerca sui beni culturali, scontando un po' il conflitto che si è venuto a creare con i software legati alla computer grafica come i CAD. Indipendentemente dal settore di applicazione, il GIS, come strumento di "problem-solving", non può prescindere dai dati geografici. Esso poggia le sue potenzialità su di un database contenente dataset che rappresentano l'informazione geografica e consente la gestione di elementi vettoriali (feature), immagini raster, attributi, topologie, network senza trascurare naturalmente la geovisualizzazione. Molto spesso, una volta messa a punto una metodologia di inserimento ed elaborazione dati validata questa si compone di un insieme di strumenti operativi che, a partire dal dataset geografico, consente di applicare delle funzioni analitiche e archiviare i risultati in nuovi dataset. Queste operazioni sono direttamente collegate al software utilizzato, nel nostro caso è stato scelto ArcGIS di ESRI che permette di utilizzare ArcCatalog per gestire al meglio il dataset geografico, ArcMap per creare ed elaborare mappe, ArcToolbox che costituisce una formidabile collezione di strumenti per il geoprocessing ed ArcScene per la visualizzazione tridimensionale dei dati. Comunque, al di là della software house prescelta, questi differenti approcci costituiscono i fondamenti per un GIS funzionale e sono presenti, con modalità d'uso diverse, in tutte le applicazioni a carattere geografico.

Il modello dei dati

Il GIS è quindi lo strumento di partenza fondamentale nell'ottica della creazione di un inventario completo dei geositi a livello nazionale ed internazionale, attraverso la determinazione di una metodologia standardizzata per il rilevamento e la successiva informatizzazione di tutte le informazioni riguardanti il bene stesso. L'approccio è trasversale, la prospettiva è quindi quella di un'analisi completa di una particolare porzione di territorio caratterizzata dalla presenza di un bene culturale in senso lato, integrando le caratteristiche scientifiche di un luogo di interesse, in particolare quelle geologiche e geomorfologiche con quelle di contesto, in quanto supporto di particolari ambienti biologici e di valenza storico-architettonica (Panizza M. e Piacente S., 1999).

Tramite GIS si riesce quindi a creare una cartografia complessa ed interrogabile consentendo un'ampia implementazione del procedimento definito dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) per il censimento dei principali geositi italiani che prevede la semplice compilazione di una scheda cartacea indicante una serie di informazioni identificative, geografiche e descrittive del geosito, con attenzione alla loro fruibilità, allo stato di conservazione e alla loro tutela. Partendo da queste schede si sviluppa tutto un sistema cartografico informatizzato complesso e relazionato che consente di effettuare interrogazioni, analisi ed elaborazioni dati per un utilizzo sia a livello professionale che turistico. Il concetto primario è standardizzazione, definire quindi delle regole e dei procedimenti base che permettano di uniformare la grande mole di informazioni riguardanti i siti individuando una struttura portante di questa metodologia ed espandendosi poi a costruirla nel dettaglio considerando le diverse casistiche possibili.

I punti chiave per la standardizzazione della metodologia GIS sono stati:

- Definizione del sistema di georeferenziazione da utilizzare a livello internazionale;
- Individuazione delle primitive geometriche utilizzabili per delineare ogni Geosito arrivando a stabilire delle *Aree Minime Campionabili*;

- Costruzione del database necessario per raccogliere tutte le informazioni contenute nella scheda ISPRA e altre di possibile interesse organizzando un database relazionale in grado di gestire grandi quantità di dati;
- Determinazione della cartografia necessaria per la descrizione approfondita del Geosito individuando quella di base nell'uso del suolo ed in particolare in quella Biohab;
- Creazione di schede standard, realizzate con software professionali di impaginazione che possano essere ripetibili e collegabili sia al sistema GIS attraverso un hyperlink ma disponibili anche su Web e scaricabili attraverso il QR code per usi geoturistici.

Per riuscire a definire un sistema utilizzabile a scala globale si rende indispensabile l'utilizzo di un sistema di georeferenziazione convenzionalmente utilizzato in qualunque parte del mondo. L'unico ad avere queste caratteristiche è il WGS84, un modello matematico della Terra da un punto di vista geometrico, geodetico e gravitazionale, costruito sulla base delle misure e delle conoscenze scientifiche e tecnologiche disponibili al 1984. Il vantaggio nell'utilizzo di questo sistema è dato dalla sua perfetta compatibilità con i sistemi UTM. Questi ultimi consistono in proiezioni su piano e consentono quindi l'utilizzo di un sistema metrico di misura che permette di sviluppare della analisi areali, al contrario del WGS84 che utilizza invece il sistema in gradi decimali. Il sistema UTM suddivide la superficie terrestre in 60 fusi di 6° di ampiezza in longitudine a partire dall'antimeridiano di Greenwich, e in 20 fasce di 8° ciascuna in latitudine. Le intersezioni tra fusi e fasce individuano le zone. Identificando la zona di interesse in qualunque parte del mondo si potrà utilizzare un progetto GIS georeferenziato in UTM indicando la zona corrispondente, evitando così le distorsioni normalmente presenti con il WGS84. Ognuno degli shapefile creati in UTM potrà poi essere importato senza trasformazioni in un unico progetto in WGS84.

Per poter inserire i geositi all'interno di un progetto GIS occorre definire una primitiva geometrica che li possa univocamente identificare. La scelta può ricadere solo tra punti, linee e poligoni. Attraverso queste primitive occorre realizzare un modello dei dati che sia in grado di delineare con precisione ogni oggetto presente nel mondo fisico ma che si riesca ad adattare a tutte le diverse combinazioni che effettivamente occorrono nella realtà. Si è scelto di rappresentare ogni Geosito come un poligono individuando delle *Aree Minime Campionabili* di 1 km², una unità minima di territorio che può comprendere il geosito al suo interno o in multipli di esso, ma che consente una standardizzazione nel rilevamento e nell'attribuzione dati. L'utilizzo di punti o linee avrebbe infatti sicuramente facilitato il posizionamento del sito ma avrebbe fatto perdere importanti informazioni areali. Utilizzando poligoni si rende necessario individuare una forma e delle dimensioni standard che consentano di mantenere la coerenza topologica e di definire una distribuzione omogenea dei diversi geositi sul territorio. Bisogna sempre tenere presente che in un progetto GIS una primitiva geometrica rappresenta un oggetto nella sua interezza, che in un layer ci sono solo oggetti omogenei, che togliendo, oppure aggiungendo, un oggetto in un layer il resto deve restare coerente. Definendo quindi un confine areale di un geosito viene stabilita la sua posizione sulla superficie terrestre e la sua dimensione ma tutte le informazioni collegate a quel sito devono essere organizzate in una tabella degli attributi. Una ampia visione sul problema del modello dei dati e sulla loro organizzazione spaziale si veda Wadembere & Ogao (2008).

La scheda cartacea dell'ISPRA è stata così trasformata in un database e più nello specifico in un database relazionale. Le diverse sezioni componenti la scheda sono state trasformate in altrettante tabelle degli attributi collegate tra loro tramite un campo chiave, attraverso il comando *Relate*. Selezionando così un record connesso ad certo geosito in una tabella sarà possibile spostarsi nelle altre tabelle collegate identificando tutte le informazioni inerenti lo stesso record.

The screenshot shows a complex relational database interface with multiple overlapping windows. The primary window displays a table with columns: ID, Nome, Famiglia, Genere, Specie, Data, Località, Area, and Perimetro. A record is selected and highlighted in blue. Other windows show detailed views of the selected record, including its attributes and relationships with other data points. The interface is typical of a GIS or ecological database application.

Figura 1 – Record selezionato nel database relazionale.

In questa maniera si possono gestire grosse moli di informazioni senza creare tabelle esageratamente lunghe e difficilmente gestibili. Ogni sito viene quindi fin qui definito dalla sua posizione geografica, dalle sue dimensioni e dalle informazioni contenute nel database relazionale collegato. Da questo punto parte un sistema di approfondimento sulle sue caratteristiche nell’ottica di una integrazione quanto più completa di tutti gli elementi che caratterizzano quel determinato territorio utilizzando cartografie tematiche vettoriali o raster di base che evidenzino i vari aspetti descrittivi del paesaggio, da carte geologiche-geomorfologiche, faunistiche, botaniche a carte identificative di limiti territoriali o di zone di protezione. Si cerca in particolare di individuare le caratteristiche identificative dell’area in connessione agli interessi del sito.

La cartografia di base che si è deciso di utilizzare come punto di partenza per l’analisi di ogni geosito è l’uso del suolo Biohab. La procedura Biohab nasce nel 2005 dalla necessità di individuare una metodologia di rilevamento, sorveglianza e monitoraggio degli habitat che consentisse un’analisi della biodiversità nel suo contesto eterogeneo. Attraverso il “Biohab Concerted Action Framework Programme of the EU” (2002 - 2005) viene sviluppato un manuale per il rilevamento e monitoraggio degli habitat (Bunce et al., 2005) in cui sono indicate rigide regole per il rilevamento e la classificazione su campo. Si sviluppa quindi il concetto di GHC, General Habitat Categories, portando ad una reintroduzione del concetto di forme di vita delle piante sviluppato nei primi anni del 1900 dal botanico danese C. Raunkiaer (1907, tradotto in inglese in Raunkiaer, 1934) che si basa sulle modalità di adattamento degli organismi vegetali alla stagione avversa e, più precisamente, sulle caratteristiche anatomiche e fisiologiche acquisite dalle piante allo scopo di proteggere le gemme o i semi. In base a tali caratteristiche e, soprattutto alla posizione delle gemme svernanti, cioè destinate a superare l’inverno, Raunkiaer suddivide le piante in gruppi ecologici identificando 30 forme biologiche, raggruppabili in cinque categorie. Il campionamento, secondo questa procedura, deve avvenire in aree standard di 1 km², esattamente in concordanza con il sistema qui utilizzato, consentendo un livello di dettaglio estremamente elevato che si sposa perfettamente con lo scopo di approfondimento e integrazione previsto dalla presente metodologia. Ogni forma che compone l’eterogenea composizione di un paesaggio viene definita da una categoria GHC attraverso un poligono, basandosi su precise regole di riconoscimento basate, per ciò che riguarda la composizione vegetale, sulle diverse forme di vita di Raunkiaer presenti.

Gli elementi spaziali possono essere rilevati come areali (MME, Minimum Mappable Element) se presentano un’area di almeno 400 m² e dimensioni minime di 5 x 80 m, lineari, con una lunghezza

minima di 30 m (MML, Minimum Mappable Length) e puntuali, per tutti gli elementi che non soddisfino i precedenti criteri. Oltre alle differenze date dalle diverse forme di vita presenti che permettono di identificare un certo GHC, sono previste delle qualifiche aggiuntive, globali o ambientali, definite da combinazioni di umidità del suolo, stato dei nutrienti, acidità ed altre caratteristiche degli habitat, qualifiche relative al sito ed ai metodi di gestione arrivando fino a informazioni più dettagliate riguardo alla forme di vita e alle specie dominanti, le classificazioni pan-Europee, classificazioni locali e associazioni fitosociologiche (Bunce et al., 2005). Questa tipologia di cartografia tematica risulta quindi estremamente dettagliata e informativa, consentendo, già di per sé, di fornire un quadro d'insieme del territorio in esame piuttosto esaustivo che può essere comunque integrato da tutta una serie di ulteriori cartografie di approfondimento in relazione ai campi di interesse del sito. Ogni cartografia viene elaborata tridimensionalmente attraverso l'estensione 3dAnalyst di Arcgis che consente una visualizzazione tridimensionale restituendo un'immagine della conformazione e della morfologia reale del territorio. Le svariate opzioni ed estensioni di un software all'avanguardia come ArcGIS consentono diverse possibilità applicative di implementazione della metodologia. Grazie all'estensione Tracking Analyst vengono definiti dei percorsi che consentono la fruizione dei vari punti di interesse del/i geosito/i presente/i nell'area, definiti in base ai tempi di permanenza calcolati per ogni fermata prevista sviluppando una visualizzazione dinamica del percorso in sé. E' possibile rilevare questi punti direttamente sul campo utilizzando un sistema GIS mobile dotato di GPS assegnando un parametro temporale ad ogni punto. Grazie a questi passaggi si riesce a sviluppare un progetto che raggruppa al suo interno una grande quantità di informazioni approfondite riguardanti il geosito in esame ma risulta importante anche raggrupparne le principali in un formato che possa diventare cartaceo e che sia di immediata fruizione da parte di un geoturista. Sono state quindi ideate delle schede sviluppate attraverso un software di impaginazione e scrittura professionale, Adobe Indesign. Si è creato un modello di scheda che può essere utilizzato come base per ogni geosito composta da due pagine affiancate in cui compare un bollino colorato nella parte alta della pagina che dà già visivamente un'indicazione del campo di interesse primario del sito, verde per quello scientifico e rosso per quello contestuale. Sono riportati poi nello specifico quali sono gli interessi primari e secondari presenti fornendo nelle due pagine tutte le principali informazioni utili unite a foto, schemi, carte tematiche 3D, foto aeree, ubicazione geografica e tutto ciò che può caratterizzare il bene in questione.

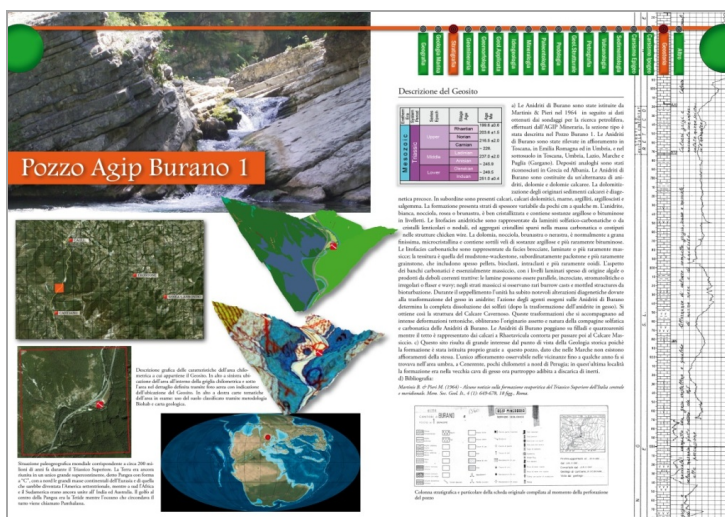


Figura 2 – Esempio di scheda pre-impaginata di un Geosito.

Queste schede sono accessibili rapidamente dal progetto attraverso un hyperlink, un collegamento esterno, che consente di “saltare” direttamente alla scheda in formato pdf dal quadrato corrispondente al Geosito. La stessa scheda può essere utile in formato cartaceo come fruizione anche da parte di un ente che volesse stamparne un certo numero per creare ad esempio una guida, essendo già impaginate. Infine la fruizione della scheda può essere di immediato utilizzo per un turista che arrivi nel sito in cui è ubicato il bene di interesse attraverso un codice Qr-Code. Si tratta un codice a barre bidimensionale a matrice, composto da moduli neri disposti all'interno di uno schema di forma quadrata. Viene impiegato per memorizzare informazioni generalmente destinate ad essere lette tramite un telefono cellulare o uno smartphone. In un solo crittogramma sono contenuti 7.089 caratteri numerici e 4.296 alfanumerici. Basta quindi che sia presente un semplice foglio, delle dimensioni massime di un A4, riportante il Qrcode collegato al sito di interesse sul posto. Tramite un qualunque smartphone su cui sia stato scaricato gratuitamente un programma di lettura di Qrcode si può visualizzare il codice che collega direttamente alla scheda del sito o a un portale web in cui siano presenti le informazioni che si vogliono proporre al geoturista. Generare un codice Qr è inoltre estremamente semplice utilizzando uno dei tanti siti che permettono di farlo gratuitamente ed in modo molto facile ed intuitivo.

In questo modo si può cominciare ad interagire praticamente col progetto anche non essendo un addetto ai lavori. Il concetto di interoperabilità diventa di primaria importanza per creare un sinergia tra diversi sistemi nell'ottica di creare un'interazione ed un interscambio da parte del pubblico. L'utilizzo di un GIS può creare infatti delle difficoltà di utilizzo da parte di un pubblico non specializzato e anche lo sviluppo di Webgis è ancora in fase di consolidamento. La creazione di shapefile è normalmente un processo lungo e difficilmente vengono rilasciati gratuitamente oltre al fatto che spesso i software GIS più avanzati sono a pagamento. Per ovviare a questi problemi e consentire la fruizione degli shapefile da parte di un utilizzatore esterno si può ricorrere ad Arcgis Explorer, un client gratuito di Arcgis Server di ESRI evoluto e semplice da utilizzare, che permette agli utenti di visualizzare ed esplorare i dati geografici 2D e 3D. E' possibile caricare e visualizzare shapefile facendoli interagire con foto aeree e mappe integrando dati di immagini locali con servizi di geoprocessing per l'analisi spaziale. Nel caso non si vogliano fornire gli shapefile è comunque possibile divulgarne il contenuto trasformandoli in file KML. Il KML (*Keyhole Markup Language*), è un formato file e una grammatica XML per la creazione di modelli e la memorizzazione di caratteristiche geografiche quali punti, linee, immagini, poligoni e modelli da visualizzare in Google Earth, Google Maps e altre applicazioni. Il KML può essere utilizzato per la condivisione di luoghi e informazioni con altri utenti di queste applicazioni. Il file KML può essere creato facilmente tramite uno degli strumenti di Arcgis ed essere poi importato in Google Earth che funge da browser per questi tipi di file. il linguaggio KML ha una struttura basata su tag con nomi e attributi che consentono di definire caratteristiche di visualizzazione specifiche. In questo modo possono essere identificate le informazioni contenute nello shapefile senza che queste possano essere modificate e consentendo una integrazione con foto aeree ad alta definizione e con una serie di informazioni fornite da Google quali attrezzature turistiche, foto di località specifiche, alberghi, ristoranti e tutto ciò che può risultare utile per la fruizione del geosito da parte del pubblico fruitore. I file kml possono essere inseriti ed utilizzati anche tramite Arcgis Explorer.

Casi specifici

Una volta definita l'architettura del progetto GIS, la struttura portante della metodologia per la codificazione dei dati e le caratteristiche chiave per il rilevamento e l'informatizzazione dei nostri geositi si è passati a valutare singole casistiche nel dettaglio. Analizzando i geositi in senso ampio, considerati quindi nel loro interesse culturale, spaziando da un contributo principalmente scientifico, che sia geologico, geomorfologico o ecologico arrivando a focalizzare l'attenzione su valutazioni storico-architettoniche, che sono valide nella quasi totalità dei casi, si rende necessario andare ad individuare regole, che pur specifiche, si possano applicare in tutti quelle situazioni che potremmo definire particolari. Per esemplificare meglio questo concetto di “particolarità” del

geosito sono stati quindi valutati alcuni case history che allo stato attuale delle ricerche possiamo raggruppare in tre differenti categorie:

- Geositi temporali: siti che assumono una particolare rilevanza, o che possono essere accessibili per la fruizione, solo in un periodo dell'anno ben determinato;
- Aree Marine: Geositi che ricadono prevalentemente o totalmente in zone marine o costiere per cui vengono analizzate tipologie di cartografie tematiche differenti dal BioHab;
- Aree Archeologiche: caratterizzate da complessi archeologici importanti su cui è necessario concentrare maggiormente l'attenzione utilizzando rilevamenti GIS più accurati e modellizzazioni tridimensionali, senza trascurare la conservazione o il restauro.

Come aree esemplificative di Geositi temporali sono state scelte 3 tipologie differenti che si basano proprio sulla caratteristica di fruibilità e di interesse da parte di un geoturista in particolari momenti dell'anno: la Festa degli Aquiloni a Urbino a inizio settembre, le fosse di Cartoceto con la festa di apertura a fine novembre e l'inanellamento dei fenicotteri a Comacchio a luglio.

Urbino: 56° Festa dell'Aquilone: “... Or siam fermi; abbiamo in faccia Urbino ventoso: ognuno manda da una balza una cometa per il ciel turchino. ...” Basterebbe forse questo riferimento alla poesia di Giovanni Pascoli “L’Aquilone”, scritta dal poeta per ricordare il tempo passato ad Urbino come scolaro del Collegio degli Scolopi, per legare Urbino, oltre che al Rinascimento, anche al “vento”, che quindi diventa, parallelamente alle caratteristiche geologiche e geomorfologiche del colle su cui è ubicata la città, un elemento peculiare che la contraddistingue. Codificare quindi che un prato sulle pendici dei Monti delle Cesane dove si svolge la “Festa dell’Aquilone”, di cui quest’anno si celebra la 56° edizione, sia da considerare un geosito, significa anche che questo evento diventi una occasione per riflettere sull’importanza dell’ambiente e della sua conservazione in tutti i suoi aspetti, che siano più o meno evidenti, soprattutto in questi periodi in cui si discute molto di energia da fonti rinnovabili e si assiste ad un proliferare a volte incontrollato di impianti eolici talora posizionati con scarsa attenzione per la tutela del paesaggio. La festa ha il suo momento culminante nella Gara tra le Contrade che si sfidano nel tentativo di far salire l’Aquilone più in alto. Ad Urbino quella di costruire aquiloni è una vera tradizione, ancor oggi fatta nella classica maniera che utilizza carta oleata, canne di fosso, colla di farina e tanta fantasia. Si possono così ammirare centinaia di comete in volo, proprio di fronte a quel famoso Urbino ventoso, che evidenziano con il loro volo il ruolo del vento come agente geomorfologico anche se i processi che da esso derivano non sono particolarmente evidenti nel contesto appenninico. La scheda del geosito viene arricchita con la carta tratta dall’Atlante Eolico d’Italia che mostra come non tutte le zone dell’Appennino sono ugualmente interessate dalla stessa intensità del fenomeno ventoso, che risulta particolarmente concentrato soltanto sulle cime più elevate della dorsale appenninica.

Cartoceto: la festa per l'apertura della fossa avviene l'ultima domenica di Novembre. Le forme di formaggio di fossa maturano per due o tre mesi all'aria aperta poi, in agosto, vengono avvolte in teli bianchi, messe in una sacca di cotone, nel numero di venti, venticinque per volta, e riposte in fosse scavate nei banconi arenacei della Formazione di san Donato che fa parte della Sequenza Messiniana. Questa è suddividibile in due cicli sedimentari separati da una superficie di discontinuità medio-messiniana e depositatesi sotto regimi tettonici differenti. La sequenza sedimentaria inferiore, caratterizzata da una variabilità di facies e di spessori, comprende Tripoli, Calcare di Base, Marne bituminose e Gessi e termina con la torbidity Formazione Marnoso-Arenacea di S. Donato che nelle aree di bacino può raggiungere spessori fino a 500-600 metri. La sequenza sedimentaria superiore è rappresentata dalla Formazione a Colombacci che si chiude con cinque orizzonti calcarei detti colombacci. Le Fosse sono storiche e sono state anticamente scavate appunto negli strati arenacei del San Donato che localmente possono raggiungere spessori di parecchi metri. Solitamente hanno una forma a fiasco, sono profonde circa 3 metri per 2 di diametro e al loro interno la temperatura è stabile e si aggira intorno ai 20° C con un grado di umidità dell' 80-90 %. Prima di essere riempite, le fosse vengono pulite bruciando paglia e sterpi e

poi rivestite di paglia e canne per favorire la sgocciolatura del siero ed evitare il contatto dei formaggi con le pareti della fossa. Dopo aver stivato i sacchi dei formaggi nelle fosse, vengono posti dei coperchi di legno e, come vuole la tradizione, le forme di formaggio vengono chiuse nelle grotte per 90 giorni ad agosto e vi rimangono fino al 25 novembre, giorno di Santa Caterina. Le fosse che permettono la stagionatura di un prodotto ormai diventato di eccellenza in Italia come il formaggio di fossa mostrano un perfetto connubio tra la tradizione e la cultura gastronomica e un determinato contesto geologico indispensabile per le sue specificità. L'apertura delle fosse diventa poi anche occasione di richiamo per il turista dal momento che le comunità locali, in occasione di questa fiera, organizzano numerose manifestazioni collaterali: spettacoli teatrali, musicali e ricreativi, convegni riguardanti l'alimentazione o di carattere storico-culturale, stand di prodotti tipici provenienti da diverse zone d'Italia, e naturalmente degustazioni del formaggio.

Colonia dei fenicotteri di Comacchio. Il Parco Delta del Po è stato istituito nel 1988. Dal 2000 ospita la colonia stanziale di fenicotteri più numerosa d'Italia dopo quella della zona umida di Molentargius in Sardegna. Sono molte le particolarità ambientali e paesaggistiche che contraddistinguono e differenziano i vari ambiti territoriali del parco anche se il denominatore comune è l'acqua che, con vari gradi di salinità, caratterizza tutti gli ambienti naturali. Proprio a partire dall'acqua si sono sviluppate nei secoli tutte le attività dell'uomo legate alla pesca, all'agricoltura, alla tradizione, alla cultura, all'arte. Ma il geosito è di straordinaria importanza anche per la eccezionale presenza di uccelli, con oltre 300 specie fra nidificanti, svernanti o di passo e tra questi, appunto, la presenza di una colonia di che viene stimata di ben 14.000 esemplari. Dal momento del suo insediamento la colonia è stata attentamente monitorata, una frazione dei giovani nati localmente è stata inanellata in ciascuna stagione riproduttiva. Il marcaggio di ogni soggetto è avvenuto sia con tradizionali anelli metallici, sia con anelli in plastica di colore azzurro, che possono essere agevolmente letti fin da 400 m di distanza su individui viventi. Questa operazione si svolge seguendo un rigido protocollo a cui partecipano mediamente un centinaio di collaboratori volontari. Al marcaggio fanno seguito una serie di uscite finalizzate al monitoraggio degli anelli, svolte sia in colonia che in altre zone riproduttive (Francia, Spagna, Marocco, Tunisia, Turchia ecc.) grazie al network afferente al progetto sui fenicotteri del Mediterraneo. Il grande database originatosi dalla informatizzazione di questi dati permette di ricostruire, attraverso il GIS, gli spostamenti dei singoli esemplari muniti di anello. La colonia di Comacchio è visibile anche semplicemente camminando o percorrendo in bici alcuni argini però, per chi volesse osservarli più da vicino, esiste l'opportunità di effettuare una escursione in barca con orari e giorni stabiliti in precedenza per non disturbare gli animali soprattutto nel periodo della nidificazione. Per chi volesse partecipare alla campagna di inanellamento come volontario è invece necessario registrarsi con anticipo su di un apposito sito. Per un geosito come quello delle saline di Comacchio o per altri siti con caratteri peculiari è necessario predisporre, sia a livello di layer nel progetto GIS, sia per le schede illustrative ad esso collegate, oltre alle cartografie classiche come l'uso del suolo biohab, la geologia, le carte topografiche e le immagini satellitari, anche particolari informazioni riguardanti gli eventi che al geosito sono collegati come usanze, feste, eventi che possono essere vissuti da un eventuale visitatore solo in un certo periodo dell'anno oppure solo in un particolare giorno.

I geositi sommersi o che ricadono invece prevalentemente in Aree marine devono essere considerati con criteri differenti da quelli presenti su terra ferma. In questo caso infatti l'uso del suolo risulta di scarso interesse essendoci in gran parte acqua. Sono state studiate alcune aree ricadenti nella zona antistante il **Monte Conero** in cui sono presenti geositi di particolare importanza quali lo Scoglio del Trave, la formazione delle Due Sorelle, la Grotta degli Schiavi, quella dei Libri e la Grotta Urbani. In questi casi è stata utilizzata una cartografia specifica fornita dal Consiglio Nazionale delle Ricerche e l'Istituto di Ricerche sulla Pesca Marittima (CNR-IRPEM-ANCONA), la Mappa delle Biocenosi Bentoniche e la Mappa Morfologica Marina. Entrambe le carte erano in formato cartaceo e sono state quindi scansionate, importate come raster nel progetto, georeferenziate e vettorializzate. L'analisi della distribuzione dei popolamenti animali e vegetali bentonici, che

Per analizzare come potevano essere inserite nel progetto GIS le Aree archeologiche di grande



OR = Odds Ratio

Bibliografia

- Ardizzone G.D., Belluscio A. e Fabi G. (2003), "Cartografia delle biocenosi bentoniche del tratto di mare antistante il Monte Conero". In: Fabi. G., Marini M., Palladino S. (eds.) (2003), *L'Area marina antistante il Promontorio del Monte Conero Quaderni dell'Istituto Ricerche Pesca Marittima.*, Ancona, Nuova Serie, 1: 111-114
- Brilha J (2002), "Geoconservation and protected areas". *Environ Conserv* 29(3): 273–276
- Bunce R.G.H., PhD, Metzger M.J., Brandt J., De Blust G., Elena-Rossello R., Groom G.B., Halada L., Hofer G., Howard D.C., Jongman R.H.G., Kovár P., Múcher C.A., Padoa-Schioppa E., Paelinckx D., Palo A., Perez Soba M., Ramos I., Roche P., Skånes H., Wrba T. (2006). *A Standardised Procedure for Surveillance and Monitoring European Habitats*, pp. 35
- Bunce R.G.H., Groom G.B., Jongman R.H.G., Padoa-Schioppa E. (2005). *Handbook for Surveillance and Monitoring of European Habitats*, pp. 107
- Dingwall P. (2000), "Legislación y convenios internacionales: la integración del Patrimonio Geológico en las políticas de conservación del medio natural". In: Baretino D, Wimbledon WAP, Gallego YE (eds) *Patrimonio Geológico: Conservación y Gestión*. ITGE, Madrid, Spain, pp 15–29
- Panizza M. (1999) - Relationships Between Environment and Man in Terms of Landslide Induced Risk. In: R. Casale & C. Margottini (eds.), *Floods and Landslides: Integrated Risk Assessment*. Springer-Verlag, Berlin, 191-195.
- Panizza M. (2001) – Problemi attuali di rischio e impatto ambientali in alta montagna. In: R. Bernardi, G. Diolaiuti & C. Smiraglia (eds.), *Uomo e ambiente d'alta montagna. Dalla conflittualità all'integrazione*. Mem. Soc. Geog. Italiana, 66, 53-68
- Raunkiaer C. (1934), *The life forms of plants and statistical plant geography, being the collected papers of C. Raunkiaer*, Clarendon, Oxford, pp. 632
- Wadembere I. & Ogao P. J. (2008), "Towards a Geometrical Spatial Integration Model for GIS" *International Journal of Computing and ICT Research*, Vol. 2, No. 2, December 2008

Per adempiere a tale compito con una risoluzione planimetrica uguale o migliore dei 20m ed un'accuratezza che sia la migliore ottenibile in funzione dei prodotti disponibili, per la fascia alpina oggetto del progetto è necessario un ricalcolo del geoide, ovvero del *datum* d'altezza, nell'area d'interesse, con un'accuratezza migliore di 10 cm. Analogamente è necessaria la determinazione di una rete GNSS, per la validazione e la georeferenziazione lungo la linea di frontiera.

L'integrazione di dati tridimensionali transnazionali multirisoluzione richiede la disponibilità di appropriati metodi e parametri di trasformazione di *datum*, almeno conformi alle accuratèzze dei modelli digitali del terreno originari. Se l'accuratezza del dato è elevata (dell'ordine delle decine di centimetri), l'accuratezza richiesta per la trasformazione planimetrica è a sua volta elevata.

La trasformazione di coordinate planimetriche da un sistema nazionale ad un altro è a rigore la proiezione 2D di una trasformazione di coordinate 3D da una rete di inquadramento nazionale ad un'altra. Se, come nel caso attuale, si dispone solo di coordinate 2D per la maggioranza dei punti, la trasformazione può essere eseguita solo approssimativamente. Dunque il metodo da adottare dipende dalle esigenze di precisione. In particolare nel caso si voglia raggiungere un elevato livello di accuratezza, non sarà sufficiente una trasformazione di Helmert 3D (livello 1 di precisione). Tali trasformazioni, con i parametri oggi disponibili per i paesi europei, permettono di raggiungere accuratèzze dell'ordine di qualche metro. Per accuratèzze superiori sarà necessario utilizzare trasformazioni e interpolazioni locali nella zona di frontiera basate su punti rilevati nelle due reti di inquadramento (livello 2 di precisione della trasformazione). Quindi si dovranno eliminare le distorsioni mediante una loro modellizzazione estesa a tutto il territorio e basata sulle coordinate disponibili nei nuovi sistemi di riferimento satellitare. Nel caso del confine fra Italia e Svizzera il riferimento è ai due sistemi IGM95 e MN95 (livello 3 di precisione della trasformazione).

Il tipo di trasformazione ottimale da adottare sarà oggetto del presente progetto. La precisione ottenibile mediante la trasformazione sarà dell'ordine di grandezza della precisione locale delle reti di inquadramento (normalmente qualche cm). Per la stima della trasformazione dovranno essere utilizzati i rilievi eseguiti dalle competenti autorità geodetiche sui termini di confine eventualmente integrati con opportune campagne di misura progettate appositamente per il presente progetto. Questo allo scopo di produrre un DTM (per la coordinata di altezza si considereranno le quote ortometriche) integrato e multirisoluzione che rappresenta il dato fondamentale per le molteplici applicazioni ambientali e territoriali. Gli enti coinvolti nel progetto sono i seguenti: Fondazione Politecnico di Milano, Politecnico di Milano (Polo Territoriale di Como), Politecnico di Torino (Sede di Vercelli), Provincia Autonoma di Bolzano, Regione Lombardia, Regione Piemonte e la Scuola Universitaria della Svizzera Italiana. È inoltre prevista la collaborazione, in qualità di partner esterni, di SwissTopo e dell'Istituto Geografico Militare. Il progetto si articola in nove *Work Packages* (WP), i cui titoli e durata sono riportati nella sottostante tabella.

Le descrizioni analitiche del progetto e del suo stato di avanzamento sono nell'articolo completo, che è in fase di pubblicazione sul Bollettino SIFET 1/2011.

Tabella 1 – I WP di HELI-DEM.

WP	Titolo	MI	MF
WP1	Management	1	30
WP2	Raccolta e analisi delle varie tipologie di dati disponibili (DTM e geoidi)	1	6
WP3	Verifica incrociata dei DTM e dei geoidi esistenti	5	16
WP4	Reti GNSS transfrontaliere	7	18
WP5	Unificazione del datum d'altezza (geoidi) tra Svizzera e Italia	12	23
WP6	Validazione esterna e georeferenziazione del DEM	21	26
WP7	Integrazione di tutti i dati di altezza disponibili e validati	16	27
WP8	Sperimentazione di uso dei risultati del progetto e valutazione finale dei dati	22	27
WP9	Diffusione e valorizzazione dei risultati della ricerca	19	30

MI. Mese di inizio. MF. Mese di fine

Difesa del suolo attraverso l'uso del suolo: suggestioni per una rivisitazione del vincolo idrogeologico ex RD 3267/23

Alessandro Binetti

Provincia di Bari, Servizio Urbanistica-Espropriazioni, Via Spalato 19, 70121 Bari, Tel. 080.5412404

Introduzione

Fino a circa dieci anni or sono il concetto di paesaggio era legato prevalentemente a quello di “natura” ed ai caratteri estetici di questa, fino a riconoscere elementi di “valore” solo a quelle porzioni di territorio ritenute pregevoli da un punto di vista “artistico” o “panoramico”.

E' la concezione estetico/percettiva del paesaggio, codificata, in Italia, dalla Legge n. 1497 del 1939 (rimasta in vigore fino al 1999) relativa alla “protezione delle bellezze naturali”, che sottoponeva a tutela talune zone territoriali in cui erano riunite caratteristiche di “bellezza” e di “natura”, sottintendendo con quest'ultimo termine l'assenza o il minimo intervento dell'azione antropica.

La sempre maggiore consapevolezza che lo spazio fisico (c.d. naturale) non può prescindere dall'intervento dell'uomo in quanto “abitante della Terra” e che non si può attuare una netta distinzione fra paesaggi naturali e paesaggi antropizzati contrapponendo uomo e natura, ha portato ad una nuova definizione di paesaggio, sancita dalla Convenzione Europea del Paesaggio siglata a Firenze dal Comitato dei Ministri della Cultura e dell'Ambiente del Consiglio d'Europa, nel 2000.

Secondo la traduzione ufficiale in italiano del testo, “Paesaggio” designa una determinata parte di territorio, così come è percepita dalle popolazioni, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interrelazioni.

Questa definizione però, è caratterizzata da una incongruenza con la versione originale: la precisazione “*Paesaggio designa una determinata parte di territorio*” non risulta nella versione inglese (“*Landscape means an area, as perceived...*”), mentre in quella francese si definisce “*una parte di territorio*” (“*une partie de territoire*”). Ma “determinare” per definizione un territorio non ha senso, perché secondo la Convenzione tutto il territorio è paesaggio; la precisazione quindi è un probabile retaggio del concetto italiano di paesaggio inteso come bellezza naturale dalla Legge 1497/39. Altri Autori hanno, quindi, proposto un'altra versione in italiano: “Paesaggio designa una zona o territorio, quale viene percepito dagli abitanti del luogo o dai visitatori, il cui aspetto o carattere derivano dalle azioni di fattori naturali e/o culturali (antropici)” (Giordano, 2006).

Pertanto il paesaggio, nella attuale concezione, non è più legato alla “veduta panoramica” ma diventa un *unicum* plasmato da fenomeni ambientali (naturali) e interventi antropici, di cui viene riconosciuta la salvaguardia come tutela dei valori culturali, ambientali, sociali e storici, in quanto elemento fondamentale per garantire la qualità della vita delle popolazioni.

In Italia il concetto di tutela e valorizzazione del patrimonio culturale è sancito dal Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (D.Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42) ed è finalizzato a preservare la memoria della comunità nazionale e del suo territorio ed a promuovere lo sviluppo della cultura. Il patrimonio culturale poi, è costituito dai beni culturali e dai beni paesaggistici; questi ultimi sono “aree ed immobili espressione dei valori storici, culturali, naturali, morfologici ed estetici del territorio”, ribadendo, con questo, l'interazione, nella costruzione del paesaggio, di processi naturali ed antropici.

Per questo il concetto di “tutela” del paesaggio si svincola e va oltre la mera “conservazione” tal quale che pretende di fare del territorio un museo statico, avvicinandosi sempre più al concetto di “gestione” che prevede l'utilizzo sostenibile della risorsa (Leone, 2009).

La gestione corretta, (in altri termini pianificazione), tuttavia, non è attuabile se non c'è conoscenza dei fenomeni e, conseguentemente, interpretazione delle dinamiche. In questa ottica si rende necessaria una nuova visione della pianificazione territoriale, fino ad oggi troppo legata al "vincolo" che significa "delimitazione" di porzioni e separazione delle varie "zone" territoriali, per passare ad una visione più "integrata" che prenda in considerazione l'intero spazio territoriale in cui conoscere e interpretare le differenze ed individuarne le vulnerabilità.

In questo contesto si inserisce il presente studio che intende indagare uno dei fenomeni che incidono sulla "costruzione" del paesaggio: l'erosione idrica del suolo, caratterizzato dall'interazione di componenti naturali, quali il clima o la morfologia, con componenti antropiche legate all'uso del territorio, al fine di riconoscere i diversi gradi di vulnerabilità e fornire indicazioni alla pianificazione territoriale sul tema della difesa del suolo, attualmente regolata, con impostazione "vincolistica", dal R.D.L. 3267 del 1923.

Il suolo, inteso come parte più esterna della crosta terrestre, elemento di separazione ed interfaccia con l'atmosfera è, in generale, un miscuglio di particelle minerali, sostanze organiche, gas, composti chimici ed acqua (Hillel, 1998). Il suo processo di formazione e rigenerazione è molto lento e per questo motivo il suolo è una risorsa essenzialmente non rinnovabile.

I principali processi di degradazione cui sono esposti i suoli sono l'erosione, la diminuzione della materia organica, la contaminazione, la salinizzazione, la compattazione, la diminuzione della biodiversità del suolo, l'impermeabilizzazione, le inondazioni e gli smottamenti.

Il degrado dei suoli costituisce un grave problema in Europa che è provocato o aggravato dalle attività umane, come le pratiche agricole e silvicole inadeguate, le attività industriali, il turismo o lo sviluppo urbano e industriale e la pianificazione territoriale.

Ne risultano una minore fertilità del suolo, una perdita di carbonio e di biodiversità, una capacità inferiore di trattenere l'acqua, lo sconvolgimento dei cicli dei gas e dei nutrienti e una minore degradazione degli agenti contaminanti. Il degrado del suolo ha ripercussioni dirette sulla qualità delle acque e dell'aria, sulla biodiversità e sui cambiamenti climatici, ma può anche incidere sulla salute dei cittadini e mettere in pericolo la sicurezza dei prodotti destinati all'alimentazione umana e animale (Commissione Europea, 2006).

Il compito di regolazione e convogliamento delle acque meteoriche che precipitano al suolo fa sì che l'interazione pioggia-suolo, determinando l'asportazione ed il trasporto delle particelle solide, sia il campo di indagine privilegiato al fine di valutare le "perdite di suolo" con l'obiettivo di valutare se tali perdite siano da ritenersi compatibili con quella che viene definita erosione geologica o naturale, in cui le "perdite" subite sono compensate dai naturali processi di formazione, ovvero se esse siano da ritenersi "accelerate" e, quindi, in grado di produrre un graduale e progressivo depauperamento non più recuperabile con processi naturali.

L'effetto erosivo della pioggia, che si manifesta attraverso l'impatto delle gocce d'acqua ed il ruscellamento sulla superficie, può essere più o meno accentuato a seconda della situazione orografica (pendenza ed estensione dell'area), della copertura vegetale e della presenza o meno di pratiche agricoli quali arature o sistemazione dei pendii.

L'obiettivo di quantificare l'erosione idrica dei suoli, a livello europeo, utilizzando le moderne tecniche digitali, è stato portato avanti attraverso uno specifico progetto della Commissione Europea (Van der Knijff et al. 2000) che ha consentito di realizzare una serie di "mappe" utili per individuare le regioni più vulnerabili sotto questo aspetto.

Il presente lavoro intende esaminare, all'interno di un'area di studio del territorio pugliese, il rapporto fra l'erosione idrica dei suoli stimata attraverso il modello "*Universal Soil Loss Equation*" (USLE) e le aree sottoposte a vincolo idrogeologico ai sensi del RDL 3267/23.

L'analisi è stata condotta integrando il modello USLE all'interno di un Sistema Informativo Geografico (GIS) ottenendo, come risultato finale, la produzione di una mappa di vulnerabilità del suolo per il territorio dell'area considerata che può essere utilizzata per fornire indicazioni sulla pianificazione territoriale di area vasta.

L'area di studio

La regione nord barese, compresa fra il capoluogo ed il fiume Ofanto, delimitata a sud da un rialzo terrazzato delle Murge, di altitudine modesta e di configurazione piatta è caratterizzata da un paesaggio privo di rilievi significativi e dalla presenza di calcari, anche affioranti, ad alta permeabilità. La costituzione geologica è alquanto semplice: la parte più elevata, le Murge, è costituita dal calcare cretaceo assoggettato a carsismo; la zona meno elevata, fronteggiante l'Adriatico, è costituita da una impalcatura calcarea ricoperta da un irregolare velo di argilla rossastra, ricca di perossido di ferro con frammenti di calcare.

Il calcare cretaceo delle Murge si presenta intaccato da innumerevoli fratture, che, per quanto sottili, assorbono facilmente le acque di pioggia, lasciando scorrere solamente una certa quantità nei casi di eventi pluviometrici intensi. D'altra parte il velo di argilla che ricopre il terreno pianeggiante può assicurare una certa impermeabilità, ma se le piogge sono leggere esse vengono assorbite facilmente e trasmesse al sottostante calcare fessurato, mentre se sono intense, dopo avere saturato il terreno rendendolo impermeabile, in parte affluiscono in conche carsiche aventi nel punto più basso un inghiottitoio, in parte ristagnano, lì dove la natura del terreno è pianeggiante, ed un'altra parte, favorita dalla pendenza del terreno, viene drenata dalle incisioni morfologiche e portata al mare o al recapito endoreico.

Questi solchi erosivi, rappresentanti i resti di un'antica idrografia superficiale oggi scomparsa e che si attivano solo episodicamente, sono chiamati "lame" (Piano Tutela della Acque della Regione Puglia, 2010).

Considerato che, di norma, lo studio sull'erosione idrica dei suoli viene effettuato a livello di bacino imbrifero, l'area esaminata nel presente lavoro è stata individuata sulla base dei bacini idrografici delle lame dell'area nord barese.

L'individuazione è stata effettuata sulla base della Carta Idro-geo-morfologica elaborata dall'Autorità di Bacino della Puglia. Essa è stata realizzata utilizzando come base di riferimento i dati topografici, il modello digitale del terreno (DTM) e le ortofoto (relative al periodo 2006-2007), realizzate dalla Regione Puglia nell'ambito del progetto della nuova Carta Tecnica Regionale.

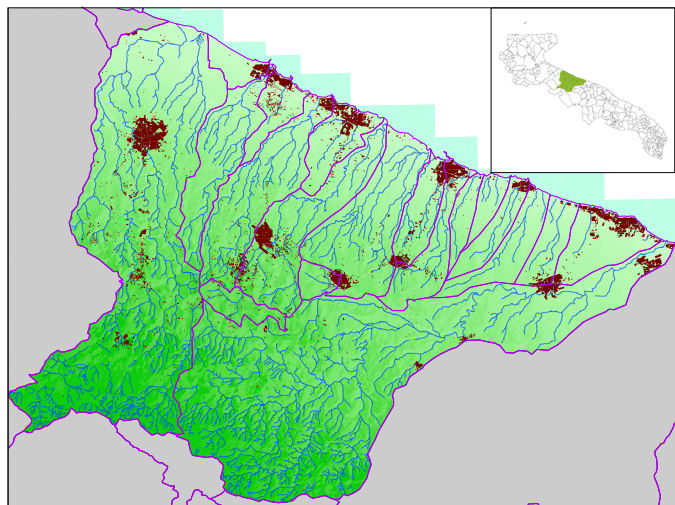


Figura 1 – Area di studio con i relativi bacini idrografici considerati.

La valutazione dei fattori che influenzano il fenomeno dell'erosione idrica dei suoli presuppone la conoscenza di dati territoriali affidabili, che opportunamente implementati con l'ausilio di applicazioni GIS consentano l'elaborazione sistematica delle loro interazioni.

Nel presente studio sono state utilizzate, a riferimento dell'indagine, i seguenti dati cartografici e territoriali:

- Modello Digitale del Terreno (DTM) con risoluzione 8 mt [fonte: Sit.Puglia]
- Carta di uso del suolo con classificazione Corine Land Cover [fonte: Sit.Puglia]
- Carta Pedologica regionale [fonte: Progetto ACLA 2 - IAM Bari, 2001]
- Dati pluviometrici reperiti dagli "annali idrologici" periodo 1921-2005 [fonte: Ufficio Idrografico e Mareografico del Settore Protezione Civile della Regione Puglia]

Il modello USLE - RUSLE

Per analizzare convenientemente tutti i fattori in gioco occorrono indagini complesse per le quali un approccio modellistico previsionale può costituire un utile riferimento.

La ricerca sull'erosione del suolo e il suo effetto sulla produttività agricola è iniziata negli Stati Uniti negli anni '30. Tra il 1940 e il 1956, vari ricercatori hanno iniziato a sviluppare una procedura quantitativa per stimare la perdita del suolo. Fra i fattori presi in considerazione nelle equazioni iniziali per la stima della perdita di suolo, la pendenza e le pratiche agricole hanno assunto un ruolo principale.

Nel 1946, un gruppo di specialisti sull'erosione tenne un workshop nell'Ohio per rivalutare i fattori precedentemente utilizzati e aggiunse il fattore relativo alla pioggia. Nel 1954 l'*United States Department of Agriculture* (USDA) e l'*Agricultural Research Service* (ARS) fondarono il "*National Runoff and Soil Loss Data Center*" all'Università di Purdue, nell'Indiana, per individuare, assemblare e consolidare tutti i dati disponibili per l'intero territorio americano. Più di 10.000 schede annuali di dati relativi al *runoff* e alla perdita del suolo provenienti da diversi progetti di ricerca, sviluppati in 49 località americane, furono quindi raccolti.

Basandosi sui questi dati e su studi precedenti, Wischmeier, Smith e altri hanno sviluppato l'*Universal Soil Loss Equation* (USLE), il cui manuale è stato pubblicato nel 1965 e rivisto nel 1978 (Wischmeier e Smith, 1978). L'equazione fornisce una previsione della quantità media annua, nel lungo periodo, della perdita di suolo A, causata dall'erosione idrica, su una superficie unitaria avente un determinato uso e copertura vegetale, attraverso la relazione:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad [1]$$

in cui:

- A perdita di suolo media annua per unità di superficie
- R fattore climatico (aggressività della pioggia)
- K fattore pedologico (erodibilità del suolo)
- L fattore topografico relativo alla lunghezza della parcella
- S fattore topografico relativo alla pendenza della parcella
- C fattore di vegetazione (copertura vegetale)
- P fattore tecnica sistematoria relativo alle pratiche agricole.

Ricerche ed esperimenti successivi, unitamente alla disponibilità di dati e risorse, hanno portato allo sviluppo della *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) (Renard et al. 1997) per indirizzare specificatamente la sua applicazione ad aree con usi del suolo diversi da quelli strettamente agricoli. La RUSLE, che mantiene la stessa formula della USLE, presenta numerosi miglioramenti nella determinazione dei singoli fattori, quali l'utilizzo di un approccio per sottofattori nella definizione dei fattori di copertura (C) e delle pratiche agricole (P); l'impiego di relazioni variabili nel tempo per i fattori di erodibilità (K) e climatico (R); lo sviluppo di una nuova equazione per la definizione della lunghezza del versante e della sua pendenza (LS), allo scopo di migliorare la precisione ed estendere l'applicabilità a versanti più ripidi.

Il fattore K di erodibilità del suolo

Fra i molteplici parametri che caratterizzano un suolo, quelli che certamente influenzano l'erosione idrica sono la composizione e la tessitura che incidono sulla permeabilità e, quindi, sullo

scorrimento superficiale dell'acqua. La tessitura, in particolare, indica la proporzione fra le particelle costituenti il terreno, classificate in base alle loro dimensioni.

Argilla: particelle di dimensioni inferiori a 0,002 mm

Limo: particelle di dimensioni comprese fra 0,002 mm e 0,05 mm

Sabbia: particelle di dimensioni superiori a 0,05 mm e fino ai 2 mm.

Il fattore K di erodibilità, valutato empiricamente da Wischmeier e Smith per una “parcella” lavorata a maggese (rittochino), lunga 22,13 m ed avente pendenza del 9%, è stato oggetto di ulteriori studi che ne hanno consentito l'estensione ad altre tipologie di suolo attraverso l'utilizzo di abachi predisposti dagli stessi Autori.

Il Dipartimento dell'Agricoltura statunitense (USDA), ha proposto, in funzione della tessitura e del contenuto di sostanza organica del suolo una stima del fattore K, dalla quale, sulla scorta delle tipologie di suolo individuate nel triangolo della tessitura, considerando un contenuto di sostanza organica pari al 2%, è stata elaborata la seguente tabella.

Tipo di suolo (contenuto di sostanza organica: 2%)	Fattore K [Mg ha h / ha MJ mm]
1. Sabbia	0,00395
1.a. Sabbia fine	0,01844
1.b. Sabbia molto fine	0,04741
2. Sabbia Franca	0,03161
2.a. Sabbia Franca fine	0,03951
2.b. Sabbia Franca molto fine	0,05400
3. Franco Sabbioso	0,01317
3.a. Franco Sabbioso fine	0,02634
3.b. Franco Sabbioso molto fine	0,05005
4. Franco	0,04478
5. Franco Limoso	0,05531
6. Limo	0,06848
7. Franco Argilloso Sabbioso	0,03293
8. Franco Limoso Argilloso	0,04214
9. Argilla Limosa	0,03293
10. Argilla Sabbiosa	0,01712
11. Franco Argilloso	0,04083
12. Argilla	0,01712-0,03819

Figura 2 – Stima del fattore K secondo USDA, con le unità di misura del S.I.

Per la zona oggetto di studio è stata presa in considerazione la Carta Pedologica regionale della Puglia (Progetto ACLA 2, 2001) da cui sono state estrapolate le caratteristiche di tessitura per ciascun suolo e, sulla scorta dei valori individuati nella tabella precedente, determinato il fattore K. Si è ottenuta, in funzione del fattore K, una “Carta di erodibilità” dei suoli che mostra la differente attitudine dei suoli indagati rispetto al fenomeno erosivo.

Il fattore L×S di topografia

Questo fattore tiene conto, insieme, della lunghezza dell'elemento territoriale considerato e della sua pendenza e rappresenta il rapporto fra la perdita di suolo dell'elemento considerato e quello di una “parcella” unitaria di lunghezza pari a 22,13 mt e pendenza costante pari al 9%, a parità di altre caratteristiche.

Il parametro L×S rappresenta, quindi, un parametro di confronto della erodibilità di un versante: in particolare quando $L \times S < 1$ l'erosione è inferiore a quella della “parcella unitaria”, mentre valori di $L \times S > 1$ indicano situazioni più erosive di quella “standard”.

Entrando nel dettaglio della valutazione di L ed S si ha:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \quad [2]$$

in cui:

λ lunghezza del versante espressa in metri

m parametro variabile con la pendenza

m	pendenza
0,6	> 10%
0,5	5 – 10%
0,4	3 – 5%
0,3	1 – 3%
0,2	< 1%

Figura 3 – Variabilità di m in funzione della pendenza.

mentre

$$S = 65,41 \times \sin^2 \vartheta + 4,56 \times \sin \vartheta + 0,065 \quad [3]$$

in cui:

ϑ è l'angolo corrispondente alla pendenza: $\vartheta = \arctg(i)$

Per valutare il fattore di topografia $L \times S$, nel presente studio, è stato considerato, quale base cartografica, il Modello Digitale del Terreno (DTM) disponibile per tutto il territorio regionale.

Il DTM si presenta come un grigliato regolare, con passo di griglia di 8 metri, realizzato nel Sistema di riferimento UTM-WGS84, fuso 33. Le quote del DTM sono riferite al terreno, tranne in caso di presenza di bacini idrografici (in questo caso la quota è quella relativa al livello dell'acqua al momento del rilievo). Nel caso dei centri urbanizzati, le quote sono riferite al piano della viabilità (piazze, giardini, ecc) e mai alla sommità degli edifici.

Si ottiene, in funzione del fattore $L \times S$, una “Carta di erodibilità” dei versanti che mostra la differente attitudine territoriale rispetto al fenomeno erosivo.

Il fattore C di copertura vegetale

Questo fattore considera gli effetti che la copertura vegetale ha sul processo erosivo tenendo conto dei differenti tipi di copertura vegetale, di successione culturale e di gestione dei residui colturali sul territorio.

Per la classificazione degli elementi territoriali in funzione della “copertura vegetale” è stata considerata, quale base cartografica, la Carta di Uso del Suolo elaborata dalla Regione Puglia.

La classificazione della Carta di Uso del Suolo è stata aggregata in 6 macro-classi per le quali, tenuto conto delle elaborazioni del fattore C esistenti in letteratura (Chisci e Zanchi, 1994 – Gisotti, 1983) è possibile attribuire i valori riportati nella tabella seguente.

id	Classe di uso del suolo	Fattore C
1	Area urbana / Acque superficiali	0,00
2	Bosco	0,03
3	Macchia	0,07
4	Seminativo / prato	0,15
5	Oliveto	0,30
6	Vigneto	0,42

Figura 4 – Macro-classi di uso del suolo e relativo fattore C.

Risultati dell'analisi

Combinando i fattori del modello USLE con le tecniche GIS, è possibile, per la porzione di territorio considerata, individuare una stima delle perdite di suolo specifiche.

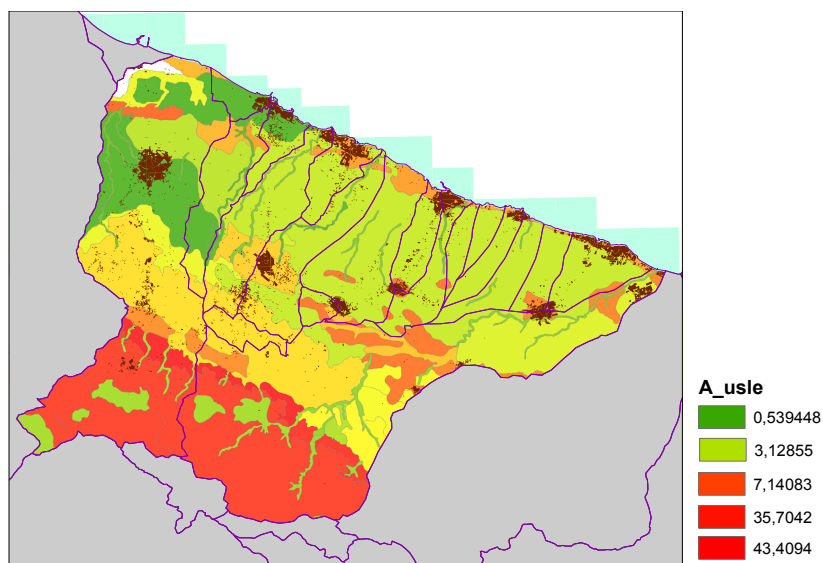


Figura 5 – Perdita di suolo specifica per il territorio considerato.

L'analisi evidenzia perdite di suolo comprese fra 0,54 e 43,40 [Mg/ha] all'anno, esclusi i territori urbanizzati, che è possibile raggruppare in "classi di vulnerabilità" secondo la tabella seguente, in accordo con la classificazione della Comunità Europea (Montanarella et al. 2000).

Classe di vulnerabilità	Perdita di suolo [Mg/ha anno]
molto bassa	0,54 < 1,50
bassa	1,50 < 2,90
moderata	2,90 < 8,70
alta	8,70 < 17,80
molto alta	17,80 < 43,40

Figura 6 – Classi di vulnerabilità.

La distribuzione spaziale della perdita di suolo specifica, come mostrato in figura 5, mette in rilievo che nella "piana" prospiciente il Mare Adriatico le "perdite" sono contenute (inferiori a 9 Mg/ha per anno), mentre diventano significative nella fascia del "gradino murgiano" in cui si evidenzia un forte cambiamento di pendenza, salendo fino a 43 Mg/ha per anno, per poi abbassarsi nuovamente nella zona dell'altopiano delle Murge, in cui la diminuzione delle pendenze e la presenza di aree boscate determina una sensibile riduzione della perdita di suolo.

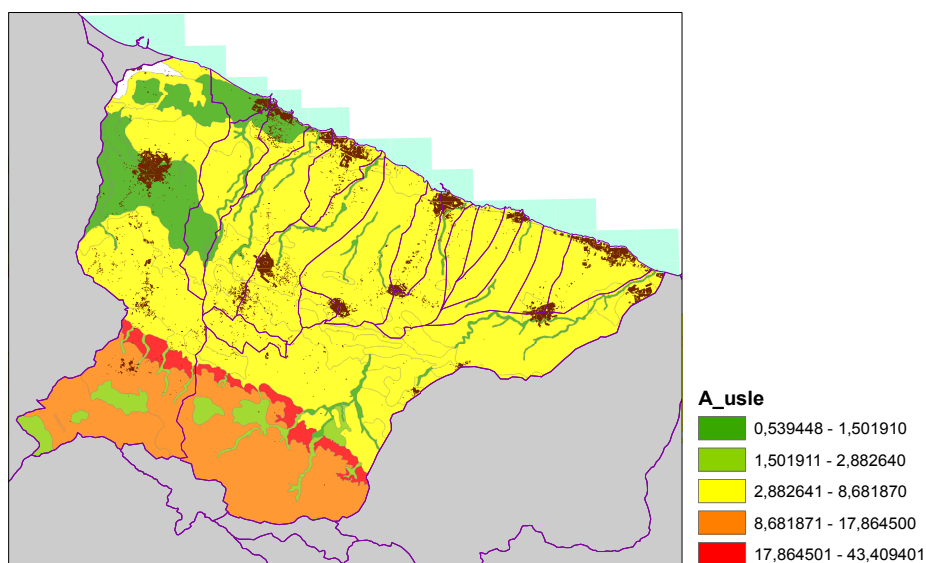


Figura 7 – Classi di vulnerabilità territoriale relative alla perdita di suolo.

La funzione del bosco, in tema di difesa del suolo, è universalmente riconosciuta anche se, spesso, senza comprendere fino in fondo la dinamica del fenomeno. Infatti non è tanto il supposto effetto “intercettativo” delle chiome degli alberi a garantire la protezione, quanto la presenza del sottobosco attraverso la vegetazione bassa e la lettiera (Leone, 2004).

Il Vincolo Idrogeologico per finalità di difesa del suolo

Al fine di comprendere genesi e finalità del “vincolo idrogeologico” è utile fare un breve excursus storico delle norme in difesa dei suoli.

Grazie alla promulgazione del R.D.L. 30 dicembre 1923, n. 3267 (Legge Serpieri) e del suo regolamento (R.D. 16 maggio 1926, n. 1126) lo Stato Italiano ha organizzato tutti gli interventi a carattere pubblico in materia di sistemazione idraulico-forestale.

Il R.D.L. 3267/23, tuttora in vigore, dal titolo: “*Riordinamento e riforma in materia di boschi e terreni montani*” sottopone a “*vincolo per scopi idrogeologici i terreni di qualsiasi natura e destinazione che, per effetto di forme di utilizzazione contrastanti con le norme di cui agli artt. 7, 8 e 9 (articoli che riguardano dissodamenti, cambiamenti di coltura ed esercizio del pascolo n.d.r.), possono con danno pubblico subire denudazioni, perdere la stabilità o turbare il regime delle acque*”. Lo scopo principale del vincolo idrogeologico è, quindi, quello di preservare l’ambiente fisico e di garantire che tutti gli interventi che interagiscono con il territorio non compromettano la stabilità dello stesso, né inneschino fenomeni erosivi, con possibilità di danno pubblico. Esso, in generale, non preclude la possibilità di intervenire sul territorio, ma subordina gli interventi “*ad autorizzazione del Comitato Forestale e alle modalità da esso prescritte, caso per caso, allo scopo di prevenire i danni*”.

Dopo il trasferimento alle Regioni a Statuto ordinario e alle Provincie Autonome, delle funzioni amministrative in materia di vincolo idrogeologico, avvenuto con il D.P.R. 24 luglio 1977, n. 616, gli Enti interessati hanno legiferato in materia, rifacendosi necessariamente alla legislazione statale. La Regione Puglia, con la Legge Regionale 30 novembre 2000, n. 18 recante “*Conferimento di funzioni e compiti amministrativi in materia di boschi e foreste, protezione civile e lotta agli incendi boschivi*” ha disciplinato il conferimento alla Regione di tutte le funzioni statali di cui al RDL 3267/23.

Attualmente, dunque, le funzioni amministrative in materia di vincolo idrogeologico ai sensi del RDL 3267/23, sono gestite dalla Regione Puglia – Servizio Foreste che rilascia l'autorizzazione (nulla osta) ad interventi su aree sottoposte a vincolo, individuate su apposita cartografia, a seguito di istanza cui deve essere allegata apposita documentazione che rappresenti lo stato reale dei luoghi, per un intorno rappresentativo; la descrizione puntuale dell'intervento con parametri di valutazione precisi ed oggettivi circa l'inserimento dello stesso nel contesto vegetazionale ed idrogeologico dei luoghi; nonché una valutazione della possibile futura trasformazione che l'intervento stesso può determinare.

Discussione del Vincolo Idrogeologico in relazione alla vulnerabilità territoriale riferita alle perdite di suolo secondo il modello USLE

Al fine di discutere i risultati dell'analisi sull'erosione idrica dei suoli, come rappresentati nella Carta delle vulnerabilità territoriali di figura 7, in relazione alle aree sottoposte a vincolo idrogeologico, è utile sovrapporre le cartografie: risulta evidente (Figura 8) come risultino vincolate zone con perdite di suolo “basse”, mentre ampie zone con vulnerabilità alta o molto alta risultano libere da qualsiasi vincolo.

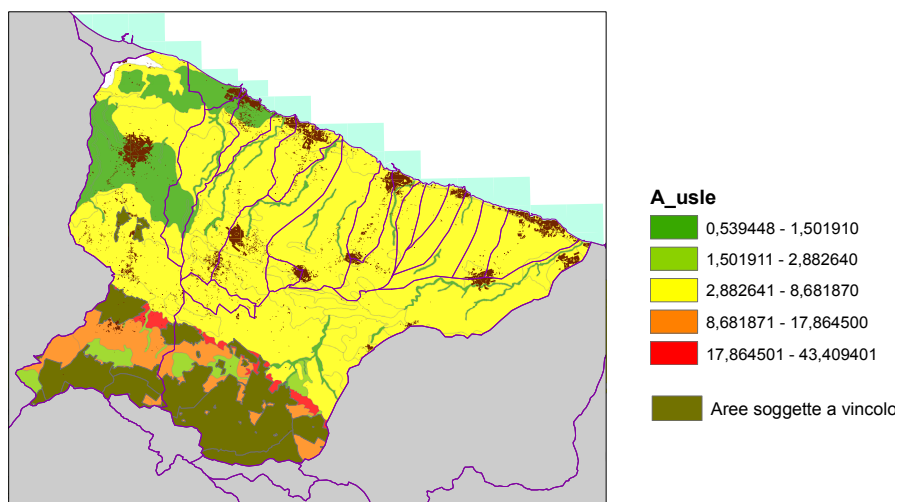


Figura 8 – Sovrapposizione delle aree sottoposte a vincolo idrogeologico alla “carta della vulnerabilità territoriale” in base al modello USLE.

Si impone, pertanto, una riflessione sulla attuale gestione della “difesa del suolo” che possa fornire indicazioni per una pianificazione di area vasta quale, ad esempio, quella di livello provinciale. Infatti, è proprio la Provincia l'Ente destinatario delle funzioni amministrative inerenti la difesa del suolo (art. 19 del Testo Unico degli Enti Locali – D.Lgs. 267/2000). Essa, inoltre, attraverso il Piano territoriale di coordinamento, indica “*le linee di intervento per la sistemazione idrica, idrogeologica ed idraulico-forestale ed in genere per il consolidamento del suolo e la regimazione delle acque*” (art. 20 del T.U. degli Enti Locali).

Anche il Documento Regionale di Assetto Generale della Puglia, nel dettare indirizzi per la formazione dei Piani Territoriali di coordinamento provinciali, indica, tra i contenuti: “*i caratteri del sistema ambientale del territorio provinciale, con particolare riferimento agli aspetti geologici, con specificazione delle parti di esso soggette a dissesto idrogeologico; ai caratteri fisici e morfologici, alla biodiversità floristica e faunistica e al patrimonio forestale; al sistema della naturalità e alle aree protette esistenti nel territorio provinciale e oltre.*”

Una prima indicazione potrebbe essere quella di inserire, nella cartografia del Piano, la “Carta della vulnerabilità territoriale” con riferimento alla erosione idrica dei suoli, elaborata a livello provinciale. Ciò consentirebbe di individuare ambiti territoriali sovralocali nei quali proporre indirizzi e politiche finalizzate a favorire l’uso corretto delle risorse territoriali, basate, ad esempio, su un sistema di incentivazione/dis-incentivazione rispetto ad interventi che influiscano sulla “perdita di suolo”.

In altri termini, poiché per ogni area territoriale è noto il valore di A_0 (perdita di suolo unitaria annua) nelle condizioni attuali, ogni intervento di trasformazione implicherà necessariamente un nuovo valore della stima della perdita di suolo: A_P

Laddove il rapporto A_P/A_0 dovesse risultare inferiore all’unità, si otterrebbe un miglioramento della situazione di vulnerabilità dell’area, viceversa situazioni in cui $A_P/A_0 > 1$ indicano un peggioramento della situazione. Ora, poiché i fattori influenti sulle perdite di suolo, secondo il modello USLE, relativi al clima, al tipo di suolo ed alla topografia dello stesso, restano sostanzialmente invariati, il rapporto A_P/A_0 risulta pari a:

$$\frac{A_P}{A_0} = \frac{C_P \times P_P}{C_0 \times P_0} \quad [4]$$

Ciò significa che ogni intervento di trasformazione può essere valutato, in relazione alla vulnerabilità nei confronti dell’erosione idrica, in base alla variazione del fattore di copertura vegetale e del fattore relativo alle tecniche sistematorie del suolo.

Pertanto è possibile proporre alcune linee guida di gestione territoriale.

Nelle aree già sottoposte a vincolo idrogeologico, si potrebbe pensare di inserire sistemi di valutazione del rapporto A_P/A_0 in modo tale che, individuate delle classi di tassazione/incentivo, oltre a rilasciare il prescritto nulla osta, si arrivi a privilegiare/ostacolare gli interventi che influiscano sulla vulnerabilità, come a titolo esemplificativo proposto nella tabella seguente.

A_P/A_0	tassazione	incentivo
$> 1,0$	intervento non ammissibile	
$0,8 \div 1,0$	tariffa A	
$0,6 \div 0,8$	tariffa B	
$0,5 \div 0,6$		incentivo A
$< 0,5$		incentivo B

Figura 9 – Tassazione/incentivo per interventi nelle zone sottoposte a vincolo idrogeologico.

Negli ambiti territoriali non sottoposti a vincolo idrogeologico, classificati con vulnerabilità “alta” o “molto alta”, al fine di attuare una corretta difesa del suolo, si potrebbe proporre un sistema di incentivazione sempre basato sul rapporto A_P/A_0

A_P/A_0	incentivo
$> 0,6$	Intervento non incentivabile
$0,5 \div 0,6$	incentivo A
$< 0,5$	incentivo B

Figura 10 – Incentivazione per interventi nelle zone con vulnerabilità “alta” o “molto alta” non sottoposte a vincolo idrogeologico.

Conclusioni

Partendo da un nuovo e più adeguato concetto di “territorio” e di “paesaggio” inteso come frutto della interazione di componenti naturali ed antropiche, con l’obiettivo contribuire ad attuare una corretta gestione delle risorse territoriali, questo lavoro indaga uno dei fenomeni che incidono sulla “costruzione” del paesaggio: l’erosione idrica del suolo, al fine di riconoscere i diversi gradi di vulnerabilità e fornire indicazioni alla pianificazione territoriale.

Lo studio è condotto utilizzando un approccio modellistico, già sviluppato negli anni ’70-’80 del secolo scorso (modello USLE), implementato con tecniche digitali in grado di gestire e processare un gran numero di dati territoriali (GIS), per ottenere, in output, elaborazioni cartografiche riassuntive.

I risultati, messi a confronto con gli attuali sistemi di gestione territoriale in tema di difesa del suolo, basati soprattutto su un approccio vincolistico, ex RDL 3267/23, fanno scaturire alcune riflessioni.

Discutendo il rapporto tra perdite di suolo stimate con il modello USLE ed aree sottoposte a vincolo idrogeologico ai sensi del RDL 3267/23, si individuano possibili implicazioni sulla pianificazione territoriale di livello provinciale ed indicazioni operative circa la gestione del territorio attraverso politiche di incentivazione/dis-incentivazione degli interventi.

Bibliografia

- Arnoldus H.M.J. (1977) “*Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco*”, FAO Soils Bull. n. 34.
- Arnoldus H.M.J. (1980) “*An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation*”, Assessment of erosion, Wiley & Sons, England.
- Cantelmo C. (1983) “*Legislazione forestale e montana*”, Edizioni Nuove Dimensioni, Roma.
- Chisci G. Zanchi C. – “*Aspetti agronomici della conservazione dei suoli in pendio: Coperture vegetali e sistemi agricoli*”, Rivista di Agronomia, n. 4, 1994.
- Commissione Europea (2006) “*Strategia tematica per la protezione del suolo*”. Proposta di direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio per la modifica della direttiva 2004/35/CE.
- Frassoldati C. (1960) “*L’ordinamento giuridico forestale e montano in Italia*”, Acc. Ital. Sc. Forest. Firenze.
- Giordano A. (2006) “*Per un codice di progetto del paesaggio*”, Frames. Frammenti di architettura e paesaggio, Libreria Internazionale Cortina, Padova.
- Gisotti G. (1983) “*Geologia e pedologia nell’assetto del territorio*”, Edagricole.
- Hillel D. (1998) “*Environmental Soil Physics*”, Academic Press.
- Leone A. (2004) “*Ambiente e territorio agroforestale*”, Franco Angeli.
- Leone A. (2009) “*Riflessione sul paesaggio*”, Aracne editrice, Roma.
- Montanarella L. e Altri (2000) “*Programma d’Azione per la Lotta alla Siccità e alla Desertificazione. Indicazione delle aree vulnerabili in Puglia*”. European Commission. European Soil Bureau.
- Pavari C. (1916) “*Studio preliminare sulla coltura di specie forestali esotiche in Italia*”, Annali del Regio Istituto Superiore Forestale Nazionale, Firenze.
- Progetto ACLA 2 (2001) “*Caratterizzazione agroecologica della Regione Puglia in funzione della potenzialità produttiva*”, CHIEAM – IAM Bari.
- Regione Puglia – Banca dati Sistema Informativo Territoriale: <http://www.sit.puglia.it/>.
- Regione Puglia – Banca dati Servizio Idrografico e Mareografico del Settore Protezione Civile: <http://www.protezionecivile.puglia.it/>.
- Regione Puglia – Documento Regionale di Assetto Generale (DRAG). (2009) “*Indirizzi, criteri e orientamenti per la formazione, il dimensionamento e il contenuto dei Piani territoriali di coordinamento provinciale (PTCP)*”.

- Regione Puglia: Piano di Tutela delle Acque. (2010) *“Prima fase di caratterizzazione dei corpi idrici superficiali della Regione Puglia: tipizzazione dei corsi d'acqua superficiali, dei bacini lacustri, delle acque marine-costiere e delle acque di transizione”*.
- Renard K.G. Freimund J.R. (1994) *“Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE”*, Journal of Hydr. N. 157.
- Renard, K.G. Foster G.A. Weesies, D.K. McCool and D.C. Yoder (1997) *“Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)”*, Agricultural Handbook no. 703. U.S. Department of Agriculture Research Service, Washington D.C., USA.
- Silletti G. (2007) *“Danni Alluvionali in Puglia: non dimentichiamoci della difesa del suolo”*, Silvae – Anno II, n. 5.
- Trifone R. (1957) *“Storia del diritto forestale in Italia”*, Acc. Ital. Sc. Forest. Firenze.
- Yu B. Rosewell C.J. (1996) *“A robust estimator of R-factor for the universal soil loss equation”*, Trans. ASAE n. 39.
- Wischmeier W.H. and Smith D.D. (1978) *“Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning”*, Agricultural Handbook no. 537, Science and Educational Administration, U.S. Dept. Agr., Washington D.C.
- Van der Knijff J.M., Jones R.J.A., Montanarella L. (2000) *“Soil Erosion Risk. Assessment in Europe”*. European Commission. European Soil Bureau.

Analisi del degrado nel campo dei Beni Culturali con sensori termici calibrati geometricamente

Gabriele Bitelli, Fabrizio Girardi, Marcella Mannina

DICAM, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, Bologna
(gabriele.bitelli; fabrizio.girardi@unibo.it, marcella.mannina@unibo.it)

Riassunto

Il lavoro presenta alcune esperienze effettuate nell'integrazione tra sensori diversi nel settore dei Beni Culturali: in particolare vengono trattati dati di tipo termico e ottico a supporto dell'analisi del degrado di affreschi.

Abstract

The paper presents some experiences made in the integration of different sensors in the field of Cultural Heritage, in particular are treated thermal and optical data to support analysis of the degradation of frescoes.

Le potenzialità di documentazione ed indagine nel campo dei Beni Culturali si sono accresciute in questi anni con lo sviluppo di nuovi sensori e strumenti, utilizzabili in modo autonomo o integrato fra loro: camere digitali ad elevate prestazioni, laser a scansione terrestri di diverse tipologie, camere multispettrali, iperspettrali e termiche a risoluzione sempre maggiore, radar, ecc. Il progetto di intervento di manutenzione e restauro conservativo, volto alla riqualificazione del patrimonio culturale esistente, può giovare secondo diversi aspetti, con la possibilità di disporre di prodotti nuovi e di grande valenza ed interesse.

Considerando per esempio le tecniche di restauro degli affreschi, esse nel passato hanno coinvolto sistemi tradizionali a vista, mentre ad oggi con l'avvento delle nuove tecnologie digitali, multispettrali e a scansione, è possibile ottenere un dato oggettivo, tridimensionale e geometricamente corretto. Il rilievo termico documenta la situazione di degrado o conservazione delle superfici murarie decorate a fresco, mettendo in evidenza la presenza di patologie superficiali presenti sulle murature legate a forti transitori termici e termo-igrometrici (zone calde/zone fredde/zone umide) dovuti ai materiali, alle tecniche costruttive, alle modifiche che l'oggetto ha subito nel tempo e al persistere di condizioni favorevoli alla loro manifestazione. L'analisi di immagini su affreschi con tecniche termo-spettrali fornisce la misura della radianza spettrale mediante il sensore infrarosso della camera termica, ma non consente come noto di risalire alla effettiva temperatura superficiale se non si conoscono le proprietà di emissività ed assorbimento dei materiali; su superfici affrescate, ai fini di determinare e delineare le diverse componenti, si procede con sollecitazioni indotte mediante tecnica d'approccio attivo. L'integrazione tra il dato termico e quello metrico (fotogrammetrico) a maggiore risoluzione è poi essenziale per una rappresentazione e mappatura accurata del degrado degli affreschi.

Ai fini dell'analisi del degrado presente su di una parete affrescata dell'inizio del XXVII secolo, si riporta uno studio di calibrazione condotto in laboratorio adoperando una camera termica FLIR 620 serie P dotata di un sensore multispettrale con risoluzione geometrica di 640x480 pixels (0.3 Mpixels) e di un sensore ottico operante nel visibile con risoluzione di 3.2 Mpixels.

Per questi due sistemi disallineati tra loro e di tipo non fotogrammetrico, risultano incogniti i parametri di orientamento interno, indispensabili ai fini di una successiva restituzione metrica dell'oggetto rilevato in fase di acquisizione.

La calibrazione del sensore termico è essenziale per individuare un oggetto nella sua corretta posizione e consentire l'uso congiunto dell'immagine termica con quella ottica fornita da un rilievo fotogrammetrico o con dati di diversa natura ad alto dettaglio (es. mesh da rilievo laser a scansione). L'approccio scelto per la calibrazione è il bundle adjustment generale con field calibration, mediante il quale vengono stimati i parametri di calibrazione incogniti e l'orientamento della camera, utilizzando un set di punti derivanti da un rilievo laser a scansione ad alta densità.

La calibrazione avviene dunque attraverso misure condotte in situ, operando su un numero sovrabbondante di punti di controllo opportunamente scelti e distribuiti, collimati da una o più posizioni. La bontà del grado di accuratezza raggiunto è valutata in raffronto alle dimensioni del pixel.

Il lavoro si propone di illustrare attività preliminari alle operazioni di restauro, presentando un caso di studio e indicando la metodologia di registrazione delle acquisizioni effettuate dai due sistemi ottici (visibile e termico) allo scopo di co-registrarle e orientarle spazialmente per la produzione di ortofoto e per procedure di classificazione condotte con procedimenti desunti anche dal campo dell'analisi di immagini telerilevate. Il rilievo può supportare l'intervento da parte dei tecnici nel campo del restauro, individuando o evidenziando per esempio le parti più soggette ad azioni di degrado.

Bibliografia:

Borgogno Mondino E., Grua M., Lingua A., Giulio Tonolo F. (2005), "Tecniche Innovative per il rilievo di affreschi murali", Atti ASITA, Catania.

Spanò A., Massa A., Testa P., Volinia M. (2005), "Integrazione e confronto di dati termografici e fotogrammetrici per la conservazione dei beni culturali", Convegno SIFET, Palermo.

Bitelli G. (2002), "Moderne tecniche e strumentazione per il rilievo dei beni culturali", Atti ASITA, Perugia.

Rinaudo F. (2010), "Nuovi strumenti per la modellazione 3D: Le camere TOF", Convegno Nazionale – Tecniche di analisi per la conservazione dei beni architettonici, archeologici ed ambientali: nuove prospettive, Napoli.

Gianinetto M., Giussani A., Roncoroni F., Scaioni M. (2005), "Integration of Multi-Source Close-Range Data", CIPA Symposium, Torino.

Luhmann L., Ohm J., Piechel J., Roelfs T. (2010), "Geometric calibration of thermographic cameras", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.

Metodologia per la determinazione con alta precisione del dislivello esistente tra due punti nell'attraversamento di zone impraticabili

Gabriele Bitelli (*), Gianfranco Roncari (**), Maria Alessandra Tini (*), Luca Vittuari (*)

(*) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Università di Bologna
Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, e-mail: [gabriele.bitelli; mariaalessandra.tini; luca.vittuari] @unibo.it

(**) ENI s.p.a.

Riassunto

L'avvento sul mercato di stazioni totali topografiche di alta precisione, caratterizzate da incertezze nominali nelle misure angolari di $\pm 0.5''$ e precisioni del distanziometro di $\pm (0.6 \div 1.0 \text{ mm} + 1 \text{ p.p.m.})$, consente oggi di effettuare, mediante idonee metodologie di rilevamento, collegamenti altimetrici con precisioni che possono essere quasi paragonabili a quelle ottenibili con la livellazione geometrica di alta precisione su linea. Tale caratteristica è in particolare di grande interesse laddove non sia possibile procedere alla livellazione geometrica per motivi logistici o di altro tipo: un esempio è rappresentato dai collegamenti altimetrici che devono superare aree impraticabili, per esempio nell'attraversamento di corsi d'acqua richiesto dallo sviluppo di lunghe linee di livellazione realizzate per il controllo dei movimenti del suolo. Attualmente tali collegamenti altimetrici in aree impraticabili vengono effettuati principalmente mediante l'impiego di livelli ottico-meccanici usati in modo reciproco, con una procedura che presenta tuttavia alcune difficoltà. Nel presente lavoro sono mostrati i risultati raggiunti in alcune sperimentazioni condotte nell'attraversamento di bracci di mare o bocche di porto, di larghezza compresa tra i 71 metri e circa un chilometro. In particolare viene descritta la sperimentazione effettuata mediante l'impiego principale di due stazioni totali robotiche di alta precisione (Leica Geosystems modelli TS30 e TCA2003), utilizzate in misure simultanee e reciproche presso le rive opposte, sia su di un poligono di test realizzato ad hoc che in condizioni di reale produzione.

Introduzione

Nell'ambito delle misure di controllo dei movimenti verticali del suolo su vaste aree, talvolta è necessario effettuare l'attraversamento di corsi d'acqua o di aree impraticabili, nelle quali non possono essere utilizzate le usuali metodologie di rilevamento su linea mediante livellazione geometrica dal mezzo. Storicamente tali collegamenti altimetrici sono stati realizzati principalmente mediante l'impiego di livelli accoppiati di tipo ottico-meccanico, nella metodologia descritta ad esempio in Gubellini, (1972) per l'attraversamento delle bocche di porto a Venezia (Chioggia, Malamocco, Lido). In quella sperimentazione vennero utilizzate due coppie di autolivelli muniti di un particolare dispositivo ottico a cuneo rotante, in sostituzione dell'usuale micrometro a lamina piano parallela (sistema di quattro autolivelli Zeiss Ni2 e mire realizzato appositamente dalla Società Zeiss per l'attraversamento dei corsi d'acqua).

Secondo questa metodologia ciascuna coppia di autolivelli viene posta in stazione su di un unico treppiede per mezzo di una rigida piastra di appoggio dotata di livella sferica. Al fine di eliminare l'errore residuo di orizzontalità della linea di mira i due autolivelli accoppiati vengono adattati all'infinito e posti in posizione di collimazione reciproca. In questa posizione infatti le linee di mira della coppia di strumenti risultano parallele tra loro, inclinate della stessa quantità rispetto all'orizzontale, ma una volta che i due strumenti vengono ruotati in posizione di lettura, una linea di mira punterà verso l'alto e l'altra verso il basso della stessa quantità. La stabilità di tale angolo è

affidata, nel breve periodo necessario per la lettura, alla sensibilità del compensatore pendolare, che per questi livelli è di $\pm 0.2''$. La media delle due letture eseguite con gli strumenti accoppiati risulterà quindi equivalente a quella eseguita da un unico strumento con linea di mira quasi perfettamente orizzontale. Le letture alle stadie verrebbero però eseguite in questo modo a stima; al fine di poter effettuare invece una collimazione di precisione mediante coincidenza di immagini, si agisce sulla regolazione del cuneo posto davanti all'obiettivo di ciascun livello, rotante mediante una vite micrometrica. Attraverso questa operazione di inclinazione controllata della linea di mira viene realizzata la collimazione di una coppia di mire di grandi dimensioni, appositamente realizzate per le lunghe distanze, messe in stazione sulla riva opposta dell'attraversamento e disposte sulla verticale grazie ad un apposito supporto. Il sostegno è realizzato in modo tale da poter scegliere la posizione reciproca dei segnali secondo tre possibili valori di dislivello (20-40-60 cm) con una precisione di tali valori al decimo di mm. Il collegamento altimetrico tra la mira inferiore e il caposaldo di livellazione è poi eseguito localmente, mediante una serie di letture ad una stadia posta in stazione sul caposaldo di riferimento.

In modo analogo e contemporaneo sono effettuate le misure dall'altra riva, compensando così anche l'effetto indotto dalla rifrazione simmetrica dell'aria, quindi come sorgente residuale di errore dell'intero metodo resta principalmente l'effetto della rifrazione asimmetrica.

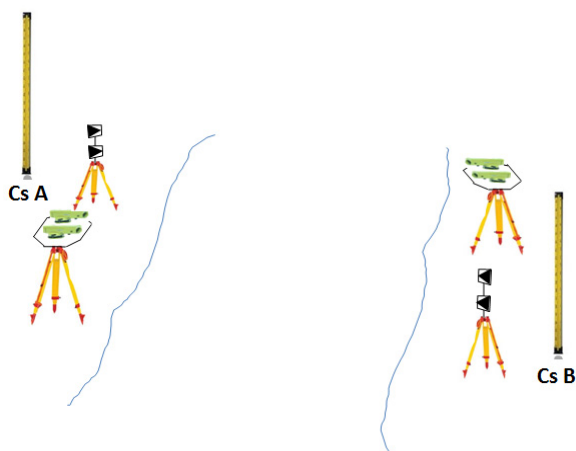


Figura 1 – Schema della configurazione strumentale necessaria per l'esecuzione di misure di collegamento altimetrico attraverso aree impraticabili, tramite l'impiego di livelli accoppiati.

Tale metodo fu adottato anche dall'IGM nel 1968 quando effettuò le misure per conto del Magistrato alle Acque di Venezia, per l'attraversamento delle bocche di porto. Dalla sperimentazione effettuata in quegli anni venne dimostrato che questo metodo di misura può consentire precisioni paragonabili, in termini di errore chilometrico, con quelle raggiungibili mediante livellazione geometrica dal mezzo di alta precisione su linea.

Presso la Facoltà di Ingegneria di Bologna furono realizzate negli anni '70 numerose sperimentazioni di tale metodo (Gubellini, 1972, De Sanctis et al, 1973) evidenziandone il limite di applicabilità a distanze massime di 2-3 km e raggiungendo precisioni chilometriche fino a $\pm 0.5 \text{ mm} \cdot \sqrt{d(\text{km})}$. Purtroppo però, questo metodo non consente oggi una larga diffusione perché richiederebbe una strumentazione opportunamente realizzata ormai non più commercializzata.

Gatti e Tomassi (1990) sperimentarono una versione semplificata del metodo suddetto basato sull'impiego simultaneo e reciproco della livellazione geometrica su lunga distanza. In questo caso i livelli ottico-meccanici impiegati sono soltanto due (uno per parte) e le letture avvengono

direttamente alle stadiе tramite l'applicazione di una mira scorrevole di grandi dimensioni applicata direttamente alla struttura scatolare esterna della stadia stessa (Fig. 2).

Questo metodo grazie alla sua semplicità di impiego e alla possibilità di raggiungere comunque in condizioni di rettifica strumentali ottimali la precisione chilometrica nella stima del dislivello di $\pm 5 \text{ mm} \cdot \sqrt{d(\text{km})}$, è entrato a far parte delle specifiche tecniche adottate da ENI S.p.A. per le misure altimetriche attraverso le aree impraticabili. La rettifica strumentale però diventa molto importante, in quanto le variazioni nell'orizzontalità della linea di mira dovute alle diverse condizioni di temperatura dei due strumenti modificano la stima del dislivello. Gli autori della metodologia indicano pertanto come necessaria la verifica delle calibrazioni strumentali prima e dopo le misure stesse e prevedono lo scambio degli strumenti a metà di ciascuna sessione di misura della mattina e/o del pomeriggio.



Figura 2 – Da sinistra a destra schema semplificato di attraversamento mediante livelli in posizione reciproca ed esempio di mira collegata alla stadia per le letture da grandi distanze.

Livellazione Trigonometrica

La livellazione trigonometrica (LT) è anch'essa una tecnica di rilievo topografico per la misura dei dislivelli, è stata ampiamente studiata dalla comunità scientifica ed è tuttora frequentemente utilizzata nelle operazioni di rilevamento topografico. La LT si basa sulla misura degli angoli zenitali, oggi giorno contestuali alle misure di distanza in quanto effettuate in genere mediante stazioni totali topografiche.

In particolare, la descrizione delle tecniche di rilevamento di angoli zenitali simultanei e reciproci è largamente trattata in letteratura, ad es. Jordan et al. (1956), Inghilleri (1974), Kahmen & Faig (1988), Schofield & Breach (2007), Tsoulis et al. (2008). Alcuni interessanti studi sono stati fatti per la individuazione di metodologie, alternative alla livellazione geometrica, nella misura dei dislivelli con alta precisione e tra queste tecniche si trova sicuramente la livellazione trigonometrica utilizzata in modalità simultanea e reciproca e differenziale (Gubellini & Unguendoli, 1987).

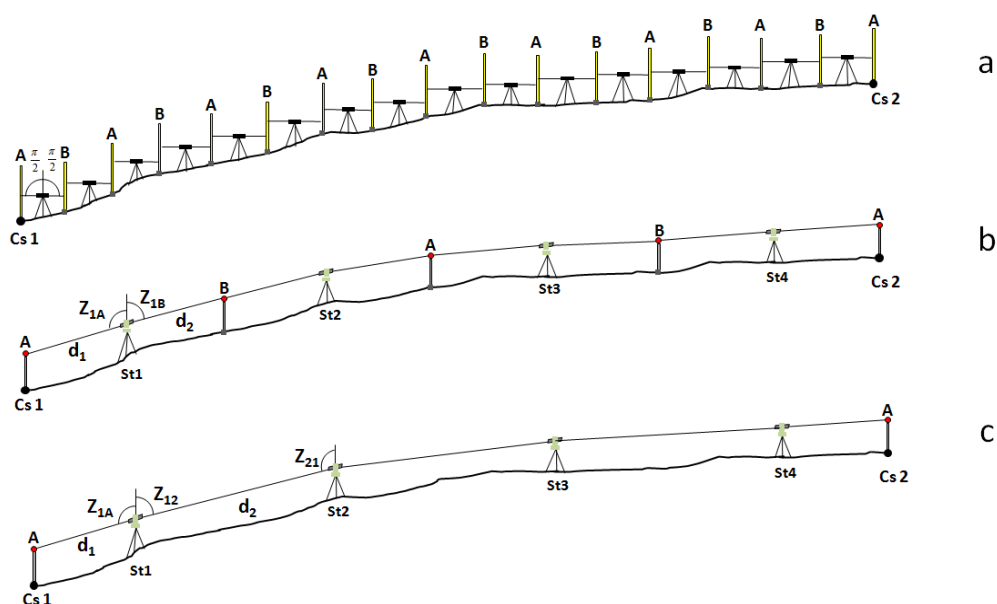


Figura 3 – Schema di utilizzo delle tecniche di livellazione geometrica per la misura di un dislivello esistente tra due capisaldi Cs1 e Cs2 (a), messo a confronto con la LT differenziale (leap-frog) su linea (b) e con una LT simultanea e reciproca adattata per le misure su linea (c).

La LT è stata per lungo tempo relegata a tecnica speditiva per la misura dei dislivelli, utile su grandi distanze, ma non adatta ad essere impiegata nelle reti altimetriche di alta precisione e nel controllo dei movimenti del suolo.

Grazie all'avvento dei distanziometri elettronici negli anni '70 ed ora a maggior ragione grazie alla presenza sul mercato di stazioni totali di alta precisione, la LT può essere considerata una tecnica alternativa che può raggiungere con idonee metodologie di rilievo precisioni dell'ordine di $\pm 1.5 \text{ mm} \cdot \sqrt{d(\text{km})}$ anche su terreni ondulati. La LT presenta inoltre alcuni indubbi vantaggi rispetto alla livellazione geometrica, non solo per la rapidità di esecuzione (soprattutto in presenza di forti pendenze o terreni accidentati), ma anche per la migliore disposizione delle linee di mira rispetto alla stratificazione dell'aria vicino al suolo. Questo effetto, particolarmente evidente in estate sulle strade asfaltate, può causare una incurvatura della linea di mira differente per le due letture, a causa della rifrazione dell'aria indotta dal gradiente termico verticale (figura 4). Per tali motivi alcuni autori suggeriscono l'impiego della LT al posto della livellazione geometrica su linea nella misura delle reti altimetriche di prim'ordine (Zhang, 2005).

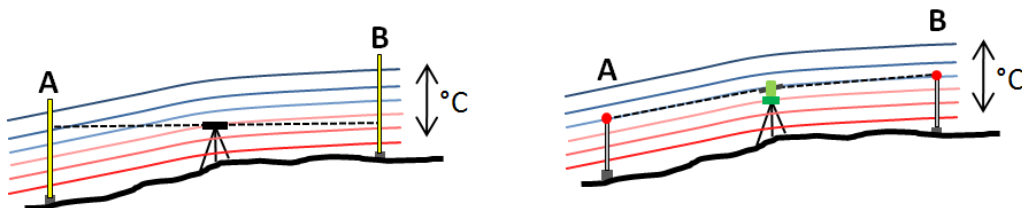


Figura 4 – diversa incidenza degli effetti del gradiente di temperatura verticale sulla linea di mira, nel caso della livellazione geometrica (sinistra) e nel caso della livellazione trigonometrica differenziale (destra).

In realtà le due tecniche sopradescritte non devono essere viste come contrapposte, anche perché in termini di rapidità di rilevamento anche la livellazione geometrica si può avvalere oggi dei rapidissimi livelli digitali, ma anzi si tratta di metodologie di rilevamento complementari, come ad esempio può avvenire nel caso degli attraversamenti delle aree impraticabili.

La LT differenziale e reciproca nell'attraversamento di aree impraticabili

Nell'ottica di voler utilizzare la LT nell'attraversamento di aree impraticabili devono essere fatte alcune considerazioni circa le precisioni raggiungibili. Dal punto di vista strumentale, per l'alta precisione il compensatore di un autolivello è caratterizzato da una precisione leggermente superiore rispetto a quello fornita da una stazione totale: in genere $\pm(0.2'' + 0.4'')$ nel caso dei livelli e $\pm 0.5''$ nel caso delle stazioni totali più evolute.

Nella nostra sperimentazione in particolare sono state utilizzate due stazioni totali Leica (modelli TCA2003 e TS30 in dotazione presso il DICAM) e per un breve periodo anche il modello Leica TM30 gentilmente reso disponibile dalla società Leica Geosystems S.p.A.

Per tutti questi tipi di strumenti la risoluzione della lettura ai cerchi verticali è analoga alla precisione del compensatore ed è di $\pm 0.5''$. Nella misura della distanza il modello TCA2003 presenta una precisione di $\pm(1\text{mm} + 1\text{p.p.m.})$, mentre i modelli TS30 e TM30 sono caratterizzati da un EDM con tecnologia Leica PinPoint con precisione nominale di $\pm(0.6\text{mm} + 1\text{p.p.m.})$.

Considerando un collegamento altimetrico mediante la livellazione trigonometrica differenziale il valore del dislivello può essere ottenuto dalla semplice relazione:

$$\Delta_{12} = D_2 \cos(\varphi_2) - D_1 \cos(\varphi_1) + \frac{1-k_1}{2R} (D_2 \sin(\varphi_2))^2 - \frac{1-k_2}{2R} (D_1 \sin(\varphi_1))^2 + l_{m1} - l_{m2} \quad (1)$$

Dove D_1 e D_2 sono le distanze inclinate alle quali sono state applicate le correzioni atmosferiche e le eventuali correzioni per le costanti dei prismi e delle eccentricità, k_1 ed k_2 sono i coefficienti di rifrazione, φ_1 e φ_2 sono gli angoli zenitali apparenti, R il raggio della sfera locale e l_{m1} ed l_{m2} sono le altezze delle mire (generalmente uguali tra loro o misurate accuratamente con precisioni superiori al decimo di millimetro).

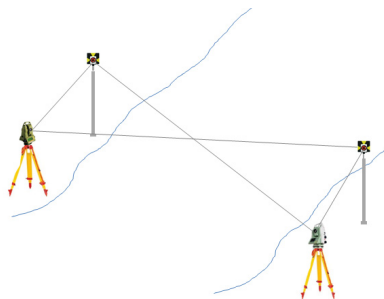


Figura 5 – Schema elementare di attraversamento mediante la misura simultanea e reciproca di due stazioni di livellazione trigonometrica differenziale.

Considerando per ciascuna stazione le distanze orizzontali S_1 e S_2 e considerando simmetrico il coefficiente di rifrazione per le due letture alle mire, il termine di correzione della rifrazione e della curvatura terrestre può essere compattato in: $\frac{1-k}{2R} (S_2^2 - S_1^2)$ e avremo quindi la relazione:

$$\Delta_{12} = S_2 \cotg(\varphi_2) - S_1 \cotg(\varphi_1) + \frac{1-k}{2R} (S_2^2 - S_1^2) + l_{m1} - l_{m2} \quad (2)$$

dalla quale si può osservare che, qualora lo strumento si trovasse in posizione equidistante rispetto alle mire, il termine di rifrazione e curvatura diverrebbe nullo.

Applicando la legge di propagazione della varianza alla stima di ciascuno dei due dislivelli si ottiene quindi:

$$\sigma_d^2 = \left[\cotg(\varphi_2) + S_2 \frac{(1-k)}{R} \right]^2 \sigma_{S_2}^2 + \left[\cotg(\varphi_1) - S_1 \frac{(1-k)}{R} \right]^2 \sigma_{S_1}^2 + \left[\frac{S_2^2}{\sin^4(\varphi_2)} + \frac{S_1^2}{\sin^4(\varphi_1)} \right] \sigma_\varphi^2 + \left(\frac{S_2^2 - S_1^2}{2R} \right)^2 \sigma_k^2 + 2\sigma_i^2 \quad (3)$$

Come si può vedere dalla figura 5, una delle due distanze di battuta è molto corta (10-15m), mentre la seconda dipenderà dalla lunghezza dell'attraversamento. Quindi mentre per la prima l'errore associato alla misura di distanza sarà valutabile con il solo errore di base del distanziometro, per la seconda inciderà anche il termine proporzionale alla distanza.

Considerando quindi gli errori strumentali: $\pm (0.6+1.0 \text{ mm} + 1 \text{ p.p.m})$ per gli EDM, $\pm 0.5''$ per la misura degli angoli, un errore complessivo di verticalizzazione delle aste e di stabilità dei treppiedi considerato nel termine σ_i uguale a $\pm 0.3 \text{ mm}$ e un errore sul coefficiente di rifrazione $\sigma_k = \pm 0.01$, si ottengono i valori di precisione nella stima dei dislivelli riportati in tabella 1. Per quanto concerne la precisione della stima del coefficiente di rifrazione k , si deve considerare che esso è stato stimato in realtà dalle misure simultanee e reciproche (in genere su distanze di diverse centinaia di metri) e quindi con un'ottima precisione. Come valore di simulazione per gli angoli zenitali è stato utilizzato 100 gon poiché è la condizione solitamente presente negli attraversamenti progettati per la livellazione geometrica.

Tabella 1 – Stima a priori delle precisioni raggiungibili (espresse in mm) nella determinazione del dislivello a partire dalle misure di LT differenziale da una singola stazione, al variare della lunghezza dell'attraversamento (una volta stimato il coefficiente di rifrazione mediante l'ausilio dei dati provenienti dalla seconda stazione simultanea). In rosso sono indicati i casi in cui le precisioni della LT differenziale non rispettano la tolleranza specificata.

Dist.	100m	200m	300m	400m	500m	600m	700m	800m	900m	1000m
LT diff.	± 0.49	± 0.65	± 0.85	± 1.07	± 1.30	± 1.54	± 1.79	± 2.05	± 2.31	± 2.59
$\pm 2\sqrt{d}$	± 0.63	± 0.89	± 1.10	± 1.26	± 1.41	± 1.55	± 1.67	± 1.79	± 1.90	± 2.00
$\pm 2.5\sqrt{d}$	± 0.79	± 1.12	± 1.37	± 1.58	± 1.77	± 1.94	± 2.09	± 2.24	± 2.37	± 2.50
$\pm 3\sqrt{d}$	± 0.95	± 1.34	± 1.64	± 1.90	± 2.12	± 2.32	± 2.51	± 2.68	± 2.85	± 3.00

Come si può osservare le precisioni attese fino a circa 600 m di lunghezza dell'attraversamento sono contenute entro una tolleranza equivalente all'alta precisione su linea di $\pm 2\text{mm}\sqrt{d(\text{km})}$, mentre aumentando la lunghezza fino al km la precisione scende nell'intervallo $\pm 2.5\text{--}3\text{mm}\sqrt{d(\text{km})}$.

A partire da questi limiti di precisione, che risultano comunque migliorativi rispetto alla soglia di $\pm 5\text{mm}\sqrt{d(\text{km})}$, sopradescritta, si è pertanto deciso di intraprendere una sperimentazione della metodologia su di una serie di attraversamenti di prova.

Sperimentazione della metodologia e risultati ottenuti

Le motivazioni che hanno suggerito la sperimentazione della metodologia basata sulla LT sono connesse al miglioramento della precisione di misura dei dislivelli in aree impraticabili ed a una ottimizzazione delle attività di rilevamento, con vantaggi quali:

- garantire una elevata invariabilità della posizione della linea di mira al variare della temperatura dello strumento, grazie all'impiego di strumentazione in grado di effettuare serie di letture coniugate;
- permettere per quanto possibile una collimazione di tipo automatico, riducendo i margini di variabilità delle collimazioni legate al singolo operatore;
- utilizzo di mire di collimazione appositamente progettate per l'alta precisione su distanze fino ad 1 km;
- possibilità di una verifica delle reali precisioni raggiunte mediante l'analisi di misure sovrabbondanti;
- rendere rapide ed efficienti le operazioni di rilievo di campagna consentendo una facile estensione del metodo verso tecniche di monitoraggio semi-automatiche.

La sperimentazione è stata effettuata mediante l'impiego delle stazioni totali di alta precisione sopradescritte, accoppiate a due aste porta prisma di altezza calibrata e verificata in laboratorio già complete del prisma retro-direttivo prescelto. Alla sommità di tali aste sono stati infatti installati dei prismi retro-direttivi con struttura metallica compatibili con l'alta precisione e a costante nulla per le stazioni totali utilizzate.

Le stazioni totali sono state sottoposte preventivamente ad una verifica dello stato di calibrazione presso i laboratori della Leica Geosystems, successivamente sono state eseguite in campagna le verifiche di calibrazione dei sistemi di collimazione automatica (ATR) presenti nelle diverse macchine. Uno dei vantaggi principali dell'impiego dell'ATR è una precisione più costante nel corso della giornata rispetto alle letture manuali, che garantisce quindi risultati maggiormente coerenti (Haag et al., 1997). Un inconveniente è tuttavia dato dall'eventuale errore residuo di rettifica tra centro del reticolo e posizione di riferimento del sistema ATR. Tale effetto infatti non viene eliminato dalle letture in posizione coniugata (Leica, 2003). Pertanto, l'uso del sistema ATR richiede una verifica della calibrazione (operazione in realtà molto rapida, grazie alla procedura prevista nel firmware strumentale).

Per poter effettuare le correzioni atmosferiche nelle misure di distanza sono state registrate in continuo con cadenza di un minuto le temperature dell'aria e la percentuale di umidità relativa agli estremi dell'attraversamento. Manualmente sono state invece registrate le letture effettuate dei valori di pressione atmosferica attraverso l'impiego di due barometri aneroidi. Tali osservazioni sono servite per calcolare l'indice di rifrazione dell'aria per la lunghezza d'onda dei distanziometri utilizzati, applicando il modello adottato dall'International Association of Geodesy (Ciddor, 1996; Ciddor & Hill, 1999).

Gli esperimenti sono stati eseguiti su attraversamenti appositamente scelti, in quanto rappresentativi di un'ampia casistica di reali condizioni operative. Le lunghezze sono state comprese tra i 71m ed il chilometro. Per alcuni di essi sono state eseguite contemporaneamente misure di livellazione geometrica simultanea. Per altri ancora è stato utilizzato un poligono di prova costituito da due dighe, poste una di fronte all'altra, ma raggiungibili e collegabili via terra tramite un percorso di livellazione geometrica su linea di alta precisione.



Figura – Asta porta prisma.

Nella tabella 2 sono indicati a titolo esemplificativo alcuni risultati ottenuti per distanze comprese tra 71m e 942m, mentre nella tabella 3 sono indicati alcuni risultati ottenuti mediante il confronto con la livellazione geometrica su linea e la livellazione geometrica simultanea e reciproca.

Tabella 2 – Esempio di valori ottenuti nella stima di dislivelli per distanze via via crescenti, utilizzando la tecnica di LT differenziale, con due stazioni simultanee e reciproche.

Distanza	Andata	Ritorno	Chiusura	Valore medio
71	-0.3973	0.3976	0.0003	-0.3975
127	-1.1613	1.1606	-0.0006	-1.1609
571	-0.7563	0.7577	0.0013	-0.7570
691	-0.6510	0.6497	-0.0013	0.6503
942	0.1177	-0.1214	-0.0037	0.1196

Tabella 3 – Esempio di valori ottenuti nella stima di dislivelli per distanze medio lunghe, utilizzando la tecnica di LT differenziale, con due stazioni simultanee e reciproche, messi a confronto con la livellazione geometrica dal mezzo di alta precisione su linea effettuata con livello digitale e con la livellazione con livelli ottici reciproci.

Distanza	Livellazione geometrica dal mezzo	Livellazione con livelli ottici reciproci	Livellazione trigonometrica di precisione
520	0.5663	0,5691	0.5660
610	-0.1023	n.d.	-0.1028
691	n.d.	0.6552	0.6503
750	0.0350	n.d.	0.0365
770	0.1597	n.d.	0.1586
942	n.d.	0.1155	0.1196
990	0.4066	0.4049	0.4082
1260	0.0673	n.d.	0.0647

Conclusioni e sviluppi futuri della ricerca

In conclusione si può affermare che tutti gli obiettivi posti alla base della sperimentazione sono stati raggiunti, sia in termini di precisione e affidabilità delle misure sia, in modo particolare, per quanto riguarda le tempistiche di acquisizione delle misure, per le quali possono essere stimati tempi inferiori alle due ore per ogni attraversamento, riducendo sensibilmente il tempo di stazionamento e di conseguenza la criticità di rilievi effettuati in condizioni climatiche e logistiche spesso severe.

In particolare, i risultati ottenuti sono in linea con le precisioni attese per le singole coppie simultanee e reciproche di determinazioni e un ulteriore miglioramento potrebbe avere luogo mediante un irrobustimento dello schema geometrico delle misure, passando quindi da collegamenti isolati ad una vera e propria struttura a rete. Questo approccio di rilevamento è stato in realtà già sperimentato per gli attraversamenti più lunghi (figura 7), anche se l'analisi dei risultati è ancora in corso.

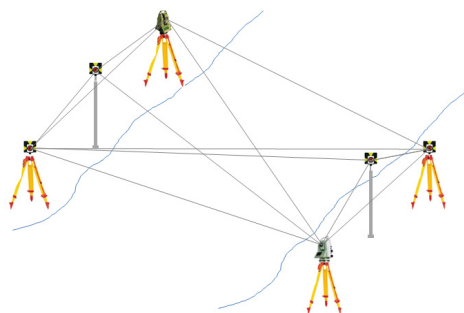


Figura 7 – Schema a rete sperimentato negli attraversamenti di lunghezza superiore ai 500 m.

Per questo tipo di analisi è infatti richiesta una ottimizzazione delle procedure di calcolo, al fine di considerare in modo corretto le letture zenitali simultanee e reciproche in fase di compensazione delle osservazioni.

Ulteriori approfondimenti riguarderanno inoltre lo studio della deviazione della verticale nei punti di stazione e l'impiego di queste tecniche di rilievo automatiche per lo studio dell'influenza della rifrazione dell'aria. Il metodo sperimentato si presta, infatti, a studi di notevole interesse scientifico sulle variazioni del coefficiente di rifrazione nell'arco della giornata e nel breve periodo, proprio grazie alla possibilità di eseguire serie di letture simultanee e reciproche in posizioni coniugate dei cerchi con modalità pressoché automatiche.

Bibliografia

- Ciddor P. E. (1996). Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared *Appl. Opt.* 35, 1566–1573
- Ciddor P. E., Hill R. J. (1999). Refractive Index of Air. 2. Group Index. *Applied Optics (Lasers, Photonics and Environmental Optics)*, 38, pp.1663–1667
- De Sanctis R., Folloni G., Gubellini A. (1973) Alcune esperienze di livellazione reciproca con livelli accoppiati. *Bollettino SIFET*, 2, 1973, pp.12.
- Gatti M, Tomassi G. (1990) La livellazione geometrica di precisione su lunghe distanze: un esempio di applicazione. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, Anno XLIX, 1, 1990, pp.29-48.
- Gubellini A. (1972) L'impiego dei livelli doppi nello studio dei movimenti del suolo. Rapporto tecnico 53, CNR – Laboratorio per lo studio della dinamica delle grandi masse, pp.25.
- Gubellini A., Unguendoli M. (1987) Nota sulla livellazione trigonometrica. *Bollettino SIFET*, 3/4, 1987, pp. 14.
- Haag, R., G. Bayer, M. Zimmermann, and R. Scherrer (1997), Vermessen mit der automatischen Feinzielung des TCA1800 von Leica, *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 7/97, pp. 6.
- Inghilleri G. (1974) Topografia generale, UTET.
- Jordan, W., O. Eggert, and M. Kneissl (1956), Handbuch der Vermessungskunde Band III, *J.B. Metzler'sche Verlagsbuchhandlung*, Stuttgart, pp. 410 – 435.
- Kahmen, H., and W. Faig (1988), Surveying, *Walter de Gruyter*, Berlin, New York.
- Leica, (2003), TPS Info – Calibration – 01/2003, *Leica Geosystems*, Herbrugg, Switzerland.
- Schofield, W. and M. Breach (2007), Engineering Surveying – 6th Edition, *Butterworth-Heinemann*, Oxford.
- Tsoulis, D., S. Petrovic, and N. Kilian (2008), Theoretical and numerical aspects of the geodetic method for determining the atmospheric refraction coefficient using simultaneous and mutual zenith observations, *Journal Surveying Engineering* 134(1), pp. 3 – 12.
- Xiong Wei Sun Qinghua Wang lei Zou Yongqiang - Trigonometric Leveling Precision Analysis of TCA2003 Total Station, 2009
- Zhang Z., Zhang K., Deng Y., Luo C. (2005) Research on Precise Trigonometric Leveling in Place of First Order Leveling. *Geo-Spatial Information*, Volume 8, Issue 4, December 2005, pp. 235-239.

Aspetti metodologici di analisi multi temporale, integrata con GPS e laser scanner 3D e modelli matematici per la valutazione del rischio idrogeomorfologico

Luciano Blois (*), Cristiano Blois (**), Michele Caponi (**),
Silvia Logozzo (***), Maurizio Rotondi (****)

(*) Università Telematica Guglielmo Marconi, Via Plinio 44, 06193 Roma, Italy, Tel. +39-06-377251
Email: info@unimarconi.it

(**) Laboratorio di Ricerca Altamente Qualificato IRIDE S.r.l., Via Luigi Catanelli 26, 06123 Perugia (PG), Italy
Tel. +39-5990021, Email: info@iridelab.it

(***) Università degli studi di Firenze, Dipartimento di Meccanica e Tecnologie industriali
(****) Funzionario tecnico Comune di Norcia

Il contributo proposto intende illustrare i risultati scientifici ottenuti dalla applicazione di un brevetto industriale dal titolo “METODO PER INDIVIDUARE ALMENO UN TERRENO A RISCHIO IDROGEOMORFOLOGICO” depositato grazie all’attività di ricerca del Prof. Luciano Blois. Il metodo studiato è impiegato per individuare e monitorare l’evoluzione nel tempo di eventuali terreni a rischio idrogeomorfologico, soggetti a possibili frane o subsidenze del terreno, e predire quando tale fenomeno potrebbe verificarsi, definendo la dinamica e la geometria del movimento di massa, nonché la sua evoluzione nel tempo. I risultati scientifici del metodo sono impiegabili per determinare il tipo di monitoraggio e/o bonifica da effettuare, ad esempio nel caso di una frana o una subsidenza e/o altre possibili variazioni multi temporali della morfologia della superficie di un terreno, dovute anche da attività antropiche come ad esempio avviene in alvei fluviali dopo un’alluvione o in discariche, cave e miniere a cielo aperto a seguito di scavi e riporti. Il metodo prevede di acquisire ad intervalli temporali differenti ($T_0, T_1, \dots, T_n$) una pluralità di mappe topografiche, tridimensionali e georeferenziate ($L_0, L_1, \dots, L_n$), e di sovrapporre ciascuna mappa topografica ($L_0, L_1, \dots, L_{n-1}$) con la mappa topografica successiva ($L_1, L_2, \dots, L_{n-1}$) per ottenere una o più coppie ($L_0, L_1; L_1, L_2; \dots; L_{n-1}, L_n$) di mappe topografiche, tridimensionali e georeferenziate, sovrapposte della zona osservata. A partire dal data set ottenuto da misure fotogrammetriche, laser scanner 3D e satellitari è possibile individuare attraverso interpolazione matematica e l’impiego di superfici NURBS l’equazione matematica tempo-variante della superficie di scivolamento.

Caso di studio..... Il metodo è stato sperimentato a Nottoria una frazione del comune di Norcia ed in particolare è stata effettuata una campagna di misure sperimentali per lo studio della stabilità di un ammasso roccioso che sovrasta a pochi metri le case del centro storico. In particolare sono state effettuate misure laser scanner 3D georeferenziate attraverso GPS topografici e sono state individuate coppie stereoscopiche storiche restituite attraverso tecniche di fotogrammetria digitale. I risultati ottenuti hanno consentito di definire un piano operativo di bonifica per la messa in sicurezza della zona interessata dall’intervento.

I. Introduzione

Lo studio di tecniche integrate per il controllo di dissesti idrogeologici è un obiettivo di straordinaria importanza per la protezione civile, al fine di evitare il verificarsi di disastri naturali.

Pertanto sono stati effettuati enormi sforzi per investigare le cause e i meccanismi alla base del fenomeno di frana. In questo articolo, è proposta una tecnica di studio dell'evoluzione cinematica del caso di studio in esame attraverso una ricostruzione multi temporale basata sull'elaborazione di immagini fotogrammetriche acquisite da archivi storici e con rilievi di dettaglio laser scanner e GPS. In particolare, sono state acquisite n° 2 fotogrammi aerei dal Volo Regione Umbria del 1980 a bassa quota (scala foto 1:3.000). L'area oggetto dell'indagine è situata nella parte bassa del versante S-Ovest del monte Sezza, ad una quota media di circa 960 m s.l.m., in prossimità del piccolo centro abitato di Nottoria. L'affioramento roccioso nel suo insieme ha una estensione di 40 m per un'altezza di 12 m circa. Gli agenti esogeni hanno disarticolato l'ammasso in grossi blocchi che insieme formano una struttura a gradoni con pendenze sub-verticali irregolari sia per altezze che per estensioni laterali. L'instabilità del fronte potrebbe infatti dar luogo a fenomeni di instabilità legati essenzialmente a eventi di crollo di materiale instabile che andrebbero a coinvolgere le abitazioni limitrofe. A tale proposito si è resa necessaria l'esigenza di studiare e perfezionare una soluzione progettuale per la bonifica del sito. L'utilizzo della metodologia proposta ha permesso di effettuare un confronto multi temporale attraverso la sovrapposizione di DTM ottenuti dalla restituzione digitale aerofotogrammetrica e il rilievo di dettaglio laser scanner 3D terrestre.

II. Analisi multitemporale

I risultati dell'analisi multi temporale mettono in risalto l'intervallo di tempo in cui il movimento si è attivato ed è progredito, la tipologia del movimento di massa con la sua geometria di superficie ed in profondità. Lo studio è finalizzato alla analisi multi temporale dell'ammasso roccioso. I fotogrammi storici individuati sono:

1980 ripresa aerea volo Regione Umbria – scala foto 1:3000

I fotogrammi sono stati acquisiti con fotocamere analogiche, che producono diapositive (23 x 23 cm) trasformati successivamente in immagini digitali tramite l'utilizzo di scanner aerofotogrammetrici di proprietà dell'I.G.M. il quale acquisisce immagini a 1200 d.p.i con la precisione di un micron. La precisione è quindi quantificabile mettendo in relazione la dimensione del singolo pixel con la corrispondente misura a terra. Stabilito che a 1200 d.p.i la dimensione del singolo pixel sul fotogramma corrisponde a 21 micron, alle diverse scale corrisponde la misura del pixel sul terreno:

es. Foto a 2600 di scala...pixel a terra = 55 cm

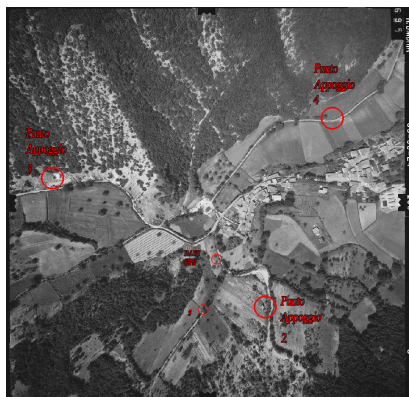


Figura 1 – Distribuzione punti di georeferenziazione GPS.

III. Rilievo laser scanner 3D-GPS

A partire dall'analisi multi temporale, si è passati allo studio, la progettazione e l'esecuzione di rilievi laser scanner 3D e GPS. Il rilievo è stato effettuato con l'utilizzo dello strumento laser RIEGL LMS-Zi420 e sistema RX/TX GPS Leica 1200. Il dato laser ha permesso in fase di elaborazione di creare un modello solido e una griglia tridimensionale del rilevato dal quale è stato possibile estrapolare sezioni ad intervalli con risoluzione centimetrica. In particolare, la nuvola di punti laser è stata elaborata utilizzando dei modellatori di superficie basati sulla matematica NURBS (Non Uniform Rational B-Splines), al fine di ricostruire il modello tridimensionale del sito e quindi estrarre gli elementi vettoriali, quali sezioni verticali e orizzontali con passo millimetrico. Gli oggetti estratti dal modello 3D vengono automaticamente esportati in ambiente CAD. Particolarmente interessante è questa ultima caratteristica, in quanto, disponendo del modello CAD tridimensionale, è possibile effettuare tutte le successive operazioni: l'estrazione dei parametri geometrici, la catalogazione e la ricostruzione dell'oggetto intero. La meshatura poligonale è un metodo standard per realizzare una descrizione geometrica di una superficie irregolare. Per la maggior parte delle applicazioni topografiche la soluzione a $2 \frac{1}{2}$ D è sufficiente, ossia l'intera geometria può essere descritta fissando un valore di altezza in base alle distanze verticali da un piano di riferimento fino ai vertici bidimensionali definiti su questo stesso piano. In questo particolare caso, invece, è stato necessario applicare il metodo di meshatura 3D e di volume che permette la restituzione di geometrie chiuse e la modellazione di forme concave. I limiti presenti in ogni algoritmo di meshing spesso determinano degli errori di risultato che si traducono in irregolarità della maglia (fori, triangoli irregolari) e necessitano quindi di un editing della maglia triangolare. Le procedure per la rilevazione degli errori e loro correzione sono presenti in modo tale da pervenire ad un risultato soddisfacente in tempi ragionevoli (hole detection, riorganizzazione dei triangoli, smoothing, etc.). Alla fine del processo di estrazione di una geometria a partire da una nuvola di punti la visualizzazione dei risultati ha un'importanza fondamentale. Questa fase può essere enfatizzata da un buon algoritmo di texturizzazione dell'insieme di superfici trovate. Le texture possono derivare da un database di default a secondo del materiale o più facilmente dalle foto scattate dal dispositivo di acquisizione durante la scansione. Dalla superficie ottenuta tramite NURBS si possono automaticamente estrarre le sezioni planari di interesse esportabili in ambiente CAD. Il sistema proposto consente quindi di valutare la stabilità dell'ammasso roccioso e la sua ricostruzione tridimensionale al fine di perfezionare un progetto di bonifica e messa in sicurezza del sito. Grazie alle immagini aerofotogrammetriche digitalizzate come descritto sopra, è possibile individuare un numero sufficientemente alto di punti di riferimento esterni all'area studiata $Pe_1, Pe_2, Pe_3, \dots, Pen$ (considerati stabili) e dei punti di riferimento interni $Pi_1, Pi_2, Pi_3, \dots, Pin$. L'interpolazione matematica NURBS nel tempo di ciascun punto di riferimento interno $Pi_1, Pi_2, Pi_3, \dots, Pin$ ed esterno $Pe_1, Pe_2, Pe_3, \dots, Pen$, permette di determinare in tempo reale, rispettivamente, l'equazione matematica tempo-variante $E(V(t))$ della superficie di movimento V e l'equazione matematica tempo-variante $E(S(t))$ della superficie di scivolamento S . Una volta determinate le equazioni tempo-varianti della superficie di scivolamento $E(S(t))$ e della superficie di movimento $E(V(t))$, è possibile calcolare la velocità Vel e l'accelerazione Acc di ciascun punto dell'equazione matematica della superficie di movimento e della superficie di scivolamento, in modo tale da conoscere con quale rapidità si verifica lo spostamento della porzione di terreno a rischio idrogeomorfologico. A questo punto è possibile calcolare il rapporto di stabilità Rs tra le forze stabilizzanti Fs e le forze destabilizzanti Fb di ciascun punto dell'equazione matematica della superficie di movimento V e della superficie di scivolamento S e verificare se il valore medio Rsm del rapporto di stabilità calcolato, è inferiore ad un determinato valore di soglia. Tale valore di soglia è compreso tra 0,9 e 1,4, ed è, preferibilmente, 1,3. Si osservi che, in maniera alternativa, si può suddividere il volume $T(V,S)$ individuato dalle superfici $E(V(t))$ e $E(S(t))$, precedentemente ottenute, in varie celle $C_1, C_2, \dots, C_n$, ad esempio, mediante il metodo dei volumi finiti, o degli elementi finiti, e predisporre, per ciascuna cella $C_1, C_2, \dots, C_n$, il calcolo delle forze stabilizzanti e destabilizzanti che agiscono su ciascuna cella $C_1, C_2, \dots, C_i$. Quindi è possibile calcolare il relativo rapporto di stabilità del terreno, mediante il valore medio Rsm del rapporto di stabilità calcolato per ciascuna cella ($C_1, C_2, \dots, C_i$) di indagine.

IV. Risultati

Attraverso l'analisi multi temporale, è stato possibile individuare l'evoluzione dell'ammasso roccioso attraverso la generazione dei DTMs nei vari istanti temporali e la loro comparazione. Il confronto tra i DTM è stato possibile grazie all'individuazione di un numero significativo di punti di controllo esterni comuni. Di seguito si riportano i risultati ottenuti. In particolare, dalla valutazione della stabilità del versante e dalla generazione dei modelli tridimensionali ad alta definizione, è stato possibile definire in collaborazione con gli enti coinvolti, un progetto di intervento finalizzato alla messa in sicurezza dell'area. A tale riguardo, si riportano di seguito gli elaborati planimetrici ottenuti riguardanti lo stato attuale, quello intermedio e quindi quello finale.



Figura 2 – Foto sito studiato.

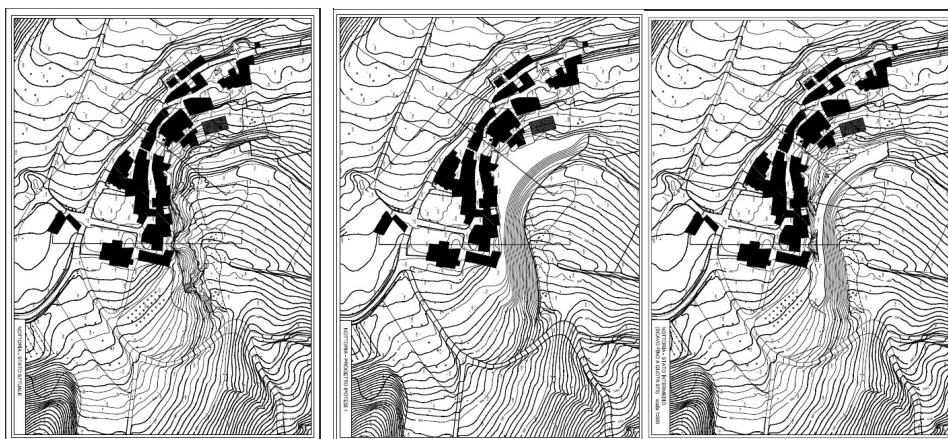


Figura 3 – Modello 3D a curve di livello dello stato attuale-intermedio-progetto.

V. Conclusion

E' stato proposto un metodo basato sulla ricostruzione e caratterizzazione di dissesto idrogeomorfologico attraverso una innovativa metodologia multi temporale basata su processi di interpolazione NURBS. L'analisi multi temporale ha permesso di ottenere la massa volumica e l'area coinvolta dal fenomeno. A partire dall'analisi della stabilità del versante, e dalla ricostruzione tridimensionale è stato possibile perfezionare al CAD un progetto di intervento che tiene conto di una fase iniziale, intermedia e finale, estraendo elementi geometrici come modelli a curve di livello, DTM e sezioni.

Riferimenti bibliografici

L. Blois, C. Blois, M.Caponi (2009) Aspetti metodologici di analisi multi temporale, integrata con GPS e stazione totale robotizzata e modelli previsionali per la valutazione di movimenti franosi in località San Giuliano e Colletorto, ASITA 2009.

E. Brückl, F.K. Brunner , K. Kraus (2006), Kinematics of a deep seated landslide derived from photogrammetric” ELSEVIER, Engineering Geology 88 (2006) 149–159

Arianna Pesci (1), Paolo Baldi (2), Alessandro Bedin (3), Giuseppe Casula (1), Nicola Cenni (2), Massimo Fabris (3), Fabiana Loddo (1), Paolo Mora (4) and Massimo Bacchetti (2), “Digital elevation models for landslide evolution monitoring: application on two areas located in the Reno River Valley (Italy),” ANNALS OF GEOPHYSICS, VOL. 47, N. 4, August 2004

Giordano Teza , Arianna Pesci b, Rinaldo Genevois a, Antonio Galgaro “Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation. Res., ELSEVIER, Geomorphology 97 (2008) 424–437

Cristina Squarzonil, Antonio Galgaro1, Rinaldo Genevois1, Francesco Paoli1, Roberto Francesel, Luigi Veronese 2, Paolo Campedel 2, “A multidisciplinary approach to landslide modelling: the case of Campodenno, north-eastern Alps, Italy”, Giornale di Geologia Applicata 3 (2006) 257-262, doi: 10.1474/GGA.2006-03.0-33.0126

Mappatura dei prati stabili nel comprensorio del Parmigiano-Reggiano mediante telerilevamento

Michele Bocci (*), Stefano Corticelli (**), Maria Cristina Mariani (**), Sara Masi (**),
Maria Chiara Cavallo (***), Nicola Dall'Olio (***), Marco Ligabue (****), Marco Vissani (*)

(*) Geographike S.R.L., Via Sansedoni 7, 53100 Siena, Tel/Fax +39 0577 588408, m.bocci@geographike.it

(**) Servizio Sviluppo dell'Amministrazione digitale e sistemi informativi geografici
Regione Emilia-Romagna Viale Silvani 4/3, 40122 Bologna, Tel. 051 284602, scorticelli@regione.emilia-romagna.it

(***) Servizio Agricoltura e Risorse Naturali, Provincia di Parma Piazzale Barezzi 3, 43121 Parma
m.cavallo@provincia.parma.it n.dallolio@provincia.parma.it

(****) CRPA Centro Ricerche Produzioni Animali, Corso Garibaldi 42, 42100 Reggio Emilia, m.ligabue@crpa.it

Riassunto

I prati stabili sono sempre stati un importante elemento dell'economia e del paesaggio del comprensorio di produzione del Parmigiano-Reggiano, in quanto sono la risorsa più antica per l'alimentazione delle bovine da latte. Il loro nome si deve al fatto che una volta impiantati non vengono mai avvicendati con altre colture e sono mantenuti attraverso lo sfalcio, l'irrigazione (nei prati di pianura) e la concimazione. Malgrado la quota di foraggio proveniente dai prati stabili sia importante nella filiera produttiva del Parmigiano-Reggiano, la loro estensione tende a ridursi per l'avvicendamento con altre colture. L'individuazione e la mappatura dei prati non è possibile attraverso semplice fotointerpretazione in quanto difficilmente distinguibili da altre colture erbacee. Pertanto è stato condotto uno studio mediante analisi multitemporale di immagini satellitari Landsat, finalizzato ad individuare l'attuale distribuzione di prati stabili. L'area in oggetto è coperta da due frame della missione Landsat, acquisendo complessivamente 174 scene e realizzando una serie temporale con mediamente 7 immagini per ogni anno. Il metodo è stato impostato sul concetto che un prato viene considerato stabile se non arato per almeno 10 anni. Si è pertanto provveduto, dopo una fase di pre-processing dedicata alla mascheratura delle aree prive di dato (nuvole, neve, disturbo Landsat7), alla generazione di indici di vegetazione NDVI per ogni immagine ed un livello dei valori minimi di NDVI. Mediante controlli a terra presso prati stabili certi e dotati di informazioni sui periodi di sfalcio, sono stati definiti i range caratteristici dell'indice di vegetazione, generando un livello informativo sintetico dei prati stabili potenziali. Una fase finale di fotointerpretazione ha consentito di mappare i prati stabili nel contesto geometrico e tematico del recente Database dell'uso del Suolo 2008.

Abstract

Permanent grasslands have always been an important element for the economy and landscape of Emilia-Romagna. They are the most ancient nutritional resource for the milk cows employed in the production of Parmigiano-Reggiano cheese. The specific production area of this cheese spreads over the Provinces of Parma, Reggio Emilia, Modena, part of the Bologna Province and the territory of Oltrepò Mantovano. Permanent grasslands owe their name to the fact that once they are sown they are never rotated with other crops and are maintained through mowing, irrigation and fertilization. Even if the quantity of forage from permanent grasslands is important for the production of the Parmigiano-Reggiano cheese, their extension tends to decrease because of the

competition with other crops. It is not possible to identify and chart grasslands through photointerpretation because they are difficult to distinguish from other herbaceous crops. Therefore we present here a remote sensing analysis based on Landsat satellitary images taken at different periods, with the intent of identifying the current distribution of permanent grasslands. The study area is covered by two Landsat frames acquiring a total of 174 scenes and realizing about seven images per year. We have considered grasslands to be permanent when not tilled for at least ten years. In a pre-processing phase we have masked No Data areas (clouds, snow and Landsat 7 rumor), then we have calculated NDVI vegetation indexes and minimum NDVI levels for each image. We have defined the specific range of the vegetation index through field survey and we have achieved a classification of potential permanent grasslands. A final phase of photointerpretation has allowed us to trace permanent grasslands in the topological and thematic context of the recent 2008 regional land use database.

Premessa

Il prato stabile è sempre stato un importante elemento dell'economia e del paesaggio del comprensorio di produzione del Parmigiano-Reggiano. La produzione del latte e la trasformazione in formaggio avvengono infatti esclusivamente nelle province di Parma, Reggio Emilia, Modena, Bologna (alla sinistra orografica del fiume Reno) e Mantova (alla destra orografica del fiume Po) (fig 1). Il foraggio derivante dallo sfalcio di questi prati è la risorsa più antica per l'alimentazione delle bovine da latte per la produzione del Parmigiano Reggiano: troviamo riferimenti ai prati stabili sin dal secolo XII e all'interno del comprensorio si possono ritrovare prati risalenti al 1700.

Il prato stabile è una coltivazione agraria di specie erbacee (prato polifita), non soggetta ad avvicendamento con altre colture e per la quale non sono previsti interventi agronomici di aratura per eseguire semine: il mantenimento del cotico erboso e della produttività è garantito attraverso lo sfalcio, l'irrigazione (in pianura), la concimazione e la propagazione spontanea delle specie. Per quanto riguarda la produzione di fieno, i quantitativi variano a seconda dell'andamento stagionale e delle cure colturali apportate, attestandosi mediamente a 100-115 quintali ad ettaro ottenibili da 3-4 tagli (5 tagli in stagioni particolarmente favorevoli) di cui il primo, il più abbondante, si effettua nella prima metà di maggio mentre gli altri vengono effettuati a distanza variabile di 35/40 giorni. I prati stabili assicurano un foraggio di ottima qualità, che risponde in modo equilibrato alle esigenze alimentari del bestiame, giocando un ruolo importante nel definire gli attributi sensoriali del Parmigiano-Reggiano (CRPA, 2007).

La tutela e la salvaguardia dei prati stabili assume rilevanza strategica, oltre che per i motivi agronomici legati alla filiera del Parmigiano-Reggiano, anche per motivi naturalistico-ambientali, in quanto essi rappresentano habitat in grado di ospitare specie di flora e fauna rare o a rischio di estinzione: le numerose specie erbacee che costituiscono il prato stabile sono legate all'ecologia ed all'evoluzione di un determinato territorio e per questo ne indicano il grado di naturalità e di conservazione (Tinarelli, 2008). Pertanto essi, nel panorama agricolo della pianura padana, possono essere considerati *hot spot* di biodiversità floristica (Provincia Parma, 2003).

Inoltre tale tipologia di uso del suolo consente lo stoccaggio di elevate quantità di carbonio costituendo di fatto dei serbatoi noti come "*Carbon sink*". La capacità di stoccaggio supera quella di ogni altra coltura a seminativo (Mais, pomodoro, barbabietola, cereali) e di circa il 25% quella della concorrente foraggera erba medica (Provincia di Parma, 2010).

I prati stabili erano un tempo più diffusi rispetto alla situazione attuale poiché, in seguito alla modernizzazione del comparto agricolo, la tendenza è stata quella di una progressiva sostituzione con prati avvicendati (ad es. erba medica) che sono colture meno idroesigenti rispetto al prato permanente.

Nel database di uso del suolo della Regione Emilia-Romagna esiste già una classe (codice 2310) relativa ai prati stabili, così descritta: "superfici a copertura erbacea densa, a composizione floristica rappresentata principalmente da graminacee, non soggette a rotazione", che risente però della

difficoltà di discriminazione dei prati stabili rispetto alle altre colture erbacee attraverso fotointerpretazione.

In ragione dell'interesse legato alle molteplici valenze sin qui descritte, la Regione Emilia-Romagna ha promosso un progetto sperimentale volto a definirne la distribuzione, attraverso l'utilizzo del telerilevamento multi temporale, mediante analisi di una consistente collezione di dati satellitari degli ultimi 10 anni. L'obiettivo è quello di ricostruire la conduzione agraria dei prati per foraggio, individuando quelli in cui non è mai stata effettuata l'aratura del terreno in questo intervallo temporale.

Il risultato è una mappa dei prati stabili, che potrà essere, oltre che un valido strumento per la loro tutela e valorizzazione, un utile approfondimento del *database* dell'uso del suolo.

Con il presente lavoro si illustrano i criteri metodologici ed i primi risultati dello studio preliminare su due aree test, una in area di pianura e l'altra in collina, mentre la mappatura del territorio del Consorzio sarà completata entro la fine del 2011.

In figura 1 è possibile vedere la distribuzione delle aree in oggetto nel contesto del territorio regionale. Il Consorzio del Parmigiano-Reggiano comprende anche la zona dell'Oltrepò mantovano, esclusa dal presente progetto.

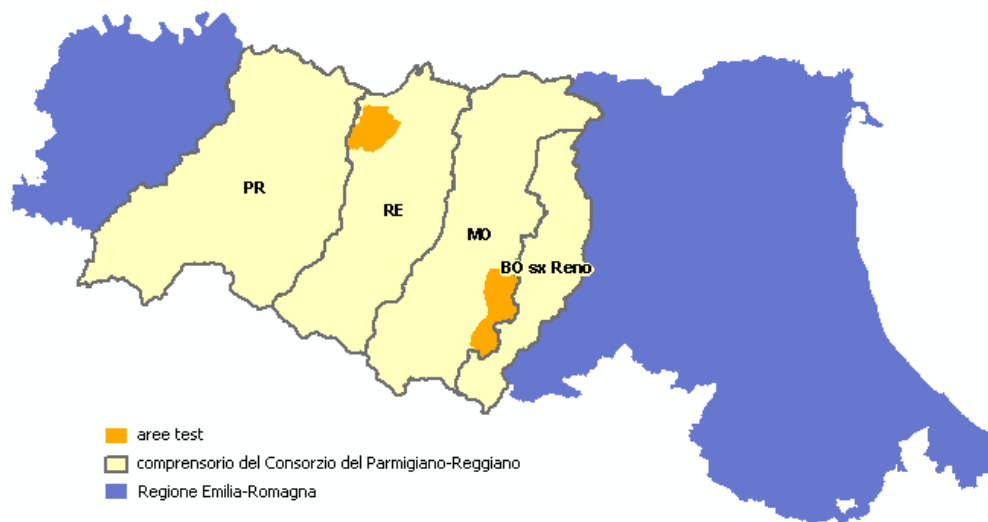


Figura 1 – Aree test utilizzate per la messa a punto della metodologia di elaborazione dati.

Materiali e metodi

E' stata condotta una prima fase di analisi dei dati satellitari disponibili, dalla quale è risultato come le immagini della missione Landsat disponessero del più favorevole rapporto costi/benefici. Tali immagini infatti possono essere acquisite gratuitamente, sono presenti per tutto il periodo d'interesse con varie date per ogni anno ed hanno una risoluzione geometrica sufficiente per la realizzazione di uno strato tematico che informi sull'assenza di arature del terreno nel periodo di riferimento.

Infine il metodo prevede una fase di fotointerpretazione che, dall'analisi comparata dei risultati delle elaborazioni satellitari con le ortofoto, individua e mappa con il dettaglio della cartografia dell'Uso del Suolo 1:25.000 le particelle di prato stabile.

Sono state acquisite in totale 174 immagini distribuite sui due frame della missione Landsat, come evidenziato nella figura 2.

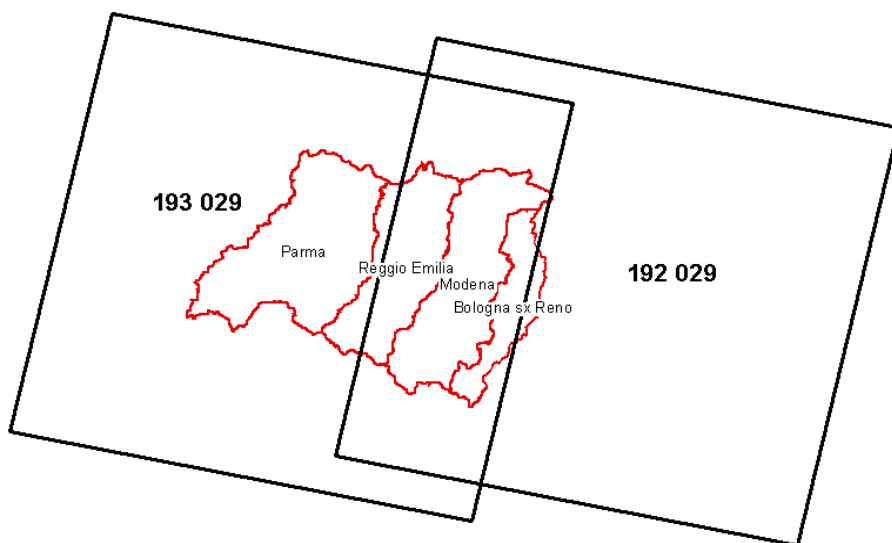


Figura 2 – Area di studio in relazione ai frame della missione Landsat5 e 7.

La fase iniziale del metodo è dedicata al pre-processing sulle immagini satellitari, articolato nelle seguenti attività:

1. correzione atmosferica. Negli studi multitemporali è importante normalizzare le immagini in funzione della trasparenza atmosferica, che per le varie date può interferire con intensità variabile. Si è operato utilizzando la tecnica DOS (*Dark Object Subtraction*), basata sulla lettura dei valori radiometrici dei pixel corrispondenti ad oggetti estremamente “assorbenti”, come laghetti con acque calme, limpide e profonde, e la seguente sottrazione per tutta l’immagine, specifica per ogni banda, del valore radiometrico osservato su tali corpi assorbenti, secondo il concetto che la componente di radianza letta in corrispondenza di questi elementi deriva in realtà da una riflessione a livello dell’atmosfera;
2. maschera topografica per la rimozione delle ombre nelle immagini invernali. Territori adatti ai prati stabili si trovano anche in alta collina su versanti spesso esposti a Nord, data la conformazione dell’Appennino Emiliano. Sono state pertanto calcolate le mappe delle ombre per tutte le date acquisite nei periodi invernali, in modo da non considerare i dati relativi alle porzioni di territorio in ombra, dove si potrebbe rilevare parametri radiometrici fuorvianti;
3. mascheratura delle aree obliterate da fenomeni atmosferici. Nuvole e ombre relative, nebbia e neve sono presenti in misura variabile in diverse immagini, ed anche tali fenomeni devono essere mascherati per la corretta elaborazione dei dati. Mediante delle tecniche di classificazione automatica, supportate da un successivo controllo e revisione per fotointerpretazione, sono state generate le maschere, specifiche per ciascuna immagine;
4. mascheratura delle aree di No Data per le immagini Landsat7 successive al maggio 2003. In tale data infatti il sensore TM ospitato sul satellite Landsat 7 è stato interessato da un malfunzionamento che pregiudica la completezza della copertura nella ripresa del dato a terra, introducendo una mancanza di dati periodica sulle fasce laterali della striscia di acquisizione, come visibile nella figura 3. Si è ritenuto che i dati di tale sensore, pur penalizzati da tale disturbo, fossero sufficientemente ricchi di informazione, considerando anche l’elevato numero di riprese acquisite per ogni anno, elemento che riduce, e spesso azzerà, le persistenze di oblitterazione del dato sullo stesso luogo;

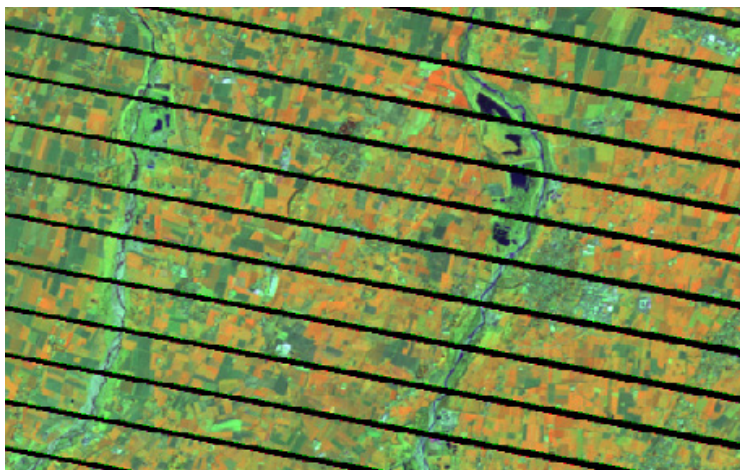


Figura 3 – Dati Landsat 7 successivi al maggio 2003, con la consueta mancanza periodica di dati nelle porzioni più esterne della fascia di acquisizione.

5. calcolo dell'indice di vegetazione NDVI. Per gli obiettivi del progetto, tale indice risulta l'indicatore più adeguato per individuare eventuali momenti nell'arco temporale in cui un appezzamento di foraggiere potrebbe essere stato interessato da una aratura del terreno. Per ogni immagine è stato prodotto il relativo indice di vegetazione, mascherato in corrispondenza di tutte le aree in cui il dato non è attendibile per i motivi descritti sopra.

Il metodo prevede poi la sintesi informativa dei dati con la produzione di un unico strato tematico raster prodotto dalla funzione MIN, denominato $NDVI_{min}$, che restituisce il valore minimo per ogni pixel di una serie di dati multitemporali. Pertanto un appezzamento condotto a prato, e che nell'ultimo decennio non è mai stato arato, si caratterizzerà con valori di $NDVI_{min}$ non inferiori ad una soglia definita. Un altro appezzamento, invece, che appare oggi condotto a prato, ma che presenta valori di $NDVI_{min}$ inferiore a tale soglia, deve essere stato interessato in un periodo dell'ultima decade da una lavorazione del terreno. Il suolo nudo infatti presenta valori di NDVI ben più bassi della copertura erbacea, che anche nei momenti dello sfalcio presenta valori di tale indice sempre superiori.

Queste considerazioni si basano sulla teoria del telerilevamento multispettrale, ma per dotare lo studio di una più robusta taratura dei dati satellitari, si è proceduto con la pianificazione di una serie di controlli sul campo, sincronizzati con il calendario dei passaggi dei satelliti delle missioni Landsat, disponibile in rete presso il portale USGS (U. S. Geological Survey).

Il 21 Luglio 2011, in corrispondenza del passaggio del satellite Landsat 7 in una mattina abbastanza libera da nubi nell'area in oggetto, sono stati effettuati rilevamenti di campo su prati di pianura e collina nella provincia di Reggio Emilia. Si dispone così di una serie di controlli a terra e della relativa documentazione fotografica, sincronizzata con la ripresa satellitare, acquisita poi nel mese di agosto. Questa combinazione consente di verificare e tarare la lettura del dato radiometrico con le informazioni sulle effettive condizioni dei prati, che in questo periodo si caratterizzano per il terzo sfalcio. Il momento del taglio rappresenta infatti il momento di minima "risposta vegetativa" della copertura erbacea e, per le finalità del progetto, risulta di particolare importanza la comparazione tra i dati radiometrici e gli indici di vegetazione con le osservazioni dirette per la taratura ottimale delle soglie di classificazione dell' $NDVI_{min}$.

Nella seguente figura 4 si può osservare un caso di prato sfalcio con la vegetazione sul terreno.

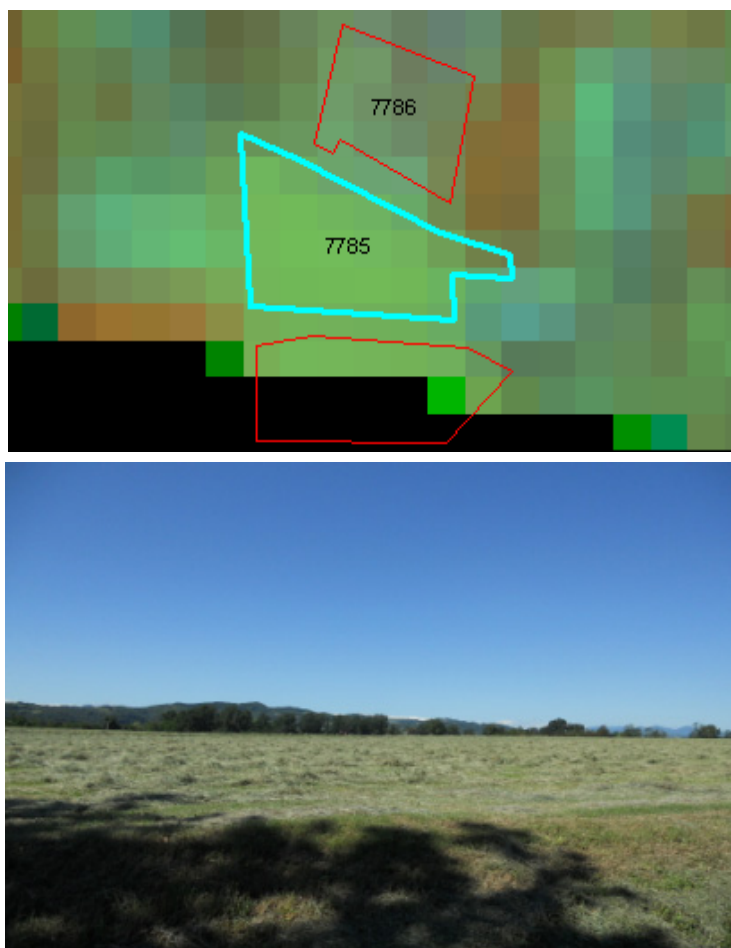


Figura 4 – Prato sfalcato, osservato da Landsat7 (bande 453) e contemporaneamente sul terreno, nei sopralluoghi del 21 luglio 2011.

La successiva fase di processing è stata dedicata ad una analisi statistica dei valori di NDVI di tutte le date considerate, intercettati da una serie di campioni digitalizzati per fotointerpretazione su varie tipologie di uso del suolo. Questa fase aveva il duplice scopo di evidenziare eventuali anomalie radiometriche di particolari date, che potrebbero poi influire negativamente nel calcolo di $NDVI_{min}$ ma anche quello di verificare quantitativamente i *range* di tale indice per varie tipologie di territorio, così da definire al meglio il comportamento dei prati stabili rispetto ad altre categorie agrarie e di uso del suolo in genere.

Sono stati tracciati 70 campioni poligonali, all'interno di unità di uso del suolo con l'accortezza di escludere con sufficiente margine le aree di bordo, in modo da intercettare solo pixel del dato Landsat sicuramente interne all'area da verificare. Tali campioni sono stati tracciati principalmente su appezzamenti condotti a prato stabile individuati nei rilievi di campagna, ma anche su altre tipologie di uso del suolo, come seminativi, boschi di latifoglie, di conifere, aree urbane e corpi idrici.

Sono stati estratti per tutte le 174 date considerate i valori di NDVI medi dei pixel ricadenti in ogni campione, scartando dalla statistica i valori nulli in corrispondenza della mascheratura descritta precedentemente.

Nella seguente figura 5 si riportano i diagrammi NDVI in funzione del tempo per due famiglie di campioni: i prati stabili ed i seminativi.

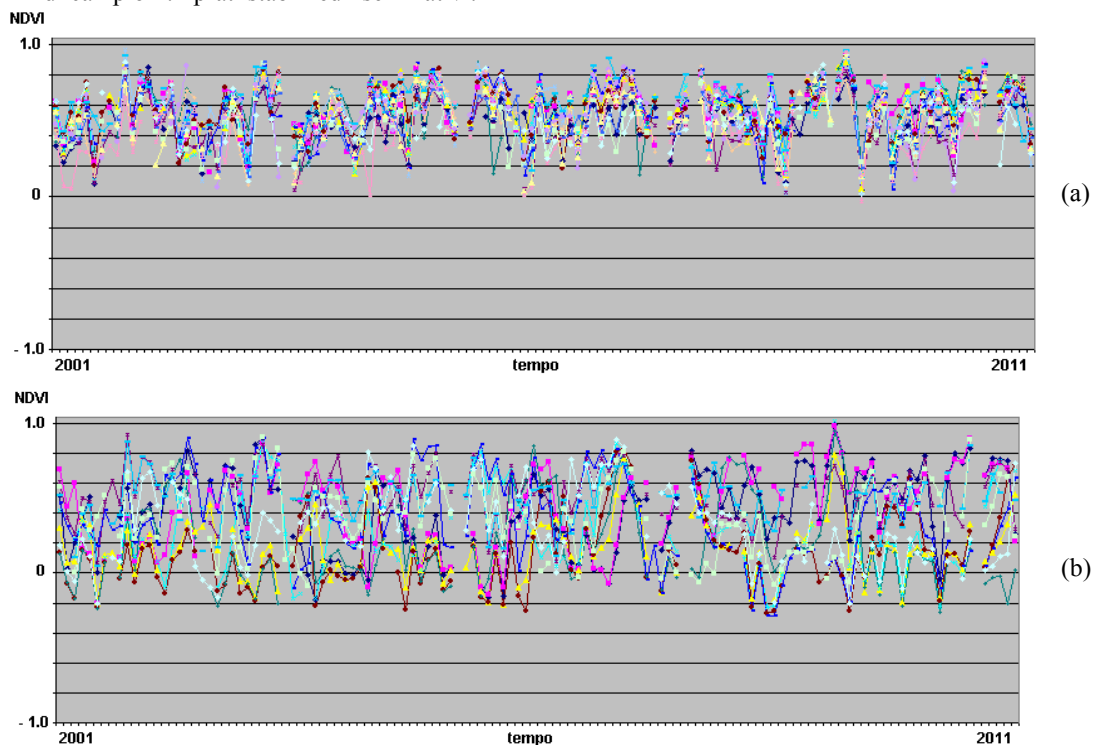


Figura 5 – Diagrammi di indice di vegetazione nei 10 anni considerati estratti su campioni di prati stabili (a) e di seminativi (b).

I valori di indice di vegetazione confermano come i prati stabili non presentino mai valori inferiori allo zero, mentre i seminativi evidenziano periodicamente valori ben inferiori, nel range compreso tra 0 e -0.2, relativi ai momenti di aratura e lavorazione del terreno per la semina.

I rilievi in campo del 21 Luglio scorso confermano tale quadro e consentono di utilizzare l'elaborazione di $NDVI_{min}$ come fondamentale supporto per il riconoscimento e la digitalizzazione dei prati stabili sulla base dell'ortofoto 2008.

In figura 6 si può osservare la mappa del $NDVI_{min}$ che fornisce direttamente la visione qualitativa della presenza e distribuzione di appezzamenti in cui l'indice di vegetazione ha sempre mostrato alti valori, correlabili ai prati stabili, che peraltro caratterizzano notoriamente tale area della pianura reggiana.

Nella successiva figura 7 si evidenzia come all'interno di una delle particelle oggetto di sopralluogo sia stata rilevata una porzione che presenta un valore di $NDVI_{min}$ troppo basso per poterlo considerare prato stabile; nella storia dell'ultimo decennio tale porzione deve aver avuto un intervento di lavorazione che porterà ad escludere la relativa porzione dalla mappatura dei prati stabili.

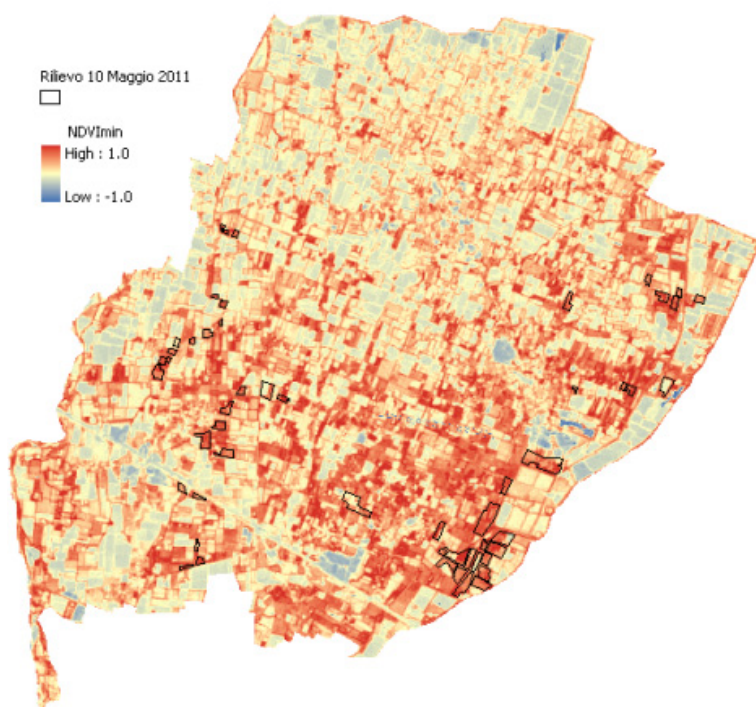


Figura 6 – Mappa del NDVI_{min} nell'area test di pianura, con i limiti delle particelle a prato verificate nei sopralluoghi del 10 Maggio 2011.

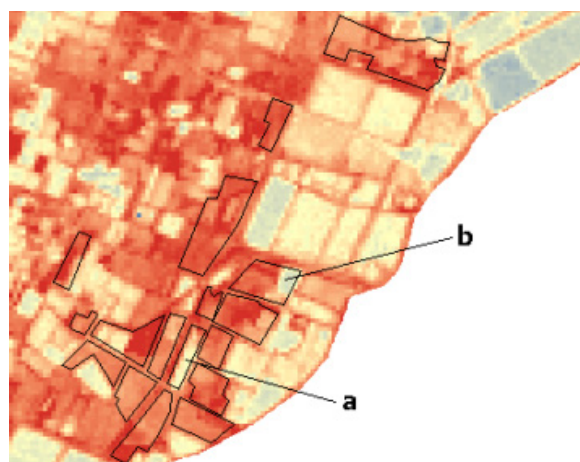


Figura 7 – Particolare della mappa di NDVI_{min}: a) prati stabili con valore minimo rilevato in un momento di sfalcio, b) appezzamento con una porzione soggetta ad aratura in un periodo dell'ultimo decennio.

Nella successiva figura 8 viene mostrata la rappresentazione “level slicing” scelta come supporto alla fotointerpretazione, indicando con due classi distinte le aree con un comportamento di persistenza nella decade 2001-2011 di valori di NDVI superiori alla soglia di 0.04, mentre nella classe inferiore si riportano i valori corrispondenti all’area di transizione, utile per il fotointerprete per valutare criticamente la migliore interpretazione, mediante l’osservazione del contesto sull’ortofoto 2008. Nella figura sono riportati anche i poligoni rilevati in campo.

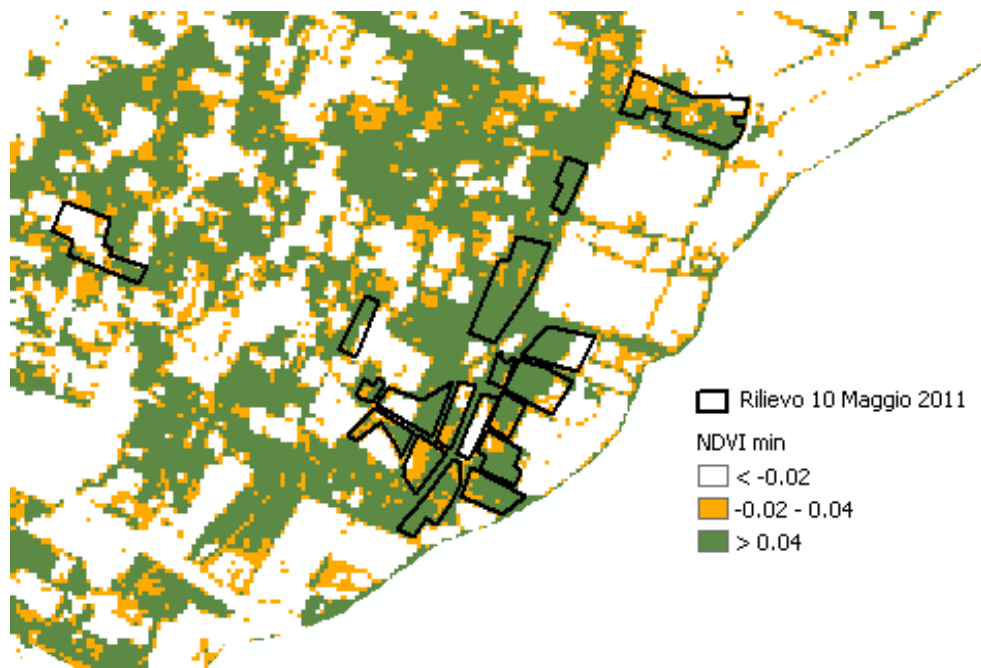


Figura 8 – Mappa di NDVI_{min}: in evidenza le aree non compatibili con i prati stabili (NDVI_{min} < -0.02), quelle appartenenti ad una fascia di possibilità (-0.02 - 0.04) ed infine le aree compatibili con il profilo vegetativo dei prati stabili (NDVI_{min} > 0.04).

Risultati

La sperimentazione condotta sulle due aree di test ha fornito dei risultati positivi in relazione alla possibilità di individuare i prati stabili mediante telerilevamento multitemporale, realizzando uno strato informativo che potrebbe di per sé costituire già un documento valido per la mappatura di tali prati. Per poter disporre di una banca dati ancora più consistente i risultati della ricerca costituiranno la fonte per una attività di fotointerpretazione che, sulla base delle ortofoto 2008, avrà il compito di delineare i prati stabili utilizzando gli stessi parametri di precisione geometrica del data base dell’Uso del Suolo, realizzando di fatto un approfondimento tematico di quest’ultimo. Nella seguente figura 9 e 10 si evidenzia una fase di tale attività di digitalizzazione.

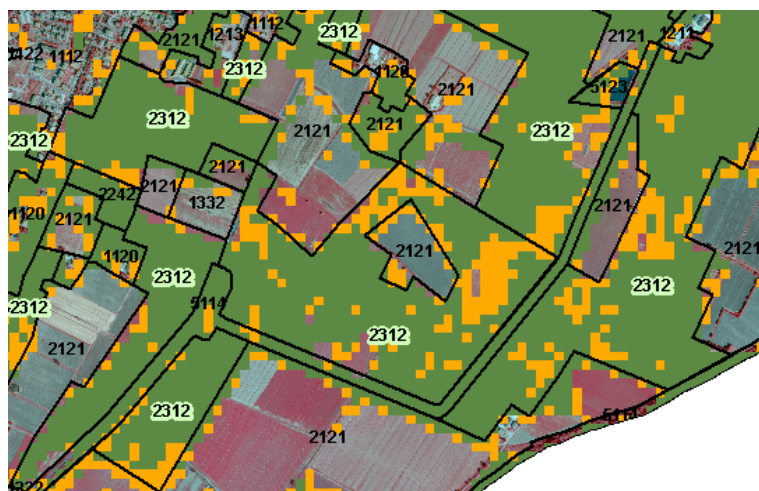


Figura 9 – Fotointerpretazione dei prati stabili supportata dal layer $NDVI_{min}$



Figura 10 – I prati stabili (codice 2312) sulla base dell'ortofoto 2008 IR.

Conclusioni

L'analisi condotta in questo studio, attraverso il telerilevamento multitemporale, ha permesso l'individuazione dei prati stabili all'interno delle aree di studio.

La Regione Emilia-Romagna entro la fine del 2011 sarà quindi in grado di fornire uno strumento cartografico dei prati stabili presenti nell'intero comprensorio del Parmigiano-Reggiano, di notevole interesse per i Comprensori di bonifica, il Centro di Ricerche per le Produzioni Animali (CRPA), le Province oltre che per il Consorzio del Parmigiano-Reggiano. Questo nuovo strato informativo risulterà indispensabile affinché essi possano essere tutelati e valorizzati attraverso l'inserimento negli strumenti vigenti di pianificazione territoriale.

Riferimenti bibliografici

Belvederi G. et al., (2010), “Il nuovo database dell’uso del suolo della Regione Emilia-Romagna”, Atti 15^a Conferenza Nazionale ASITA

Ligabue M., et al., (2008) - “Scorrimento o aspersione, come irrigare i prati, Speciale”, L'Informatore Agrario, 20: 43-48.

Garavaldi A, Bortolazzo E., (2008) Qualità del Parmigiano-Reggiano caratterizzata dai foraggi, L'informatore Agrario, 11: 51-55.

Tinarelli R., (2008), “Il declino di prati e pascoli in Emilia-Romagna e le specie ornamentali che da essi dipendono”, Natura Modenese, Atti del Convegno Uccelli di prati e pascoli: stato e prospettive di conservazione 8: 6-12.

Provincia di Parma, (2003), Università degli studi di Parma: Censimento e caratterizzazione pedologica e vegetazionale dei “Prati Stabili” presenti nel Parco Regionale Fluviale del Taro.

Provincia di Parma (2010), I prati della Via Emilia - Progetto di tutela, recupero e valorizzazione.

Gardi C. et al., (2002), Soil quality indicators and biodiversity in northern Italian permanent grasslands, *European journal of soil biology*, 38 :103-110.

NaviNFC: una soluzione NFC per la navigazione *indoor*

Thomas Bolognesi, Antonella Frisiello, Antonio Lotito, Giovanni Spoto

ISMB – ISAST – Handheld and Usability Unit, Via P.C. Boggio 61, 10138 Torino, 0112276424, fax 0112276299
{bolognesi,frisiello,lotito,spoto}@ismb.it

Riassunto

Negli ultimi anni le innovazioni nel mondo delle telecomunicazioni mobili e dei terminali, insieme alla disponibilità di reti di nuova generazione, hanno favorito lo sviluppo di servizi e contenuti specificatamente pensati per la mobilità. Tra essi si possono annoverare i sistemi di navigazione, prevalentemente utilizzati in ambienti *outdoor* e che, oggi, si vorrebbero sfruttare per guidare le persone anche in ambienti *indoor* quali aeroporti, centri commerciali, ospedali.

I dispositivi mobili, più specificatamente *Smartphone* e *Tablet*, offrono caratteristiche tecniche e capacità computazionali comparabili a quelle dei *notebook* di qualche anno fa. Grazie a queste, possono supportare sempre più tecnologie: GPS, *Wi-Fi*, *Bluetooth* e oggi anche NFC (*Near Field Communication*).

Quest'ultima tecnologia, le cui prime specifiche risalgono al 2003, fornisce connettività *wireless* bidirezionale a corto raggio e, secondo Gartner, nel 2012 se ne verificherà un *boom* di diffusione. La principale applicazione, si prevede, sarà legata a pagamenti e servizi finanziari tramite il proprio terminale.

Il presente articolo ne propone un'applicazione alternativa e descrive NaviNFC, un servizio di navigazione *indoor* per terminali mobili sviluppato dall'unità *Handheld and Usability* di ISMB, centro di ricerca applicata alle tecnologie ICT.

NaviNFC consente di leggere *tag* (etichette) NFC, opportunamente posizionati in punti strategici dell'ambiente, per identificare, localizzare e visualizzare su una mappa la propria posizione corrente, la posizione di un *target* di interesse e il percorso ottimale per raggiungerlo. NaviNFC sfrutta la tecnologia NFC anche per trasferire sul dispositivo mobile, direttamente in loco, i supporti cartografici necessari per la navigazione, quali mappe planimetriche o strutture dati più complesse quali, ad esempio, le *Navteq Destination Maps*. Tale applicazione lascia spazio, inoltre, a più ampi scenari di utilizzo, che possono includere anche servizi di *GeoMarketing*.

Fondamentali per l'accettabilità di una soluzione pensata per la mobilità sono la *user experience* e la facilità d'uso, valutate dal punto di vista dell'utilizzatore. A tal fine, la strategia di interazione di NaviNFC supporta il *microtasking*, per minimizzare gli *input* richiesti all'utente e semplificare il più possibile la navigazione, sia nell'applicazione, sia nello spazio fisico rappresentato.

Abstract

In recent years, innovations in the world of mobile telecommunications and mobile devices, together with the availability of next generation networks, have contributed to the development of services and contents specifically designed for mobility. Such services include navigation systems, mostly used in outdoor environments and which, today, would be useful to adopt for guiding people in indoor environments such as airports, shopping malls, hospitals.

Today, mobile devices, such as Smartphones and Tablet, have technical and computational capabilities similar to those of notebooks available a few years ago. Therefore, they can support

more and more technologies: GPS, Wi-Fi, Bluetooth, and now also NFC (Near Field Communication).

NFC technology, whose specifications started in 2003, provides short-range wireless bidirectional connectivity and, according to Gartner, by 2012 it will see strong adoption. The main application is expected to be related to mobile payments and financial services through the user personal device.

This paper proposes an alternative application and describes NaviNFC, an indoor navigation service for mobile devices developed by the Handheld and Usability Unit of ISMB, applied research center on ICT.

Through NaviNFC it is possible read NFC tags, appropriately placed at strategic points in the environment, in order to identify, locate and view on a map the current location, the location of a target of interest and the optimal path to get there. NaviNFC uses NFC technology also to transfer into mobile device, directly on site, the necessary maps for the indoor navigation, such planimetric maps or more complex data structures like, for example, Navteq Destination Maps. This application can support, besides, wider scenarios, which can also include GeoMarketing services.

Basic features for designing a successful mobile service are the user experience and especially the easy of use. Therefore, NaviNFC supports microtasking to minimize user inputs and to simplify, as much as possible, both the navigation within the application, and the navigation into the physical space represented.

1 Introduzione

I sistemi di navigazione basati su GPS (*Global Positioning System*) sono diventati molto popolari negli ultimi anni, perché hanno permesso a un numero sempre crescente di persone di muoversi rapidamente in aree non conosciute. Tale successo può essere attribuito principalmente al basso costo dei terminali mobili, che ne ha permesso una distribuzione di massa. Tuttavia, l'approccio basato su GPS, per funzionare correttamente, ha la necessità di sfruttare un collegamento costante con il satellite e, per questo motivo, non può essere fruito in ambienti *indoor*, in quanto il segnale del satellite risulterebbe troppo debole per essere utilizzato. La forte necessità di muoversi in ambienti interni, quali musei, ospedali o aeroporti, ha portato alla nascita di differenti soluzioni che sfruttano nuovi sistemi di posizionamento. Tali soluzioni necessitano, generalmente, di un'infrastruttura permanente nell'ambiente in cui si deve operare, risultando quindi molto costose.

Esistono anche implementazioni alternative che non richiedono la presenza di un'infrastruttura fissa di localizzazione, tuttavia a oggi difficilmente sono state sviluppate e distribuite sul mercato, principalmente perché implicano di demandare la gestione della localizzazione alla componente mobile, che deve offrire buone *performance hardware e software* e avere peso e dimensioni ridotte per essere facilmente fruita in mobilità.

I miglioramenti tecnologici degli ultimi anni hanno favorito l'evoluzione degli *smartphone*, che bene rispondono ai suddetti requisiti. Infatti, la loro diffusione sta aumentando notevolmente a livello globale: secondo Gartner si è verificata nel solo 2010 una crescita del 96% rispetto alla diffusione nell'anno precedente (Gartner, 2010). In Italia, un'indagine (Nielsen, 2009) rileva che il 28% della popolazione possiede uno *smartphone*, oltre il doppio rispetto a Germania (12%) e Svezia (13%). Contemporaneamente, sono state ampliate le dotazioni *hardware*: a bordo di uno *smartphone* si possono ormai trovare GPS, *Wi-Fi*, *Bluetooth*, fotocamere, accelerometri, e ora anche NFC (*Near Field Communication*).

Quest'ultima tecnologia fornisce connettività *wireless* bidirezionale a corto raggio e si prevede che sarà sempre più diffusa, consentendo in prima battuta di effettuare pagamenti e accedere a servizi finanziari direttamente dal proprio terminale.

Il presente articolo ne propone un uso alternativo e descrive NaviNFC, un servizio innovativo di navigazione *indoor* per *smartphone* sviluppato nei laboratori ISMB, che impiega la tecnologia NFC come strumento di localizzazione *indoor*.

La conoscenza della posizione geografica dell'utente, ottenuta grazie alla lettura di *tag* NFC opportunamente posizionati, consente di implementare un sistema di navigazione affidabile e a basso costo. Tale sistema impiega una base di dati per la gestione dei supporti cartografici necessari alla navigazione, quali mappe planimetriche georeferenziate o strutture dati più complesse come, per esempio, le *Navteq Destination Maps* (NAVTEQ, 2011).

Il sistema di navigazione progettato è in grado di eseguire il *rendering* di una mappa, di indicare sullo schermo dello *smartphone* la posizione corrente dell'utente, la posizione di un *target* di interesse e il percorso ottimale dell'itinerario da seguire per raggiungerlo.

La soluzione realizzata, non necessitando di una infrastruttura per la localizzazione, è facilmente integrabile in un edificio e non richiede elevati costi di installazione e mantenimento.

Nel seguito dell'articolo sarà presentata una rassegna dei principali sistemi di navigazione *indoor*. A seguire sarà descritta la soluzione NaviNFC. Nell'ultima parte saranno infine evidenziati i risultati e i possibili sviluppi futuri della soluzione implementata.

2 Stato dell'arte dei sistemi di navigazione *indoor*

Gli ambienti *indoor* che richiedono o si prestano ad applicazioni di navigazione si caratterizzano per una complessità strutturale elevata, includono frequentemente diversi piani e possono essere molto articolati e difficili da percorrere, a tal punto da obbligare gli utenti a dover chiedere informazioni per orientarsi. I sistemi di navigazione *indoor* rappresentano una valida soluzione a questo problema e, a differenza delle *indoor maps applications*, che si limitano a visualizzare su una mappa la posizione dell'utente, calcolano anche il percorso minimo e forniscono le indicazioni per arrivare a un preciso punto di destinazione (Ruppel, Gschwandtner, 2009).

Nonostante i sistemi di navigazione *indoor* possano a prima vista sembrare più semplici dei sistemi *outdoor*, per esempio per le ridotte dimensioni delle aree interessate e la minore velocità di movimento degli utenti che vi si muovono a piedi, essi devono comunque operare in conformità a stretti requisiti e tenere conto della complessa topologia di un edificio. Infatti, i concetti applicabili comunemente ai sistemi per la navigazione *outdoor* non sono applicabili in ambienti *indoor*, dove gli utenti hanno maggiori possibilità di movimento. Inoltre è indispensabile un'accurata localizzazione dell'utente, per riuscire a fornire adeguate istruzioni che consentano di raggiungere la destinazione. Infine, il sistema di navigazione deve rispettare la *privacy* dell'utente, garantendo che tutti i dati correlati alla propria posizione siano sotto il controllo esclusivo dell'utente stesso (Ruppel, Gschwandtner, 2009).

Ad oggi esistono diverse soluzioni che consentono a un utente di essere guidato all'interno di edifici complessi; ognuna presenta vantaggi e problematiche, legate principalmente all'efficacia e al costo del sistema stesso.

I sistemi maggiormente diffusi sono naturalmente le tradizionali indicazioni statiche, fornite tramite segnaletica orizzontale o verticale. Al crescere delle informazioni la comunicazione perde tuttavia di efficacia e diventa complesso raggiungere la propria destinazione.

Un'evoluzione suggerita da Kray et al. (2008) prevede che la navigazione *indoor* sia supportata da *digital display* pubblici, sempre più diffusi in ambienti come aeroporti e centri fieristici.

Esistono anche sistemi di navigazione *indoor* che impiegano tecniche di *Dead Reckoning* e stimano la posizione corrente sulla base del calcolo degli spostamenti da un punto iniziale noto. Il calcolo si basa su direzione e velocità dell'utente acquisite tramite sensori inerziali in uno specifico intervallo di tempo. I recenti sensori MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*) hanno reso possibile l'impiego dei sistemi inerziali di navigazione su dispositivi mobili (Lukianto, Sternberg, 2011), tuttavia questa tecnica di localizzazione dipende dalla precisione dei sensori adottati e, su percorsi lunghi, può facilmente portare a errori.

Attualmente sono molto diffusi i sistemi di posizionamento su base satellitare GPS che, se da un lato hanno il vantaggio di non richiedere una costosa infrastruttura, dall'altro non sono in grado di operare efficientemente in ambienti interni, principalmente per problemi di ricezione del segnale e per la maggiore precisione richiesta dai sistemi di navigazione *indoor*; sono disponibili tecnologie che consentono di migliorare la ricezione del segnale *indoor*, ma hanno costi elevati.

La localizzazione di un utente può avvenire anche impiegando la rete cellulare, che tuttavia non fornisce un'informazione sufficientemente accurata per consentire la navigazione in ambienti chiusi e circoscritti.

Sono da segnalare anche i sistemi di navigazione *Sound-based*, che impiegano gli ultrasuoni per misurare la distanza fra trasmettitore e ricevitore; un noto esempio di tale tecnica è rappresentato dall'*Active Bat System*, che richiede la presenza di ricevitori a ultrasuoni installati nell'edificio, visibili dal trasmettitore indossato dall'utente. Mediante tecniche di triangolazione, il sistema offre un'altissima precisione a fronte, tuttavia, di una densa infrastruttura (Hazas, Hopper, 2006).

Esistono anche diverse tecniche di localizzazione che impiegano onde elettromagnetiche, che includono sistemi a infrarossi e sistemi basati su onde radio ad alta frequenza come *Wi-Fi*, *Bluetooth*, *Ultra Wideband*, *ZigBee*. Tipicamente i sistemi a infrarossi (es. *Active Badge System*) operano analogamente ai sistemi *Sound-based*: l'utente indossa un *badge* che emette segnali infrarossi, che vengono ricevuti dai sensori presenti nell'ambiente circostante. La precisione della localizzazione dipende strettamente dal numero di sensori che compongono l'infrastruttura. I sistemi che impiegano onde radio, generalmente, localizzano l'utente misurando l'intensità del segnale ricevuto (*Received Signal Strength Indicator*) dai nodi presenti in un'infrastruttura, oppure tramite tecniche che consentono il rilevamento di prossimità, quali per esempio la lettura di etichette RFID (*Radio Frequency IDentification*).

Sono da considerare, infine, anche i sistemi ottici, nei quali il sistema di navigazione compie operazioni di analisi su immagini acquisite dal *device* dell'utente. In questa categoria rientra il sistema descritto da Ravi et al. (2006), che determina la posizione dell'utente basandosi sulle immagini catturate da uno *smartphone* indossato dallo stesso e inviate periodicamente a un *web server* centrale; le immagini sono quindi confrontate con quelle presenti nel *database* centrale e la posizione corrente è restituita. Il sistema offre una buona affidabilità (probabilità di successo pari all'80%) e ha un basso costo, ma richiede una fase iniziale di acquisizione delle immagini dell'ambiente *indoor*.

Rientrano nella stessa categoria anche i sistemi che impiegano il *device* dell'utente per eseguire il riconoscimento di codici QR (*Quick Response*), codici a barre bidimensionali che la maggior parte dei telefoni di ultima generazione è in grado di decodificare. Il sistema prevede che ciascuna etichetta sia associata a una nota e univoca posizione e che l'utente debba solo leggere un'etichetta per essere in grado di effettuare un *fix* della propria posizione. In questo caso, la precisione del sistema dipende dal numero di etichette distribuite nell'ambiente *indoor* (Mulloni et al., 2009).

3 La soluzione NaviNFC

Funzionamento della soluzione

La soluzione implementata nei laboratori ISMB consente agli utenti di navigare in ambienti *indoor* tramite rapide e intuitive operazioni, impiegando uno *smartphone* dotato di tecnologia NFC.

All'ingresso dell'edificio, se NaviNFC non è già presente sul telefono, l'utente può eseguirne l'installazione mediante la tecnologia NFC sfruttando una connessione *peer-to-peer* stabilita fra lo *smartphone* e un apposito lettore NFC collegato a un PC.

Tramite la stessa modalità *peer-to-peer*, si gestiscono anche gli eventuali aggiornamenti di mappe e informazioni di navigazione.

Dopo questi passi, compiuti all'ingresso dell'edificio, l'utente è già in grado di utilizzare l'applicazione NaviNFC per: cercare una destinazione e ottenere l'itinerario da percorrere (come

accade in luoghi come aeroporti o ospedali), oppure esplorare genericamente l'ambiente e riceverne informazioni (come avviene in musei o centri commerciali).

Per calcolare il percorso ottimale da suggerire all'utente, l'applicazione necessita naturalmente di un punto di partenza e di un punto di destinazione.

Il sistema chiederà all'utente di localizzarsi, avvicinando il proprio *smartphone* alla prima etichetta NFC disponibile, che sarà considerata il punto di partenza. Tale punto potrà corrispondere all'ingresso o a una qualsiasi etichetta NFC presente nell'edificio.

L'utente potrà inserire il punto di destinazione desiderato, e il sistema calcolerà e visualizzerà su una mappa il percorso ottimale per raggiungerlo a partire dal primo *tag* letto.

Muovendosi all'interno dell'edificio l'utente potrà leggere, sempre avvicinando il proprio *smartphone*, le etichette NFC collocate in punti opportuni (corridoi, incroci, porte). Questi rappresentano dei *check point*, dove è possibile rilevare la propria posizione durante la visita. A fronte della lettura di un *check point*, il sistema segnalerà sulla mappa la posizione corrente, comunicherà eventuali informazioni associate al punto rilevato e, nel caso in cui il punto letto non appartenga al percorso determinato in precedenza, ricalcolerà automaticamente il percorso ottimale, impiegando la posizione corrente come nuovo punto di partenza.

Architettura della soluzione

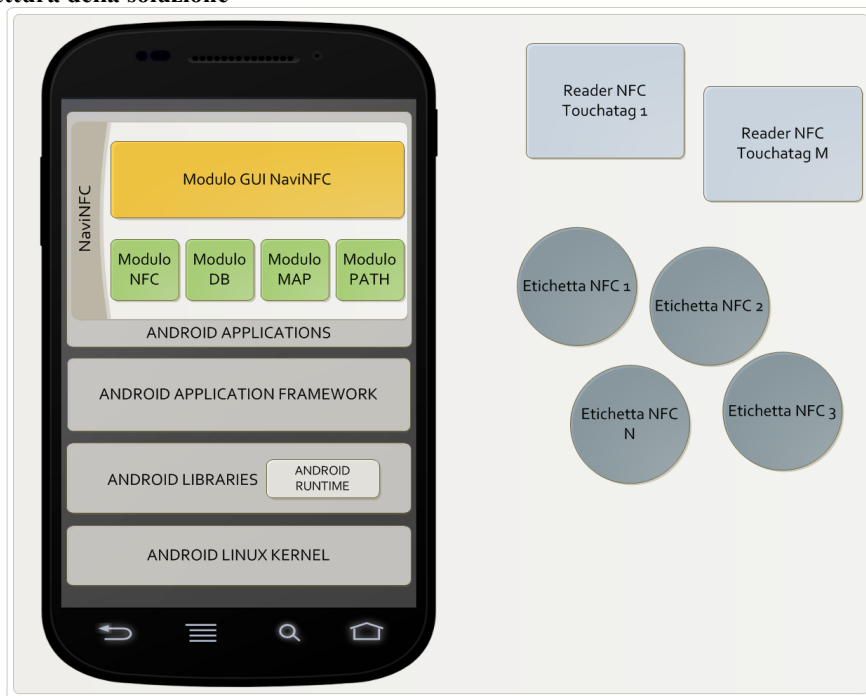


Figura 1 – Moduli della soluzione NaviNFC.

Come indicato in Figura 1, attualmente la soluzione è stata sviluppata solo per *smartphone* Android ed è composta di cinque moduli principali che eseguono *task* specifici: il modulo NFC, il modulo DB, il modulo MAP, il modulo PATH e il modulo GUI NaviNFC. Sono inoltre presenti anche moduli esterni per la gestione dei *reader* Touchatag (Touchatag, 2011), tramite i quali, nella fase iniziale, l'applicazione e le mappe sono trasferite sullo *smartphone*.

Il modulo GUI NaviNFC visualizza e gestisce l'interfaccia grafica dell'applicazione. Consente all'utente di visualizzare, ricavandola dai moduli MAP e DB, la mappa dell'edificio ed eventualmente di inserire un punto di destinazione che desidera raggiungere. Dopodiché, a fronte della lettura di un'etichetta, interviene il modulo NFC, che legge e decodifica l'informazione contenuta nell'etichetta stessa e provvede a inviarla al modulo DB, dal quale si risale alle coordinate del punto letto. Date le coordinate del punto letto e del punto di destinazione, il modulo PATH può quindi calcolare il percorso ottimale fra i due punti. Ottenuto il percorso ottimale, il modulo MAP è in grado di generare la mappa dell'edificio, il percorso da seguire ed eventuali *marker* utili all'utente. L'itinerario è infine visualizzato nel modulo GUI NaviNFC.

La piattaforma *open source* Android, uno *stack software* per dispositivi mobili, è stata selezionata per lo sviluppo dell'applicazione di navigazione descritta nell'articolo per due motivazioni: in primo luogo, ad oggi, pochi produttori hanno introdotto, per il mercato europeo, *smartphone* che integrano la tecnologia NFC. In secondo luogo, i rapporti sulle vendite degli *smartphone* rilevano una forte espansione per il sistema operativo Android, che sta conquistando sempre più ampie aree di mercato. Secondo un *report* pubblicato dalla società di ricerche di mercato Gartner, Android diventerà il più diffuso sistema operativo per *smartphone* entro la fine del 2011 e rappresenterà la metà del mercato mondiale nel 2012 (Gartner, 2011).

Android include un sistema operativo, uno strato *middleware* e un livello applicazioni. Fornisce inoltre agli sviluppatori l'Android SDK (*Software Development Kit*), che offre gli strumenti e le API (*Application Programming Interface*) necessarie per scrivere applicazioni per la piattaforma, mediante il linguaggio di programmazione Java. Tali applicazioni sono eseguite tramite la Dalvik *Virtual Machine*, una Java *virtual machine* ottimizzata per dispositivi mobili. Android comprende: un *Application Framework* che consente il riutilizzo delle componenti; un *Browser* integrato basato su WebKit; librerie per la gestione di grafica bidimensionale e tridimensionale; *database* relazionale SQLite per la memorizzazione dei dati; supporto per i più diffusi formati audio, video e immagine.

A seguire saranno descritti, in dettaglio, i moduli del sistema e l'interazione fra i moduli stessi.

Modulo NFC

Il modulo NFC gestisce le comunicazioni che avvengono tramite NFC (*Near Field Communication*), una tecnologia di comunicazione *wireless* a corto raggio che consente a due dispositivi a distanza ravvicinata (inferiore ai quattro cm) di scambiarsi informazioni con velocità di trasmissione compresa fra 106 kbps e 424 kbps (NFC Forum, 2011).

Il protocollo NFC, sviluppato congiuntamente da Sony e Philips nel 2003, adotta una sola frequenza operativa (13,56 MHz) e supporta le seguenti tre modalità di funzionamento: *Reader/Writer mode*, *Peer-to-Peer mode*, *Card Emulation mode*. Nella prima modalità il dispositivo NFC è in grado di leggere *tag* NFC, tipicamente etichette passive; alcune tipologie di *tag* consentono anche l'operazione di scrittura. Nella seconda modalità due *device* possono scambiare informazioni attraverso una connessione *Peer-to-Peer*. Infine, nella *Card Emulation mode* il device NFC è considerato da un lettore esterno al pari di una tradizionale *contactless smart card*, permettendo ad esempio di eseguire pagamenti e accedere a servizi finanziari direttamente dal proprio terminale, senza dover modificare l'infrastruttura esistente.

Secondo Gartner, nel 2012 la tecnologia NFC dovrebbe andare incontro a un aumento di diffusione ed è segnalata come una delle *Top 10 Consumer Mobile Applications*, in quanto si ritiene possa incrementare la fidelizzazione degli utenti nei confronti dei fornitori di servizi e, contemporaneamente, avere un enorme impatto sui modelli di business degli operatori (Gartner, 2009). Queste previsioni sembrerebbero trovare un'iniziale conferma in *Google Wallet*, un sistema di pagamento che sfrutta i chip NFC, già implementati in alcuni telefoni (compreso il modello

Nexus S adottato nell'applicazione di navigazione *indoor* descritta nel presente articolo), al fine di effettuare pagamenti in esercizi convenzionati (Google, 2011).

Il modulo NFC sviluppato da ISMB gestisce le modalità *Peer-to-Peer* e *Reader*.

La modalità *Peer-to-Peer* è sfruttata nella fase iniziale, qualora l'utente debba scaricare l'applicazione NaviNFC o le mappe dell'edificio da percorrere. Il trasferimento dei *file* necessari avviene tramite la connessione stabilita fra lo *smartphone* dell'utente e un *reader* NFC, attraverso cui avviene il *push* dei dati (l'applicazione NaviNFC e la mappa dell'edificio) verso lo *smartphone*. Le operazioni di gestione della mappa, memorizzata sulla *external storage directory* dello *smartphone*, sono invece a carico del modulo MAP.

La modalità *Reader* è impiegata quando l'utente avvicina il proprio *smartphone* ad una etichetta NFC per eseguire il *check*: il modulo NFC ne rileva la lettura e, se l'etichetta appartiene alla tipologia gestita dall'applicazione, inoltra un messaggio, in cui è incapsulata l'informazione contenuta nell'etichetta, ad un servizio in esecuzione in *background*.

Poiché ogni etichetta possiede un identificativo univoco, il servizio è in grado di risalire all'esatta informazione di posizione e a eventuali dati addizionali attinenti al punto letto (personale presente in un ufficio, servizi offerti...). Tale operazione è effettuata interrogando il modulo DB, che costituisce il *content provider* di NaviNFC.

Modulo DB

La soluzione NaviNFC adotta due funzionalità di Android per il salvataggio permanente dei dati: *SQLite Database* ed *External Storage*. La prima permette di utilizzare *database embedded* SQLite. SQLite è una libreria *software* che implementa un *Database Management System* transazionale, *self-contained* e che non richiede una fase di configurazione (SQLite, 2011). La seconda fornisce un'area di memoria condivisa, in cui è possibile salvare, in modo permanente, dei dati; tale area può essere rimovibile (per esempio una *SD card*) o interna.

Il modulo DB gestisce il *database* SQLite contenente la tabella con gli identificativi delle etichette NFC, le relative coordinate e gli eventuali dati aggiuntivi. Mantiene inoltre una tabella con il collegamento alla *external storage directory* dello *smartphone* in cui è memorizzata la mappa dell'edificio.

Modulo MAP

Il modulo MAP gestisce la mappa georeferenziata dell'edificio e tutte le informazioni visualizzate sulla mappa stessa, quali *marker* significativi (punto di partenza, punto di destinazione, punti di check...) e percorso da seguire. La georeferenziazione dei *tag* è stata abilitata dall'esperienza pregressa acquisita nel corso del progetto ERSEC (ERSEC, 2011).

La mappa è costituita da un file MBTiles.

MBTiles è una specifica per memorizzare i dati di mappe *tiled* in database SQLite, progettata per essere in grado di gestire anche milioni d'immagini *tile* in un unico file (MBTiles, 2011). Il formato semplifica e velocizza il trasferimento delle immagini *tile*, caratteristica molto utile in ambiente *mobile*. Inoltre, poiché i *file* MBTiles sono *self-contained*, possono essere usati anche *offline*, senza una connessione Internet.

NaviNFC adotta il formato MBTiles, oltre alle caratteristiche sopra citate, anche perché Android supporta in maniera nativa la libreria SQLite, e questo semplifica l'accesso alle tabelle del *database* migliorando le prestazioni.

Per visualizzare i file MBTiles, NaviNFC impiega la libreria OsmDroid, un *tool* sviluppato per interagire con i dati di OpenStreetMap, ma in grado di gestire anche *file* in formato MBTiles (osmdroid, 2011). Tramite osmdroid sono anche aggiunti sulla mappa due diversi *layer*, contenenti

rispettivamente i *marker* (punto di partenza, punto di destinazione, punti di check...) e il percorso suggerito all'utente.

Per ottenere il file MBTiles sono stati effettuati, a priori, i seguenti passi, a partire dalla mappa georeferenziata dei laboratori ISMB, disponibile in formato DXF.

La mappa in formato Autocad DXF (Autodesk, 2011) è elaborata tramite il *software* ArcGIS (ESRI, 2011), e trasformata in *shapefile*. Shapefile è un formato vettoriale per sistemi informativi geografici, sviluppato da ESRI, ampiamente utilizzato nei sistemi GIS (*Geographic Information System*) e permette di gestire dati geometrici (punti, linee e poligoni) insieme alle relative informazioni (ESRI, 1998).

Come ultimo passo è stato impiegato il *software* TileMill che consente di esportare i *file shapefile*, appena ottenuti, in un *file* MBTiles (TileMill, 2011).

Modulo PATH

Il modulo PATH è responsabile, nota la posizione corrente dell'utente, dell'elaborazione del percorso ottimale per raggiungere la destinazione e dell'invio di tale percorso al modulo MAP, il quale potrà visualizzarlo sulla mappa dell'edificio.

La logica con cui viene calcolato l'itinerario è essenziale in un sistema di navigazione *indoor*, in quanto il tragitto deve essere percorso a piedi e, preferibilmente, nel minor tempo possibile. A differenza dei tradizionali sistemi di navigazione stradale è, inoltre, necessario considerare informazioni specifiche dei percorsi pedonali, come sottopassaggi, scale, ascensori.

Per calcolare il percorso, la soluzione adotta un algoritmo per la ricerca del cammino minimo, il quale opera su un grafo. L'algoritmo richiede una fase iniziale di conversione della mappa dell'edificio, il cui risultato è una struttura a grafo che indica tutti i cammini percorribili. Stanze, incroci, scale, e ascensori rappresentano i nodi del grafo, mentre i corridoi costituiscono gli archi.

In NaviNFC, a ciascun nodo sono associate delle coordinate e ogni arco rappresenta un tratto di percorso che l'utente può seguire per attraversare due nodi adiacenti. Un utente può muoversi da un nodo a un altro solo se questi sono collegati da un arco. A ogni arco è associato un costo di percorrenza che corrisponde al prodotto della distanza tra i due nodi e la velocità ipotizzata di percorrenza; la distanza tra i due nodi è ricavata tramite il calcolo della distanza euclidea tra le sue coordinate. Per nodi particolari, quali scale e ascensori, è possibile adottare criteri differenti e attribuire, quindi, all'arco un costo speciale. Elementi più complessi, quali le curve, sono rappresentati come insieme di singoli archi.

L'algoritmo per la ricerca del percorso minimo adottato in NaviNFC è il noto algoritmo di Dijkstra, che calcola efficientemente il percorso di minor costo da un nodo (la sorgente) a tutti gli altri nodi del grafo. La complessità computazionale dell'algoritmo, nel caso peggiore, è $O(n^2)$, dove n è il numero totale dei nodi nel grafo.

Modulo GUI NaviNFC

Il modulo GUI NaviNFC interagisce con tutti gli altri moduli della soluzione e fornisce all'utente l'interfaccia, di cui è riportata una schermata in Figura 2, per navigare nell'ambiente *indoor*. L'interfaccia NaviNFC adotta componenti Android *standard* per la gestione della *User Interface*, quali: *Layout* (per organizzare l'architettura dell'interfaccia grafica), *Widgets* (*Button*, *ListView*, *TextView* per l'inserimento dei dati), *Options Menu* (per gestire i menu a scomparsa), *Dialog* (finestre *AlertDialog* e *ProgressDialog*, per fornire *feedback* all'utente). Tali elementi sono stati organizzati per garantire usabilità e accessibilità della soluzione implementata.

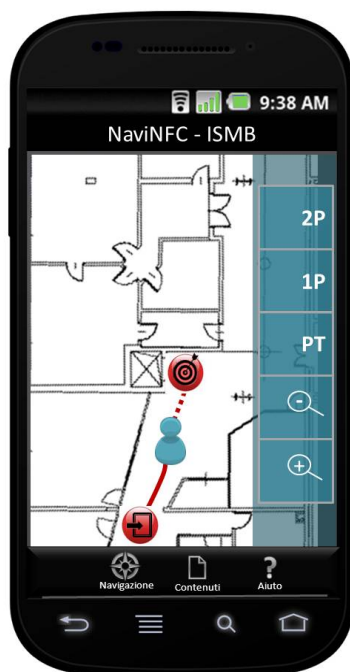


Figura 2 – Interfaccia della soluzione NaviNFC.

In un'applicazione progettata per la mobilità è fondamentale considerare la *user experience* e la facilità d'uso, in quanto i dispositivi mobili presentano specificatamente problemi tecnici, ambientali e sociali relativi all'usabilità (Gorlenko, Merrick, 2003). Alcuni problemi tecnici, quali durata delle batterie e velocità di connessione alla rete, sono stati parzialmente risolti a livello industriale, mentre la dimensione limitata dello schermo continua a essere critica: l'usabilità dei sistemi di navigazione su dispositivi mobili dipende pesantemente dall'interazione con la mappa, dalla visualizzazione delle informazioni presentate e dall'interazione con il dispositivo stesso. Fra i problemi ambientali rientrano condizioni di contesto, come luminosità, temperatura e mobilità dell'utente, mentre i problemi sociali riguardano principalmente l'accettabilità della soluzione e la *privacy* dell'utente.

Oltre agli aspetti connessi ai dispositivi mobili, sussistono inoltre problemi specifici dei sistemi di navigazione, riconducibili, principalmente, a una non immediata comprensione della rappresentazione dell'ambiente e a una rapida frammentazione dell'attenzione dell'utente.

A fronte delle problematiche sopra riportate, NaviNFC è progettata in modo tale che l'interfaccia grafica permetta all'utente di costruirsi un modello mentale dello spazio, una conoscenza funzionale agli scopi che si propone e che, con la massima semplicità, lo supporti nella pianificazione di attività e spostamenti.

L'interfaccia grafica di NaviNFC si organizza intorno alla visualizzazione della mappa, a partire dalla quale l'utente ha la possibilità di avere una visione di insieme dello spazio. Per questo l'area dello schermo dedicata alla mappa è la più ampia possibile. Per ottenere un'immediata comprensione della mappa, NaviNFC adotta un *layout* grafico semplificato e visualizza solo i *landmarks* opportuni, offrendo una mappa autoesplicativa e non saturata di punti di riferimento. La

mappa è visualizzata in 2D, la modalità di visualizzazione maggiormente diffusa e familiare all'utente (Rukzio et al., 2006), e supporta le operazioni di *zoom* e *pan*.

Le principali operazioni sono gestite tramite *menu* a scomparsa, in cui sono organizzate le funzioni per indicare il punto di partenza e aggiornare la propria posizione (avvicinando lo *smartphone* all'etichetta NFC più vicina) o scegliere una destinazione alla quale essere guidato. L'input della destinazione può avvenire in diversi modi: con l'immissione di testo, la scelta da una lista o la selezione *touch* direttamente sulla mappa. Per minimizzare gli *input* richiesti all'utente e semplificare, il più possibile, la navigazione sia nell'applicazione, sia nello spazio fisico rappresentato, NaviNFC supporta il *microtasking*, assistendo l'utente nell'esecuzione di brevi *task* semplici e guidati.

L'interfaccia grafica del sistema non si limita allo schermo dello *smartphone*: una parte importante del *design* riguarda la corrispondenza tra gli elementi grafici utilizzati dal programma e gli elementi del contesto reale rappresentato e, in particolare, le etichette NFC: poter ritrovare facilmente elementi di riferimento dell'ambiente reale sulla mappa, rende l'applicazione affidabile nella percezione dell'utente e garantisce una più veloce interazione.

La facilità d'uso della soluzione deriva anche dall'essenzialità dell'interazione: all'utente non sono richieste credenziali, né operazioni di *pairing*. Sono esclusi in questo modo anche eventuali problemi di *privacy*, poiché l'utente non invia alcun dato: le comunicazioni avvengono solo dalle etichette NFC allo *smartphone* dell'utente, e coinvolgono solo le informazioni presenti nei *tag* NFC.

4 Conclusioni e sviluppi futuri

L'articolo ha illustrato NaviNFC un servizio di navigazione *indoor* per terminali mobili sviluppato nei laboratori ISMB.

Le principali caratteristiche che lo differenziano da altre soluzioni di navigazione *indoor* sono il costo contenuto e l'alta efficienza. Il sistema non richiede, infatti, l'installazione di un'onerosa infrastruttura, impiegando solo un insieme di etichette NFC passive (poco costose in quanto prive di batterie interne) e *smartphone* Android (già presenti sul mercato). L'utilizzo del protocollo NFC e la memorizzazione dell'intera mappa dell'edificio sullo *smartphone* dell'utente garantiscono inoltre rapidi tempi di risposta.

L'uso della tecnologia NFC nell'applicazione implica il ruolo attivo dell'utente in movimento, in quanto è sufficiente la lettura a distanza ravvicinata delle etichette per effettuare il *check* della propria posizione. Tale vincolo assicura d'altra parte un'alta precisione e stabilisce, senza incertezza, la posizione dell'utente, senza impiegarne dati personali e rispettandone la *privacy*.

L'applicazione descritta è stata sviluppata e validata tecnicamente presso i laboratori di ricerca di ISMB. Sono in programma sessioni di valutazione con il coinvolgimento di utenti reali, in contesti applicativi reali.

NaviNFC si presenta come una soluzione semplice e flessibile, adattabile a diversi contesti d'uso, che prevedano oltre a compiti di *wayfinding*, la consultazione o la ricezione di contenuti personalizzati e geolocalizzati. La tecnologia NFC può essere, infatti, adottata per veicolare messaggi e informazioni, anche commerciali. Il vantaggio proviene, oltre che dal posizionamento nello spazio dell'utente, anche dalla possibilità di sfruttare l'interazione con l'ambiente reale: i *tag* possono essere parte di *smart poster*, *totem* o di intelligenti *package* di prodotto. L'idea alla base di NaviNFC può quindi essere impiegata in servizi innovativi come il *proximity marketing* e il *geomarketing*, dove la profilazione commerciale dei potenziali clienti si basa sulla loro posizione e il comportamento nello spazio.

Infine, la flessibilità della soluzione consente di includere anche modalità tipiche dei *social network*, dove i contenuti generati dagli utenti, le preferenze, le reti sociali possono essere usate per suggerire e personalizzare percorsi, informazioni, offerte.

Bibliografia

Autodesk (2011), "AutoCAD Services & Support – DXF Reference", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo

<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/item?linkID=10809853&id=12272454&siteID=123112>

ERSEC (2011), "ERSEC project - Enhanced Road Safety by integrating Egnos-Galileo data with on-board Control system", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo

<http://www.ersecproject.eu/>

ESRI (2011), "ArcGIS - Mapping and Spatial Analysis for Understanding Our World", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>

Gartner (2011), "Gartner Says Android to Command Nearly Half of Worldwide Smartphone Operating System Market by Year-End 2012", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1622614>

Google (2011), "Google Wallet - make your phone your wallet", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://www.google.com/wallet/>

Lukianto C, Sternberg H. (2011) "Overview of Current Indoor Navigation Techniques and Implementation Studies", TS09A - Alternatives and Backups to GNSS

MBTiles (2011), "MBTiles Specification", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://mbtiles.org>

NAVTEQ (2011), "NAVTEQ Destination Maps to enable orientation, guidance and routing for interior spaces", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://press.navteq.com/index.php?s=4260&item=30551>

NFC Forum (2011), "NFC Forum", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://www.nfc-forum.org>

osmdroid (2011), "osmdroid - OpenStreetMap-Tools for Android - Google Project Hosting ", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://code.google.com/p/osmdroid/>

SQLite (2011), "SQLite Home Page", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://www.sqlite.org/>

TileMill (2011), "TileMill - A modern map design studio", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://tilemill.com/pages/index.html>

Touchatag (2011), "Touchatag Developer Network", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://www.touchatag.com/developer/docs/index>

Gartner (2010), "Gartner Says Worldwide Mobile Phone Sales Grew 35 Percent in Third Quarter 2010; Smartphone Sales Increased 96 Percent", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1466313>

Gartner (2009), "Gartner Identifies the Top 10 Consumer Mobile Applications for 2012", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1230413>

Mulloni A, Wagner D, Barakonyi I, Schmalstieg D. (2009) "Indoor Positioning and Navigation with Camera Phones", IEEE Pervasive Computing, 8(2):22–31

Nielsen (2009), "With Smartphone Adoption on the Rise, Opportunity for Marketers is Calling", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo http://blog.nielsen.com/nielsenwire/online_mobile/with-smartphone-adoption-on-the-rise-opportunity-for-marketers-is-calling/

Ruppel P, Gschwandtner F. (2009) "Spontaneous and Privacy-friendly Mobile Indoor Routing and Navigation", Proc. GI Jahrestagung, 2574-2583

Kray C, Harrison M, Wagner J. (2008) "Towards a location model for indoor navigation support through public displays and mobile devices", MIRW 2008

Hazas M, Hopper H. (2006) "Broadband Ultrasonic Location System for Improved Indoor Positioning", IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, 5:536-546

Ravi N, Shankar P, Frankel A, Elgammal A, Iftode L. (2006) "Indoor Localization Using Camera Phones", Seventh IEEE Workshop on Mobile Computing Systems & Applications (WMCSA'06)

Rukzio E, Müller M, Hardy R, "Design, Implementation and Evaluation of a Novel Public Display for Pedestrian Navigation: The Rotating Compass", In Proceedings of CHI'09, ACM Press 2006, 113-122.

Gorlenko L, Merrick R. (2003) "No wires attached: Usability challenges in the connected mobile world", IBM Systems Journal, 42, 639-651

ESRI (1998), "ESRI Shapefile Technical Description", consultato 31 agosto 2011, disponibile all'indirizzo <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>

Monitoraggio delle opere di sistemazione e gestione del rischio idrogeologico nei bacini idrografici calabresi mediante Sistemi Informativi Territoriali

G. Bombino, F. Manti, V. Tamburino, D.A. Zema, S.M. Zimbone

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Forestali ed Ambientali (DiSTaFA)
Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria - e-mail: francesco.manti@unirc.it

Riassunto

Sono presentati i risultati preliminari dell'integrazione, in ambiente WebGIS, di un archivio informatizzato delle opere idrauliche (*Arch.I.M.E.DE.*) all'interno del Sistema Informativo Territoriale per la gestione delle Emergenze (*SITgE*), utilizzato dalla Protezione Civile della Regione Calabria. Lo strumento che ne scaturisce consente la visualizzazione e l'aggiornamento in tempo reale delle caratteristiche delle opere di sistemazione idraulica e dei relativi effetti sul bacino idrografico, nonché dei dati relativi al territorio ed alle trasformazioni antropiche a cui esso è soggetto. La banca dati del SIT consente la gestione integrata delle informazioni territoriali e, se ulteriormente potenziata, può supportare le decisioni e la pianificazione di misure ed interventi finalizzati alla mitigazione del rischio idrogeologico e degli effetti ad esso connessi.

Abstract

The paper presents the preliminary results coming from integration of a computer database (*Arch.I.M.E.DE.*) concerning river control works, in WebGIS environment, in a Geographical Information System for emergency management (*SITgE*), utilised by Civil Protection of Calabria Region.

The combined tool is able to graphic display and update in real time: (i) river control works features and relative effects on watersheds; (ii) geographical data relating to environment and its modifications induced by human activities. The GIS database allows an integrated management of geographical information; moreover, if further implemented, it can support authorities' plans and actions concerning measures and interventions aiming at mitigate hydrogeological risks and their effects.

Posizione del problema e obiettivi

Come è noto, la Calabria è una delle regioni italiane che registra il più alto numero di dissesti; le cause del disequilibrio territoriale della regione sono legate sia a fattori naturali (tettonici, geomorfologici e climatici), che ne hanno determinato l'attuale assetto strutturale, sia a fattori antropici, responsabili, in molti casi, dell'accelerazione dei processi di degradazione del suolo. La ricorrenza con cui i fenomeni di dissesto idrogeologico interessano la Calabria ha recentemente richiamato l'attenzione di amministratori e tecnici verso l'impiego dei Sistemi Informativi Territoriali per acquisire, archiviare ed elaborare informazioni di varia natura, e gestire ed aggiornare, quindi, secondo un approccio sempre più integrato, i dati relativi al territorio ed alle trasformazioni e modificazioni antropiche a cui esso è soggetto. Ai fini della gestione delle emergenze, il Settore della Protezione Civile della Regione Calabria ha da tempo messo a punto un Sistema di Supporto alle Decisioni (*SITgE – Sistema Informativo Territoriale per la Gestione delle Emergenze*), in ambiente WebGIS, finalizzato alla gestione integrata delle informazioni territoriali, alla pianificazione delle attività di prevenzione e previsione nonché all'attuazione delle procedure operative di intervento in caso di calamità (fig. 1).

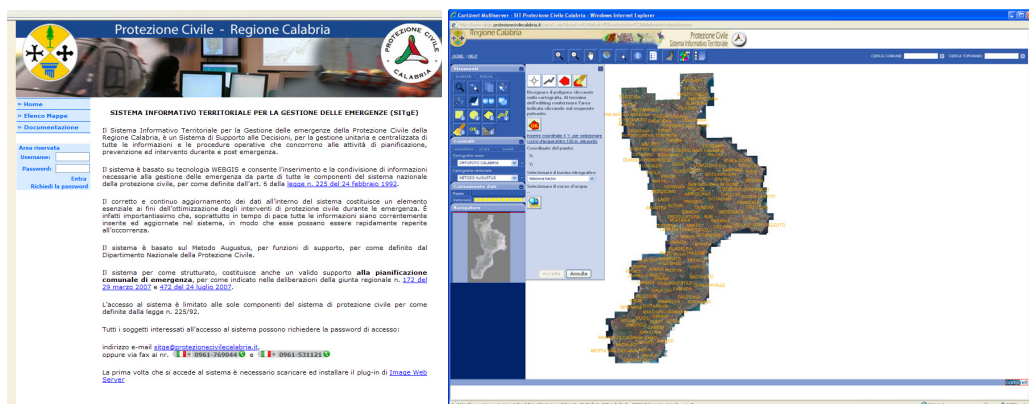


Figura 1 – Homepage del SITgE e del portale cartografico all'indirizzo www.sitge.protezionecivilecalabria.it

In Calabria, a partire dall'inizio del secolo scorso, e a più riprese, l'emergenza connessa con il dissesto idrogeologico è stata affrontata anche attraverso la massiccia realizzazione di interventi intensivi di sistemazione idraulica (briglie e muri di sponda) dei bacini idrografici. Tuttavia, a distanza di molti anni dalla loro realizzazione, a causa dell'assenza di qualsiasi strumento di monitoraggio di funzionalità, stato di conservazione ed effetti ambientali delle opere sul reticolo idrografico, non si dispone di dati non solo sulla reale consistenza del patrimonio sistematorio presente, ma anche sulla effettiva sua idoneità ad assolvere la funzione di presidio per la quale è stato realizzato. Una recente indagine condotta su un bacino campione (vedi il Rapporto dell'attività di ricerca svolta nell'ambito della collaborazione tra la il Settore di Protezione Civile della Regione Calabria e il Dipartimento STaFa dell'Università Mediterranea, 2010) ha evidenziato, ad esempio, come a distanza di meno di 10 anni il numero dei manufatti con fabbisogno di manutenzione sia aumentato considerevolmente (dal 20 al 35%).

D'altra parte, come sancito dalla normativa nazionale vigente in materia di difesa del suolo (L. 152/2006 che abroga la L. 183/89), la necessità di disporre di dati aggiornati e dettagliati su consistenza, stato di conservazione e funzionalità degli interventi di sistemazione idraulica, risulta propedeutica rispetto ad ogni azione di programmazione, pianificazione e attuazione degli interventi finalizzati alla stabilità idro-geomorfologica del territorio.

In tal senso, specifiche attività di ricerca in materia di sistemazione dei bacini idrografici in corso da oltre un decennio presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-forestali e Ambientali dell'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, hanno condotto un gruppo di ricercatori alla definizione di metodologie sia per la catastazione degli interventi di sistemazione idraulica, sia per la quantificazione degli effetti di lungo termine che tali interventi hanno indotto sul reticolo idrografico e sull'ecosistema ripale. L'applicazione e validazione delle suddette metodologie a diversi corsi d'acqua calabresi (AFOR, 1998) ha successivamente consentito l'implementazione di un SIT, denominato *Arch.I.M.E.DE. (ARCHivio territoriale inforMatizzato delle opEre idrauliche)* per l'archiviazione delle opere di sistemazione idraulica (Convenzione Protezione Civile) e degli effetti da esse indotti sul reticolo idrografico.

La opportunità di conseguire maggiori sinergia e coordinamento tra gli Enti che a vario titolo si occupano della gestione del territorio ha suggerito l'integrazione di *Arch.I.M.E.DE.* all'interno del *SITgE* al fine dotare il Settore della Protezione Civile della Regione Calabria di un utile strumento di supporto alle decisioni e alla pianificazione degli interventi sul territorio.

Gli esiti di questa integrazione vengono riportati nella presente memoria che si inserisce nell'ambito di una più ampia attività di studio e di ricerca di cui si è già in parte dato conto (Bombino *et al.*, 2009; Bombino *et al.*, 2010) e a cui questo ulteriore contributo garantisce continuità.

Metodologia e Primi Risultati

Sulla base delle acquisizioni già disponibili (Bombino *et al.*, 2009; Bombino *et al.*, 2010), a cui si rimanda per gli approfondimenti metodologici, sono state create ed implementate tre nuove schede all'interno del *Metodo Augustus* (strumento di riferimento per la pianificazione nel campo delle emergenze utilizzato dalla Protezione Civile in Italia).

La progettazione di queste schede è stata realizzata valorizzando le funzionalità di base già disponibili nel *SITgE* ed implementando le specifiche funzioni verticalizzate sull'ambito applicativo. Le tre tipologie di scheda sono state integrate con le informazioni cartografiche e alfanumeriche inerenti ai bacini e all'intero reticolo idrografico calabrese e sono predisposte per l'acquisizione di informazioni di carattere geografico. Le primitive geometriche poligonale, lineare e puntuale, ciascuna espressa da una simbologia integrata nella metodologia *Augustus*, sono state scelte per identificare rispettivamente i tronchi dei corsi d'acqua interessati dalla sistemazione, le opere longitudinali (es. argini) e le opere trasversali (es. briglie).

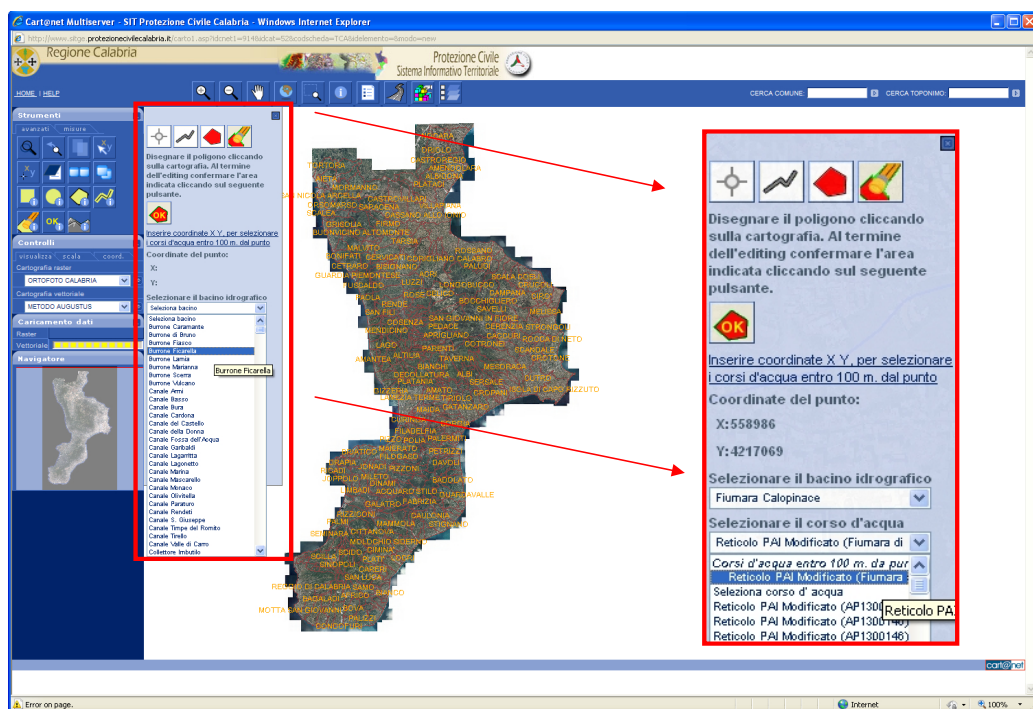


Figura 2 – Portale Cartografico SITgE integrato con Arch.I.M.E.DE: inserimento e ubicazione delle opere idrauliche; l'opzione “immissione dell'opera idraulica” è attivata direttamente sulla base cartografica prescelta selezionando dall'elenco il bacino idrografico e l'asta fluviale di riferimento dalla banca dati del Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) della Regione Calabria.

I tronchi di corso d'acqua e i manufatti presenti in alveo possono essere ubicati mediante diverse modalità: (i) sulla base cartografica fornita di default dal *WebGIS*; (ii) sulle cartografie di base eventualmente disponibili (IGM, Ortofoto, CTR); (iii) visualizzando direttamente il bacino idrografico e l'asta di riferimento (fig. 2); attraverso le coordinate GPS rilevate in campo (fig. 3). Ogni scheda è dotata di una componente alfanumerica per l'acquisizione di informazioni qualitative su tipologia, caratteristiche geometriche, stato di conservazione e funzionalità idraulica dei manufatti, fabbisogno di manutenzione e presenza di piste di accesso carrabili; è inoltre possibile allegare alla scheda eventuali documentazioni fotografiche e, quando disponibili, progettuali ed amministrative (fig. 4).

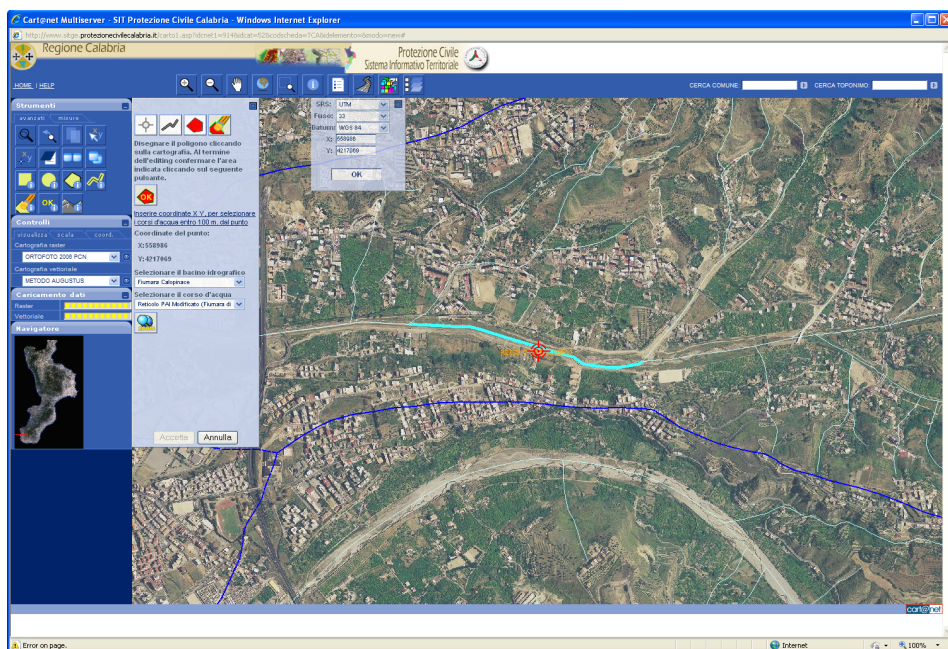


Figura 3 – Portale Cartografico SITgE integrato con Arch.I.M.E.DE: modalità di immissione del manufatto sulla base delle misure GPS rilevate in campo; il Sistema permette la scelta tra diversi sistemi di coordinate.

Ubicazione	
Coordinate X	358.897,3
Coordinate Y	4.217.108,9
Comune	Reggio di Calabria
Provincia	REGGIO DI CALABRIA
Denominazione del tratto idrografico	Fiumare Calopinece
Denominazione del corso d'acqua	Settolo PAI Modificato (Fiumare di Calopinece)

RIFERIMENTO CARTOGRAFICO IGR 1:20000	
Foglio	Quadrante
Orient.	Titolo

Dati Generali	
*Cod. Ident. Tronco/ Denominazione	TR_0000000000
Foglio	Sezione
Nome	Data di rilevazione

Caratteristiche	
Accessibilità	☐ pista carrabile
Lunghezza totale del tronco (m)	134
Pendenza media (%)	4
Altitudine dell'estremo di monte (m s.l.m.) h max	348
Altitudine dell'estremo di valle (m s.l.m.) h min	321
Alveo	☐ naturale

Figura 4 – Portale Cartografico SITgE integrato con Arch.I.M.E.DE: scheda tipo per la archiviazione dei dati relativi ai tronchi Idrografici.

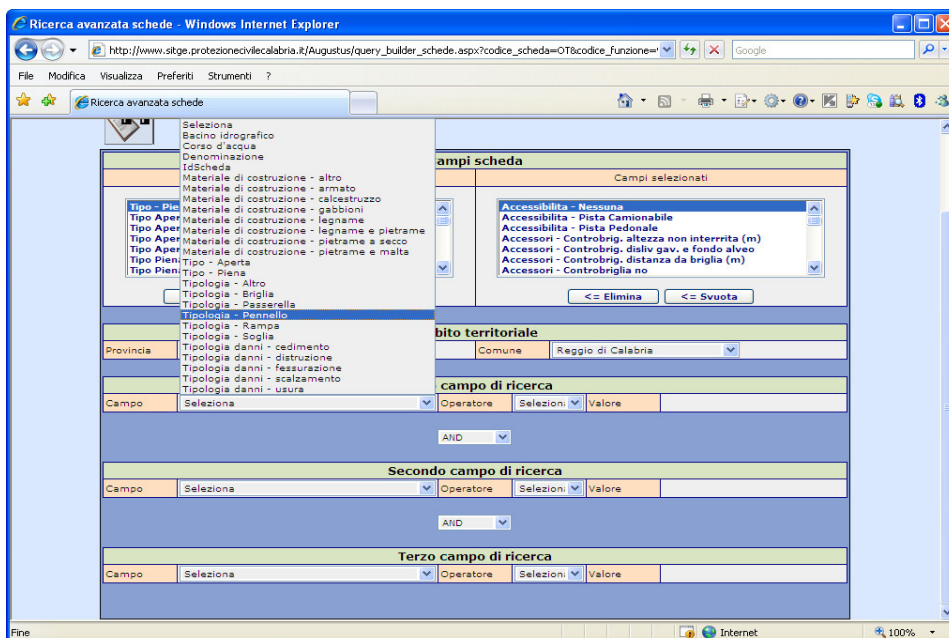


Figura. 5 – Portale Cartografico SITgE integrato con Arch.I.M.E.DE: pagina di ricerca delle schede sulle opere idrauliche; il Sistema consente di effettuare una interrogazione multipla sulla base delle informazioni precedentemente catalogate.

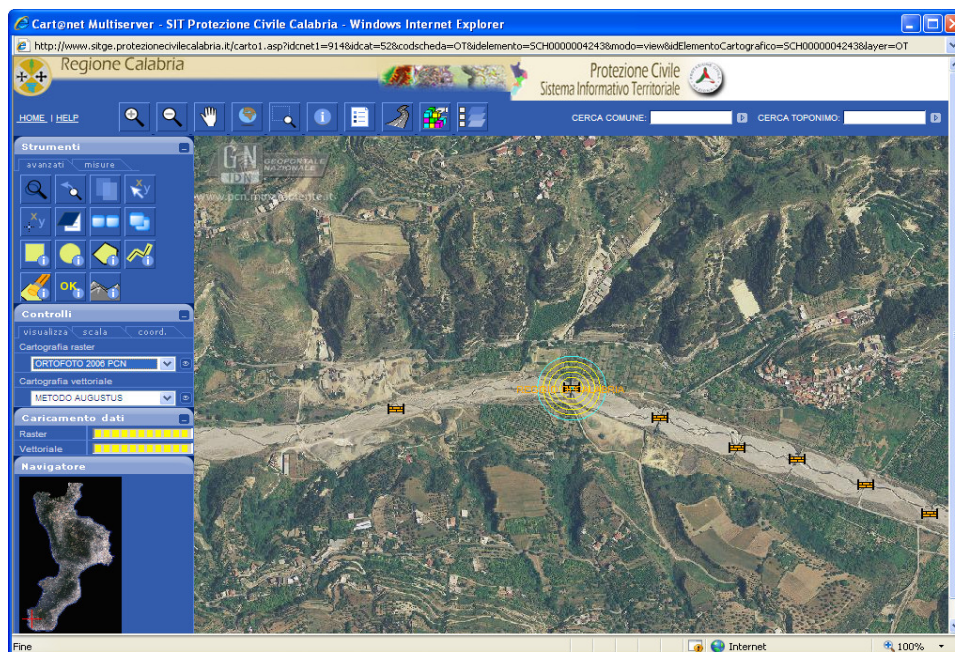


Figura 6 – Portale Cartografico SITgE integrato con Arch.I.M.E.DE: pagina di visualizzazione cartografica; il Sistema consente di identificare ed evidenziare l'opera di sistemazione idraulica e di sovrapporre tale informazione a dati di diversa natura.

Le due componenti geografica e alfanumerica “comunicano” efficacemente e consentono la contemporanea visualizzazione delle informazioni in esse contenute (fig. 5). Grazie al *SITgE* è inoltre possibile sovrapporre e integrare alle informazioni fornite da *Arch.I.M.E.DE.* ogni altro dato territoriale utile ad avere una più compiuta conoscenza dell’area di interesse e pianificare le attività preventive (es. manutenzioni di manufatti o ripristino della capacità idraulica di sezioni idriche o punti singolari) o emergenziali. I dati possono essere richiamati con interrogazioni predefinite che consentono di incrociare informazioni eterogenee (ad esempio, di carattere amministrativo e tecnico, o amministrativo e geografico), come evidenziato in fig. 6.

Conclusioni

L’integrazione dell’archivio informatizzato delle opere idrauliche “*Arch.I.M.E.DE.*” all’interno del SIT utilizzato dal Settore della protezione Civile della regione Calabria per la gestione delle Emergenze (*SITgE*), unitamente ad una più estesa e dettagliata conoscenza della consistenza, stato di conservazione e funzionalità del patrimonio di manufatti fluviali, potrebbe, nel quadro sin qui delineato, contribuire ad una più razionale definizione di specifici piani di interventi di manutenzione, supportare le attività di monitoraggio, prevenzione e mitigazione del dissesto idrogeologico nonché agevolare le sinergie con gli altri Enti territoriali deputati alla gestione e pianificazione dei bacini idrografici e del territorio. La gestione integrata di informazioni inerenti alle fenomenologie idrogeomorfologiche in atto all’interno dei bacini idrografici e alle trasformazioni e modificazioni antropiche cui sono soggetti può supportare le decisioni e la pianificazione di misure ed interventi finalizzati alla mitigazione del rischio idrogeologico e degli effetti ad esso connessi.

Gli autori hanno contribuito in egual misura all’impostazione ed allo svolgimento del lavoro.

Bibliografia

Protezione Civile Regione Calabria - Dipartimento della Presidenza 2010: Relazione dell’attività di ricerca “*Indagini inerenti gli interventi di sistemazione dei corsi d’acqua e implementazione di un archivio informatizzato delle opere idrauliche*”, svolta nell’ambito della Convenzione stipulata con il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-forestali e Ambientali (*DiSTaFA*) dell’Università Mediterranea di Reggio Calabria.

Bombino G., Denisi P., Fortugno D., La Fauci A., Manti F., Tamburino V., Zimbone S.M., 2010. *Utilizzo dei sistemi informativi territoriali per il monitoraggio della funzionalità ecologica dei corsi d’acqua sistemati: un esempio applicativo in Calabria*. Atti 14^a Conferenza Nazionale ASITA, 9 – 12 novembre 2010, Brescia.

Bombino G., Manti F., Tamburino V., Zimbone S.M., 2009. *Un archivio informatizzato delle opere di sistemazione idraulica in Calabria*. Atti 13^a Conferenza Nazionale ASITA, 1 – 4 dicembre 2009, Bari.

Azienda Forestale della Regione Calabria (A.Fo.R.) 1998: Relazione dell’attività di ricerca su *Le opere di sistemazione idraulico-forestali e la formazione del relativo catasto*, svolta nell’ambito della convenzione stipulata con il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroforestali e Ambientali (ex istituto di Genio Rurale) dell’Università Mediterranea di Reggio Calabria

L'impatto dei sensori SAR di seconda generazione nell'analisi delle deformazioni del suolo con serie temporali DInSAR: il caso di COSMO-SkyMed

Manuela Bonano (*,**), Francesco Casu (*), Riccardo Lanari (*), Michele Manunta (*),
Luca Paglia (*), Eugenio Sansosti (*), Giuseppe Solaro (*)

(*) Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, Consiglio Nazionale delle Ricerche, via Diocleziano 328
80124 Napoli, Italy, e-mail: {bonano.m, casu.f, lanari.r, manunta.m, paglia.l, sansosti.e, solaro.g@irea.cnr.it}

(**) Sapienza Università di Roma, 00185 Roma, Italy

Riassunto

L'interferometria SAR differenziale (DInSAR) è una tecnica di telerilevamento che consente di misurare gli spostamenti del suolo con accuratezze centimetriche, e in alcuni casi anche millimetriche, sfruttando la differenza di fase fra due immagini SAR acquisite sulla stessa area. L'applicazione della tecnica DInSAR a numerosi casi di studio è stata possibile grazie alla disponibilità del grande archivio di dati SAR acquisito, durante gli ultimi 20 anni, dai sensori SAR di "prima generazione" (ERS, ENVISAT, ALOS, RADARSAT-1), caratterizzati da un tempo di rivisitazione di circa un mese e da risoluzioni spaziali che vanno da qualche metro alla decina di metri. Sulla base di questa esperienza, una "seconda generazione" di sensori SAR, caratterizzati da risoluzioni spaziali dell'ordine del metro e da tempi di rivisitazione di circa una settimana, è stata messa in orbita (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed, RADARSAT-2), o lo sarà nell'immediato futuro (Sentinel, ALOS-2). Questo lavoro è focalizzato sui nuovi scenari applicativi della tecnica DInSAR aperti dai sistemi SAR di seconda generazione nell'ambito della ricerca geofisica e della gestione del rischio ambientale. Per la nostra analisi ci siamo concentrati sull'utilizzo dell'algoritmo DInSAR avanzato Small BASeline Subset (SBAS) che è stato applicato a 6 dataset acquisiti tra il 1992 e il 2011 sulle aree dell'Etna e del golfo di Napoli, interessate da fenomeni deformativi a scala regionale e locale di origine naturale e antropica.

Abstract

Differential SAR Interferometry (DInSAR) is a remote sensing technique that allows us to measure ground displacements with centimetre to millimetre accuracy, exploiting the phase differences between two SAR images acquired over the same area. The availability of a huge SAR data archive acquired during the last 20 years by the "first generation" SAR systems (ERS, ENVISAT, ALOS, RADARSAT-1) allowed the application of the DInSAR technique to several case studies. These SAR systems are characterized by revisit time of about one month and spatial resolution of about ten meters. More recently a second generation SAR systems (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed, RADARSAT-2, ALOS-2, Sentinel), characterized by revisit time of about one week and spatial resolutions of a few meters, have been developed. This work is focused on new DInSAR application scenarios opened by the second generation SAR systems in the fields of geophysics and environmental risk management. The presented analysis has been carried out by applying the advanced DInSAR technique referred to as Small BASeline Subset (SBAS) to 6 SAR dataset acquired between 1992 and 2011 over the Mt. Etna volcano and Napoli Bay areas, characterized by several complex deformation phenomena, both natural and anthropogenic.

1. Introduzione

L'interferometria SAR differenziale (DInSAR) è una tecnica di telerilevamento che consente di misurare gli spostamenti del suolo con accuratezze dell'ordine dei centimetri, e in alcuni casi anche dei millimetri, sfruttando la differenza di fase (interferogramma) fra due immagini SAR acquisite sulla stessa area (Gabriel et al., 1989). Le capacità della tecnica DInSAR standard di analizzare gli effetti superficiali prodotti da singoli eventi deformativi, quali terremoti, è stata ampiamente dimostrata (Massonnet et al., 1993) e l'interesse della comunità scientifica si è andato successivamente focalizzando sulle potenzialità offerte dagli approcci interferometrici avanzati in grado di produrre anche serie storiche di deformazione e, quindi, di seguire l'evoluzione temporale dei fenomeni oggetto di studio.

Nell'ultimo decennio, infatti, sono state sviluppate tecniche DInSAR avanzate che permettono di generare serie storiche di deformazione e mappe di velocità al fine di seguire l'evoluzione temporale degli spostamenti del suolo con accuratezze nell'ordine dei 5-10 millimetri. L'applicazione di queste tecniche a svariati casi di studio è stata possibile grazie alla disponibilità del grande archivio di dati SAR acquisito, durante gli ultimi 20 anni, dai sensori SAR di "prima generazione" (ERS, ENVISAT, ALOS, RADARSAT-1), i quali sono caratterizzati da un tempo di rivisitazione di circa un mese e da risoluzioni spaziali che vanno da qualche metro alla decina di metri.

Sulla base di questa esperienza, una "seconda generazione" di sensori SAR, caratterizzati da risoluzioni spaziali dell'ordine del metro e da tempi di rivisitazione di circa una settimana, è già stata posta in orbita (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed, RADARSAT-2), o lo sarà nell'immediato futuro (Sentinel, ALOS-2).

Grazie ai ridotti tempi di rivisitazione, questa nuova generazione di sistemi SAR consente di passare da analisi in tempo differito, come nel caso dei sensori di vecchia generazione per via della cadenza mensile delle acquisizioni, al monitoraggio in tempo quasi reale dei fenomeni deformativi d'interesse. Infatti, sfruttando al massimo i pochi giorni di rivisitazione dei nuovi sistemi SAR, è possibile collezionare un numero elevato di immagini in un tempo ridotto e seguire l'andamento temporale di fenomeni deformativi, anche molto veloci e che si esauriscono nel giro di pochi giorni, mentre sono ancora in atto. Tale caratteristica fa dei sensori di seconda generazione uno strumento importante per il monitoraggio ambientale e la gestione del rischio in scenari di emergenza, quali quelli associati ad eventi sismici, frane ed eruzioni vulcaniche.

Questo lavoro è focalizzato sui nuovi scenari applicativi della tecnica DInSAR aperti dai sistemi SAR di seconda generazione nell'ambito della gestione del rischio ambientale. Per la nostra analisi ci siamo concentrati sull'utilizzo dell'algoritmo DInSAR avanzato denominato Small Baseline Subset (SBAS) (Berardino et al., 2002) che si basa sull'utilizzo di interferogrammi generati a partire da dati SAR acquisiti da posizioni orbitali vicine (piccole *baseline* spaziali) e con brevi tempi di rivisitazione, al fine di minimizzare gli effetti di rumore (decorrelazione) e di massimizzare il numero di punti per i quali è possibile ottenere misure affidabili di deformazione. L'approccio SBAS, inoltre, consente di eseguire analisi multi-scala (Lanari et al., 2004) producendo mappe di velocità di deformazione e le corrispondenti serie storiche a scala sia regionale (con risoluzioni spaziali nell'ordine delle decine di metri) sia locale (alla massima risoluzione spaziale del sensore), con rilevanti implicazioni nel campo della geotecnica e del monitoraggio di aree urbane.

Al fine di valutare al meglio le potenzialità offerte dai sistemi SAR di nuova e vecchia generazione, nel seguito sono presentati i risultati ottenuti elaborando con la tecnica SBAS-DInSAR 6 dataset acquisiti da differenti sensori tra il 1992 e il 2011 sulle aree dell'Etna e del golfo di Napoli, interessate da fenomeni deformativi a scala regionale e locale di origine naturale e antropica.

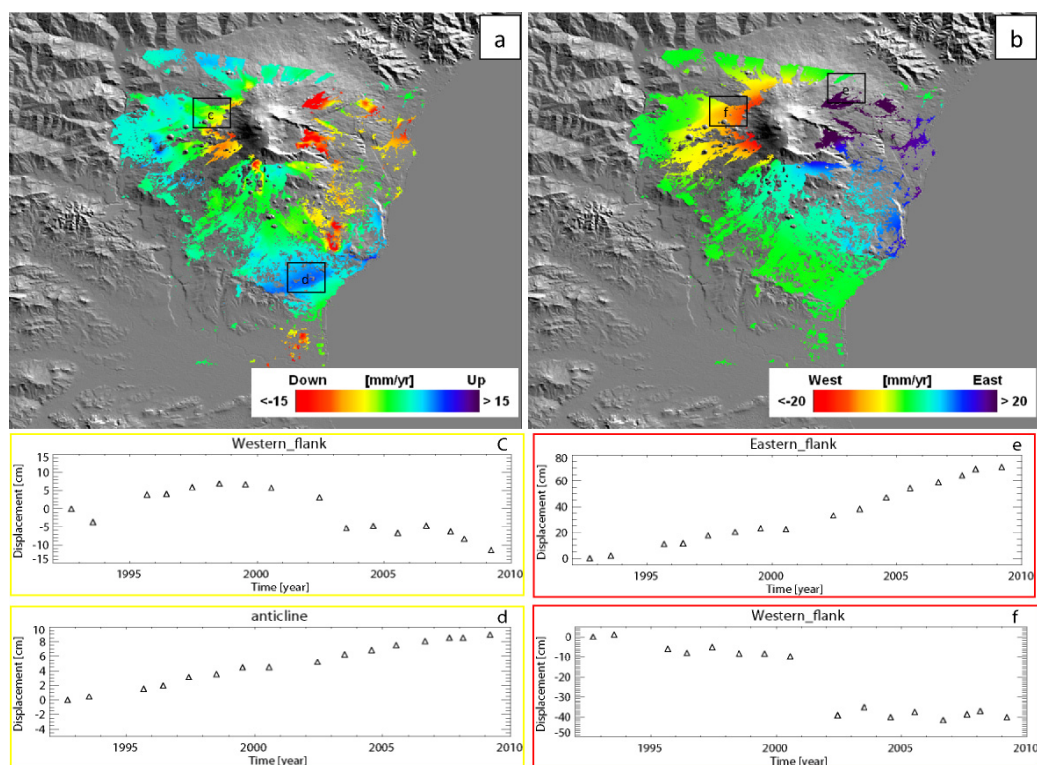


Figura 1 – Mappe della velocità media di deformazione della componente verticale (a) ed est-ovest (b) ottenute dai dati ERS ed ENVISAT relative all'intervallo temporale 1992-2009 e sovrapposte al modello digitale del terreno dell'area esaminata. (c-d) Serie temporale della deformazione verticale dei punti evidenziati con 'c' e 'd' in figura 1a. (e-f) Serie temporale della deformazione est-ovest dei punti evidenziati con 'e' ed 'f' in figura 1b. (tratto da Solaro et al., 2010).

2. L'algoritmo SBAS-DInSAR: dalla prima alla seconda generazione di sensori.

L'elevata disponibilità di dati SAR satellitari e la complessità e varietà dei fenomeni deformativi in atto, senza dimenticare l'interesse scientifico e sociale che queste zone rivestono, ha portato ad individuare come aree di test l'Etna e il golfo di Napoli. In particolare, nel caso dell'Etna sono stati utilizzati 2 dataset ERS-ENVISAT ed uno Cosmo-SkyMed, mentre nel caso del golfo di Napoli, si sono confrontati i risultati ottenuti elaborando un dataset ENVISAT, uno RADARSAT-1 ed uno Cosmo-SkyMed

2a. Etna

Vista l'estensione dell'edificio vulcanico e la tipologia delle deformazioni superficiali in atto, l'Etna è stato studiato applicando la tecnica SBAS-DInSAR a scala regionale. Per quanto riguarda l'analisi con i sensori di vecchia generazione, sono stati sfruttati due dataset ERS-ENVISAT: il primo composto da 88 immagini ERS e 44 ENVISAT acquisite da orbita discendente (Track: 222, Frame: 2853), tra il 1992 e il 2010; il secondo formato da 94 immagini ERS e 53 ENVISAT acquisite da orbita ascendente nell'intervallo temporale 1992-2009. Sono stati generati 387 e 401

interferogrammi differenziali, rispettivamente per il dataset discendente e ascendente, con una dimensione del pixel a terra di circa 100 m x 100 m.

Per entrambe le orbite è stata generata la mappa della velocità media di deformazione e le relative serie storiche proiettate lungo la linea di vista del sensore (LOS). Inoltre, beneficiando della disponibilità di due diverse orbite di acquisizione, sono state stimate le componenti di spostamento verticale ed orizzontale (est-ovest), le cui mappe di velocità media relative al periodo 1992-2009 sono mostrate rispettivamente in figura 1a e 1b.

La stima delle componenti verticale ed orizzontale è stata eseguita anche per le serie storiche di deformazione, mediando opportunamente i dati ascendenti e discendenti su base annuale al fine di riportarli su un passo temporale comune. Alcuni esempi delle serie storiche ottenute sono mostrati nelle figure 1c-f, dove è possibile osservare il complesso campo di deformazione che caratterizza l'edificio vulcanico dell'Etna. In particolare, si può notare come lo spostamento verticale del fianco ovest sia caratterizzato da una fase di sollevamento negli anni '90, seguita da un effetto di

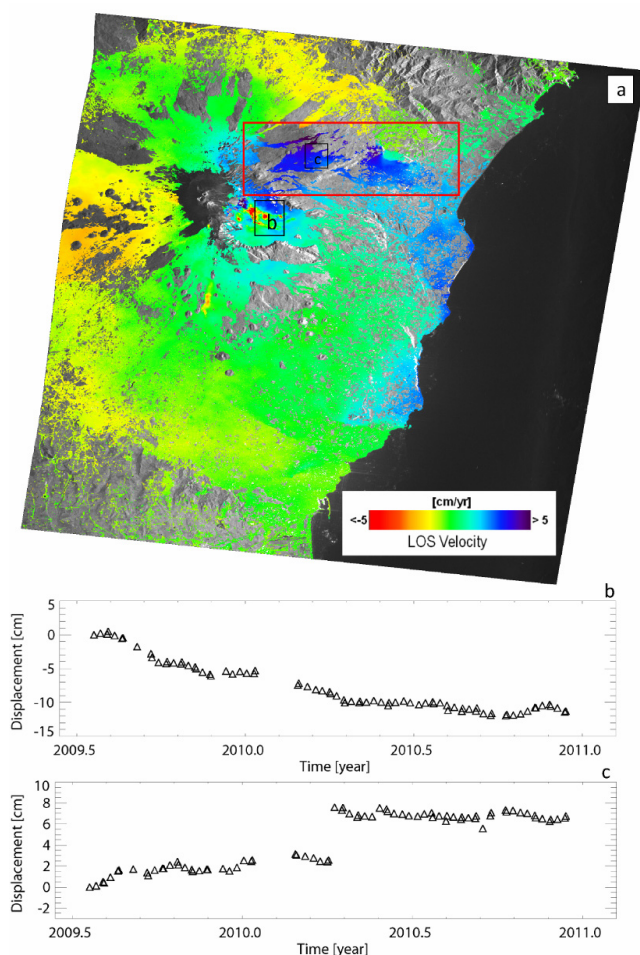


Figura 2 – (a) Mappa della velocità media di deformazione ottenuta dai dati Cosmo-SkyMed relative all'intervallo temporale 2009-2010. (b-c) Serie storiche di deformazione di due punti scelti in corrispondenza dell'edificio vulcanico. Il riquadro rosso indica l'area rappresentata nelle Figure 3a e 3b.

deflazione correlato agli eventi sismici ed eruttivi del 2001 e del 2002-2003 (figura 2c). Viceversa, l'anticlinale alla base dell'edificio vulcanico mostra un sollevamento costante per tutto il periodo di osservazione (figura 2d).

Per quanto riguarda le componenti orizzontali di deformazione rilevate sui fianchi est ed ovest, esse presentano significativi spostamenti rispettivamente verso oriente ed occidente (figure 2e e 2f).

Oltre ai dataset ERS ed ENVISAT appena presentati, sono state analizzate 78 immagini SAR acquisite da orbita discendente dalla costellazione Cosmo-SkyMed nell'intervallo temporale Luglio 2009-Dicembre 2010. In questo caso, sono stati generati 232 interferogrammi differenziali con dimensione del pixel di circa 25 m x 25 m. In figura 2a viene mostrata la mappa della velocità media di deformazione sovrapposta ad un'immagine di ampiezza dell'area. Si osserva uno spostamento, limitato a Nord dalla faglia della Pernicana (riquadro rosso in fig. 2a), del fianco est che risulta in avvicinamento al sensore. Il fianco ovest, viceversa, presenta uno spostamento in direzione opposta rispetto al fianco est. Infine, si nota una subsidenza locale riconducibile a fenomeni di compattazione dei flussi lavici all'interno della Valle del Bove e sul fianco sud. Vengono mostrate come esempio due serie storiche di spostamento relative a due punti localizzati nella Valle del Bove (figura 2b) e lungo la faglia della Pernicana (figura 2c).

Per comprendere meglio le potenzialità offerte dai sensori di nuova generazione, è stato effettuato un confronto qualitativo tra i risultati Cosmo-SkyMed ed ENVISAT in termini di copertura spaziale e campionamento temporale delle misure ottenute. In particolare, le figure 3a e 3b mostrano le mappe delle velocità medie di deformazione relative ai dati discendenti Cosmo-SkyMed ed ENVISAT in corrispondenza di una porzione del fianco NE (evidenziato da un riquadro rosso in

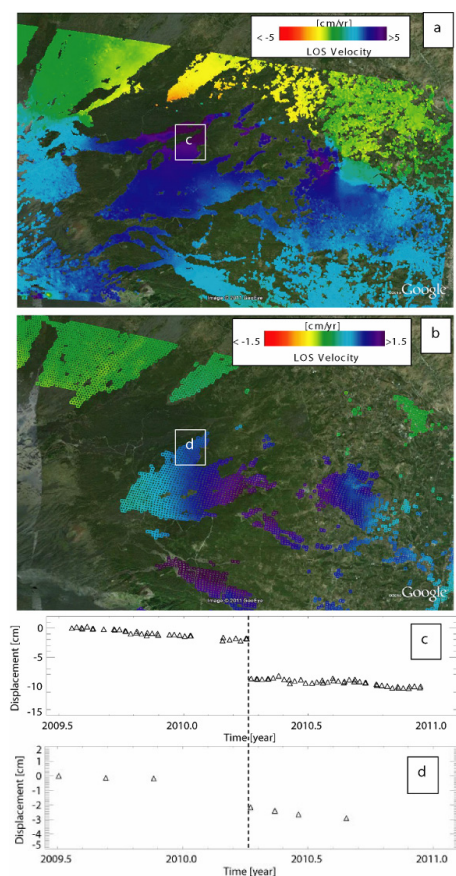


Figura 3 – Confronto tra i dati Cosmo-SkyMed ed ENVISAT (a) Mappa della velocità media di deformazione relativa all'area evidenziata dal riquadro rosso in figura 2a ottenuta dai dati Cosmo-SkyMed. (b) Mappa della velocità media di deformazione relativa all'area evidenziata dal riquadro rosso in figura 2a ottenuta dai dati ENVISAT. (c) Serie storica di deformazione ottenuta dai dati Cosmo-SkyMed dell'area in corrispondenza della Pernicana indicata con 'c' in figura 3a. (d) Serie storica di deformazione ottenuta dai dati ENVISAT dell'area in corrispondenza della Pernicana indicata con 'd' in figura 3b. La linea tratteggiata indica l'evento sismico di magnitudo $M=3.6$ del 03 dell'Aprile 2010 in corrispondenza della Pernicana.

fig. 2a). E' evidente l'aumento del numero dei pixel coerenti rilevati passando dai sensori di vecchia generazione (ENVISAT) a quelli di nuova generazione (Cosmo-SkyMed). Per quanto concerne il confronto tra i campionamenti temporali, le figure 3c e 3d mostrano due serie storiche, una Cosmo-SkyMed ed una ENVISAT, relative all'area della Pernicana (la serie storica ENVISAT è stata limitata all'intervallo temporale 2009-2010 per renderla confrontabile con quella Cosmo-SkyMed). Questo semplice esempio mostra come nel caso del sensore Cosmo-SkyMed sia possibile osservare chiaramente, a differenza di quanto accade per ENVISAT, anche deformazioni repentine non rilevabili senza un adeguato campionamento temporale; in particolare, si può notare come sia ben evidente il salto sulla serie storica Cosmo-SkyMed associato all'evento sismico del 3 Aprile 2010, altrimenti non misurabile tramite i 35 giorni di rivisitazione del sensore ENVISAT (figure 3c e 3d).

2b. Golfo di Napoli

Un'altra area test in cui sono state confrontate le caratteristiche dei sensori di prima e seconda generazione è il golfo di Napoli. Sfruttando l'approccio SBAS-DInSAR questa volta a scala locale, sono stati elaborati tre dataset SAR: il primo è costituito da 39 immagini ENVISAT, acquisite tra il 2003 e il 2007; il secondo da 47 immagini RADARSAT-1 acquisite tra il 2003 e il 2007; il terzo da 81 immagini Cosmo-SkyMed acquisite tra Luglio 2009 e Dicembre 2010.

La prima differenza evidente tra i tre sistemi analizzati è la diversa risoluzione spaziale. In Figura 4 sono mostrati gli effetti dell'aumento della risoluzione nel passaggio dai 20 metri dei sistemi ERS ed ENVISAT (figura 4a) ai 7 metri di RADARSAT-1 (figura 4b), fino a raggiungere i 3 metri della costellazione Cosmo-SkyMed (figura 4c). È chiaro come l'aumento di risoluzione spaziale consenta di avere un maggiore dettaglio, caratteristica strategica nelle analisi di fenomeni deformativi molto localizzati e velocemente variabili nello spazio.

Questa caratteristica è ulteriormente evidenziata in figura 5, dove è mostrata la mappa di velocità di deformazione ricavata dai dati Cosmo-SkyMed e relativa ad un tratto autostradale in prossimità della città di Napoli. Come si può notare, i punti coerenti si dispongono accuratamente lungo i target retro-diffondenti presenti nella scena, come le barriere di contenimento (guardrail) dell'autostrada, consentendo un'analisi puntuale ed accurata delle deformazioni a carico delle singole strutture.

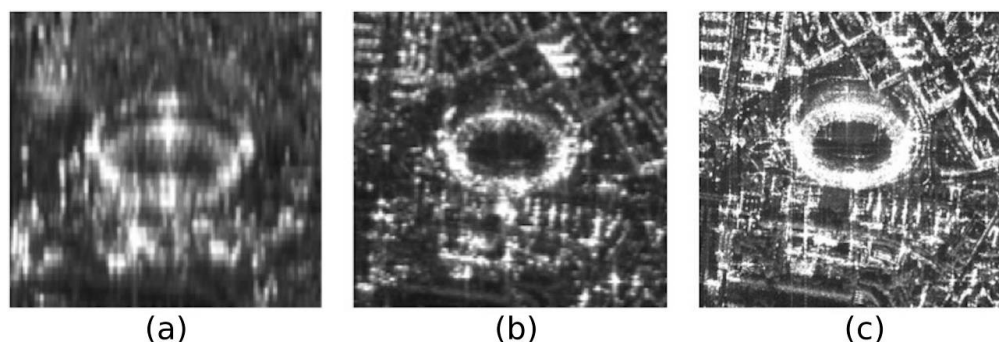


Figura 4 – Immagini SAR dello Stadio San Paolo di Napoli: (a) ERS-ENVISAT, circa 20 m di risoluzione spaziale in ground range; (b) RadarSAT-1, circa 7 m di risoluzione spaziale; (c) Cosmo-SkyMed, circa 3 m di risoluzione spaziale.



Figura 5 – Mappa di velocità di deformazione ricavata dai dati Cosmo-SkyMed, sovrapposta a un'immagine ottica della zona, relativa a un tratto autostradale in prossimità della città di Napoli. I punti coerenti seguono perfettamente i contorni delle strutture presenti e del tracciato autostradale.

L'aumento della risoluzione spaziale ha effetto anche sull'informazione di deformazione che può essere estratta dalle singole strutture. In particolare, in figura 6 sono mostrate le mappe di velocità di spostamento, sovrapposte ad un'immagine ottica della scena, relative all'area della stazione ferroviaria della città di Napoli, ottenute applicando la tecnica SBAS-DInSAR ai tre diversi dataset SAR disponibili. Le figure 6a e 6b sono relative, rispettivamente, ai dataset ENVISAT e RADARSAT-1 acquisiti entrambi nel periodo 2003-2007; la figura 6c è relativa al dataset Cosmo-SkyMED, acquisito nel periodo Luglio 2009 - Dicembre 2010.

Le figure 6a e 6b riguardano il medesimo intervallo temporale ed evidenziano identici pattern deformativi legati agli scavi della nuova linea metropolitana, realizzati intorno al 2005. La principale differenza è legata al maggior numero di punti coerenti individuati nell'analisi RADARSAT-1 (figura 6 b) ed è dovuta all'aumento di risoluzione spaziale rispetto al caso del dataset ENVISAT (Figura 6a). Nonostante ciò, il passaggio dal sensore ENVISAT al sensore RADARSAT-1 non modifica lo scenario applicativo, poiché entrambi i satelliti acquisiscono con un tempo di rivisitazione di circa un mese. Tale caratteristica non consente di utilizzare efficacemente questi sensori per il monitoraggio in tempo quasi reale di fenomeni deformativi noti. Il discorso cambia per la costellazione Cosmo- SkyMed che può acquisire immagini SAR ogni 4 giorni.

Dall'analisi di figura 6c, si può notare come sia stato possibile ricavare l'informazione di spostamento quasi per ogni struttura presente nell'area esaminata; tale risultato è stato ottenuto grazie alla ridotta baseline temporale con cui è stato acquisito il dataset, che ha limitato fortemente il rumore legato alla decorrelazione temporale.

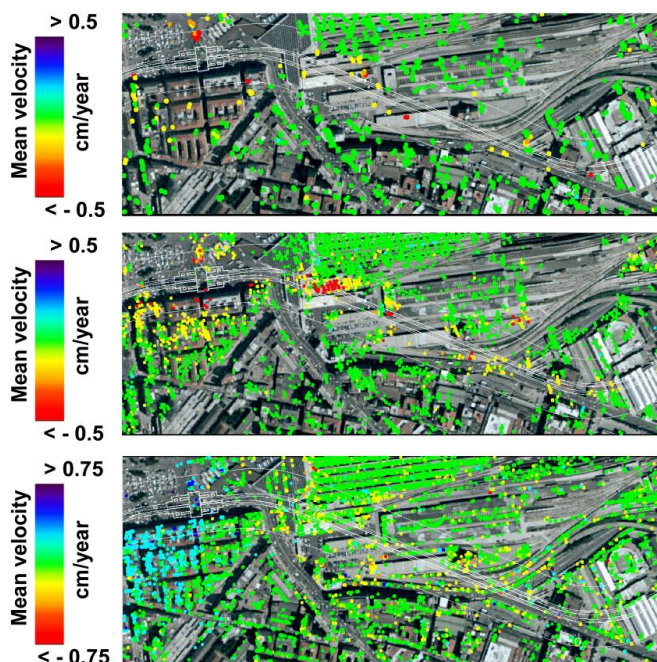


Figura 6 – Confronto tra le mappe di velocità ENVISAT (a), RADARSAT-1 (b) e Cosmo-SkyMed (c). Alle mappe di velocità è sovrapposto il tracciato della metropolitana di Napoli (linee di colore bianco).

A causa della differente copertura temporale del dataset Cosmo-SkyMed rispetto a quelli ENVISAT e RADARSAT-1, non sono visibili gli effetti degli scavi sotterranei effettuati intorno al 2005. È, tuttavia, ben visibile un generale sollevamento in corrispondenza della zona a sinistra di figura 6c, che è anche quella maggiormente interessata dagli abbassamenti legati agli scavi (figure 6a e 6b). Tale fenomeno è probabilmente dovuto a un'azione di consolidamento effettuata al termine degli scavi della galleria metropolitana.

3. Conclusioni

In questo lavoro è stata eseguita un'analisi comparata della tecnica SBAS-DInSAR applicata a sensori di vecchia e nuova generazione in due aree di studio diverse. La prima area è relativa al vulcano Etna ed è stata analizzata elaborando tre dataset SAR acquisiti dai sensori ERS/ENVISAT e Cosmo-SkyMed tramite l'approccio SBAS-DInSAR a scala regionale. Nella seconda area, relativa al golfo di Napoli, sono stati elaborati alla scala locale tre dataset SAR acquisiti dai sensori ENVISAT, RADARSAT-1 e Cosmo-SkyMed.

I risultati ottenuti, sebbene preliminari, mostrano come le caratteristiche dei sensori di nuova generazione (elevata risoluzione spaziale e brevi tempi di rivisitazione) consentano di utilizzare le tecniche DInSAR, e in particolare l'approccio SBAS, nell'analisi e nel monitoraggio di quei fenomeni deformativi molto localizzati e altamente variabili spazialmente, come eventi sismici, e deformazioni a carico di singole infrastrutture.

Inoltre, i ridotti tempi di rivisitazione permettono, in linea teorica, di monitorare i fenomeni deformativi non solo per periodi lunghi (diversi anni) ma anche per periodi brevi (alcuni mesi), cosa

completamente preclusa ai sensori di vecchia generazione. L'elevata frequenza temporale nell'acquisizione delle immagini consente di analizzare e monitorare anche eventi deformativi veloci, come terremoti, eruzioni e frane, i cui effetti si esauriscono nel giro di pochi mesi o poche settimane.

Bibliografia

- Berardino, P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. (2002), "A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 11: 2375-2383.
- Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A. (1989), "Mapping small elevation changes over large areas: Differential Interferometry", *J. Geophys. Res.*, 94: 9183-9191.
- Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorqui J.J., Berardino P., Sansosti E. (2004), "A small baseline approach for investigating deformations on full resolution differential SAR interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42: 1377-1386.
- Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaute T. (1993), "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry", *Nature* 364 138-142.
- Solaro G., Acocella V., Pepe S., Ruch J., Neri M., Sansosti E., (2010) "Anatomy of an unstable volcano from InSAR: Multiple processes affecting flank instability at Mt. Etna, 1994-2008", *J. Geophys. Res.*, VOL. 115, B10405.:10.1029/2009JB000820.

Comportamenti d'impresa nella provincia di Cuneo: un'analisi delle relazioni territoriali, delle dinamiche produttive e delle modalità di ricerca[§]

Piero Bonavero (*), Vincenzo Demetrio (**), Paola Guerreschi (***)

(*) Politecnico e Università di Torino, Dipartimento Interateneo Territorio, viale Mattioli 39, 10125 Torino
Tel. 011-0907445, Fax 011-0907499, piero.bonavero@unito.it

(**) demetrio@econ.unito.it

(***) Politecnico e Università di Torino, Dipartimento Interateneo Territorio, viale Mattioli 39, 10125 Torino
Tel. 011-0907481, Fax 011-0907451, paola.guerreschi@unito.it

Riassunto

Il contributo proposto ha il duplice obiettivo di valutare l'intensità delle relazioni interaziendali all'interno della provincia di Cuneo e di comprendere come queste influenzino le performance d'impresa. A questo scopo è stata utilizzata una combinazione di analisi statistica e spaziale al fine di correggere il dato della singola impresa per tenere conto dell'influenza esercitata dal contesto territoriale di appartenenza.

Abstract

The proposed work has twofold aim of assessing the intensity of inter-firm linkages within Cuneo province and understanding how these linkages affect firms performance. To reach this goal a combination of statistical and spatial analysis has been used in order to correct individual firms data with the influence of the local context.

1. Introduzione

Questo contributo si propone di valutare, nella provincia di Cuneo, le caratteristiche (forza, numerosità, ecc.) di alcuni dei legami chiave per la competitività delle imprese.

L'assenza di adeguati indicatori atti a descrivere il comportamento di questo tipo di variabili, infatti, non permette di avere una chiara idea di come le imprese della provincia interagiscano tra di loro e con altri sistemi locali in termini di relazioni consolidate, input, output, ricerca, ecc. Eppure la comprensione di tali dinamiche è certamente la chiave di volta per una corretta interpretazione delle traiettorie evolutive delle imprese, dato che queste sono spesso il risultato della combinazione di una molteplicità di fattori e percorsi differenti, in particolare per quanto concerne la scala e la numerosità delle relazioni competitive, nonché la stabilità delle stesse.

Se ogni realtà provinciale può essere considerata come un insieme di sistemi diversi per i quali le relazioni hanno valori e utilità differenti, non può essere sufficiente possedere informazioni generiche relative al sistema nel suo complesso, ma occorre operare un mutamento di prospettiva che consenta di comprendere la diversa natura e il diverso peso delle relazioni all'interno dei sub-sistemi che compongono il contesto provinciale e che spesso non trovano in esso adeguati confini.

2. Costruzione dell'universo e del campione di imprese

L'universo di riferimento dell'indagine sul sistema produttivo della Provincia di Cuneo è stato costruito partendo dai dati dell'VIII censimento delle industrie e dei servizi del 2001.

[§] Il presente lavoro è frutto della riflessione comune ai tre autori: tuttavia, la stesura dei paragrafi 1 e 5 si deve a Piero Bonavero, quella del paragrafo 2 a Vincenzo Demetrio e quella dei paragrafi 3 e 4 a Paola Guerreschi.

Dagli archivi ISTAT sono state estratte le unità locali manifatturiere operanti in provincia: da questo primo insieme, sono state escluse tutte le unità locali caratterizzate da un numero di addetti inferiore alle 3 unità¹. Il risultato è un insieme di 2.417 stabilimenti produttivi che rappresenta il riferimento dal quale partire per la selezione del campione da analizzare.

Nella costruzione del campione invece abbiamo realizzato una stratificazione dell'universo che rispettasse i criteri di esaustività e mutua esclusività utilizzando il codice ATECO dell'attività principale svolta da ciascuna unità locale, successivamente ricomposti in 8 ambiti produttivi.

Gli *ambiti produttivi* sono costruiti come aggregazioni di attività economiche che insistono su specifiche competenze di base che caratterizzano l'intero sistema regionale e che si declinano localmente in forme produttive specifiche. In particolare, gli ambiti produttivi identificati sono i seguenti:

1. *abitare*, riconducibile alle attività connesse con l'edilizia, l'arredamento e le costruzioni in generale. Si tratta di un insieme eterogeneo di attività che vanno dalla lavorazione dei minerali non metalliferi (ad es. la fabbricazione di piastrelle), alla siderurgia (come la produzione di radiatori per riscaldamento), all'elettronica (elettrodomestici), alla lavorazione del legno (tra gli altri, la fabbricazione di mobili);
2. *agro-alimentare*, in cui sono incluse le attività delle industrie alimentari e delle bevande;
3. *beni strumentali*, comprendente tutte le attività di produzione di beni destinati durevolmente all'esercizio dell'attività produttiva delle imprese;
4. *elettrotecnica*, in cui sono state inserite le attività produttive legate all'elettronica di base, alla fabbricazione di apparecchi di controllo e misurazione e le attività terziarie connesse all'informatica;
5. *materiali e lavorazioni*, costituito da attività produttive legate alla chimica, alla gomma e plastica, alla lavorazione di minerali metalliferi e non, alle industrie del legno e della carta, nonché dalla lavorazione e trattamento dei combustibili;
6. *media e comunicazione*, di cui fanno parte le attività di fabbricazione di strumenti per le telecomunicazioni, le imprese del terziario operanti nel campo della comunicazione d'impresa e della gestione dei servizi di telefonia; a queste sono state aggiunte le imprese operanti nel campo dell'editoria e della stampa, anche in fasce di mercato innovative come la realizzazione dei contenuti digitali;
7. *mezzi di trasporto*, che racchiude le attività legate all'automotive, alla produzione di cicli e motocicli, alle costruzioni navali e ferroviarie e alla loro sub-fornitura (elettronica, meccanoplastica, ecc.);
8. *moda accessori, arti grafiche*, in cui rientra un ampio spettro di attività che vanno dalle industrie tessili e dell'abbigliamento al trattamento delle pelli (concia, fabbricazione prodotti in cuoio e pelle), dall'oreficeria agli strumenti musicali, dagli articoli sportivi al materiale per disegno/scrittura.

È evidente come nella costruzione degli ambiti produttivi non si sia potuto prescindere da un certo margine di soggettività legato in particolare ai criteri di assegnazione delle attività. Nondimeno riteniamo che ciò non riduca la significatività delle indicazioni delle statistiche costruite.

¹ Questa scelta è riconducibile alla volontà di non considerare le forme di auto-impiego, rappresentanza e di presidio commerciale, ma soltanto le attività meramente produttive.

Strati	Campionamento		Universo		Differenze nel peso degli ambiti produttivi
	Numerosità	Frequenza relativa	Numerosità	Frequenza relativa	
Abitare	38	17,4	505	20,9	-3,5
Agroalimentare	29	13,2	477	19,7	-6,5
Beni strumentali	38	17,4	293	12,1	5,3
Elettrotecnica	4	1,8	91	3,8	-2,0
Materiali e lavorazioni	70	32,0	637	26,4	5,6
Media e Comunicazione	12	5,5	144	6	-0,5
Mezzi di trasporto	14	6,4	84	3,5	2,9
Stile	14	6,4	186	7,7	-1,3
Totale complessivo	219	100,0	2417	100	0,0

Tabella 1 – Piano di campionamento

La tabella 1 riassume i risultati della procedura di campionamento. Come si può facilmente osservare, la distribuzione del campione all'interno degli 8 strati identificati rispecchia sostanzialmente quella dell'universo. Sebbene alcuni ambiti produttivi risultino sotto-rappresentati come nel caso dell'agro-alimentare e dell'abitare, mentre altre attività siano sovra-rappresentate (tra queste ultime i materiali e lavorazioni, i beni strumentali e i mezzi di trasporto), gli scostamenti non sono tali da inficiare la bontà del campione costruito.

3. Geo-referenziazione delle imprese del campione

Una volta estratto il campione, la prima operazione fondamentale al fine di poter effettuare l'indagine sui comportamenti d'impresa nella provincia di Cuneo è stata la georeferenziazione delle 219 imprese oggetto di studio, ovvero l'identificazione di una coppia di coordinate geografiche in grado di determinare una posizione sul territorio al fine di collocarla su una base cartografica.

In un precedente lavoro (Demetrio, Guerreschi, 2010), in presenza di un numero esiguo di casi, era stato sufficiente definire singolarmente le coordinate: laddove invece il numero di casi è considerevolmente elevato, come nel nostro caso, si è reso indispensabile ricavare l'informazione per tutte le unità di indagine con un sistema *multi-address*.

Si sono ricercate in rete applicazioni quali ad esempio *Batch Conversions of Address*, *GPS Visualizer*, ecc., che da un input di indirizzi stradali multipli fossero in grado di restituire quale output, attraverso un processo di geocodifica, le coordinate utilizzabili successivamente in un software geografico. Si è scelto di servirsi di GPS Visualizer². Questa applicazione offre la possibilità di selezionare la base cartografica di riferimento scegliendo tra Google o Yahoo. La nostra preferenza è ricaduta su Google. La scelta è stata orientata principalmente dalla consuetudine di visualizzare mappe di Google (Google Maps³) che implementano stradari basati su standard internazionali ampiamente riconosciuti per le convenzioni di denominazione e mappatura.

Le informazioni stradali processate hanno restituito come output un file di testo⁴, in cui il campo separatore è individuato nel "comma", contenente il codice identificativo del caso, l'indirizzo cercato e quello effettivamente trovato dall'applicazione sullo stradario implementato (via, n.

² <http://www.gpsvisualizer.com/geocoder/>

³ I dati di geocodifica per i contenuti delle mappe di Google Maps vengono concessi in licenza da NAVTEQ e/o Te Atlas (TANA) e/o altri fornitori.

⁴ Occorre osservare che l'operazione effettuata grazie a questo applicativo, non è attualmente più praticabile data l'attuale politica di Google tesa a non restituire le coordinate spaziali ma soltanto a visualizzare punti sulla mappa. Se si fosse scelta come source Yahoo, non ci sarebbe stata alcuna preclusione.

civico, città) associato alle sue coordinate geografiche⁵ riferite all'ellissoide del sistema geodetico geocentrico WGS84⁶ (es. 45.01595, 6.942435).

A questo proposito, ci sembra importante sottolineare come il diffondersi su internet di applicativi che rendono accessibile a tutti l'informazione geolocalizzata tende a semplificare, fino a banalizzare, un processo complesso e tecnologicamente avanzato che fornisce all'utente il risultato atteso senza che questi abbia la consapevolezza dei concetti multidisciplinari basilari appartenenti alle "discipline di riferimento" quali la geodesia, la cartografia, i GIS ecc...

Nel nostro lavoro, l'obiettivo di ottenere le coordinate delle imprese è stato raggiunto con minime operazioni di facile riproducibilità. I dati così ottenuti sono stati utilizzati in un software GIS⁷, dopo aver definito inizialmente il sistema di coordinate geografiche (WGS84) e successivamente il sistema di coordinate proiettate (UTM fuso 32N⁸).

La fase successiva ci ha visto impegnati nell'esaminare le incongruenze riscontrate e gli errori che hanno interessato il 40% dei casi. Le incongruenze accertate negli indirizzi processati sono state raggruppate in 3 categorie:

- indirizzi privi del numero civico: in questi casi era stata riconosciuta la via, ma non era identificato il numero civico. La coordinata ottenuta coincideva pertanto con il punto medio della via; i casi riscontrati erano pari al 15%
- indirizzi non coincidenti con quelli richiesti pari al 15%
- indirizzi non trovati pari al 10%

Per ogni caso di questo tipo si è dovuto ricorrere ad una nuova ricerca consultando altre fonti. Si è utilizzato inizialmente lo Stradario Unico della Regione Piemonte⁹. Questo ci ha permesso di ottenere immediatamente l'informazione ricercata solo per una percentuale limitata di imprese. Siamo stati relativamente poco agevolati dall'applicativo, in quanto nella maggioranza dei casi veniva visualizzata l'intera via, ma non si trovava alcun riscontro del numero civico dato come sconosciuto. La spiegazione può essere ricercata nel fatto che la nostra analisi è relativa ad imprese che molto spesso risiedono in aree industriali, che hanno una loro viabilità interna e che molte volte non trovano riscontro immediato nello stradario oppure trovano una corrispondenza solo parziale.

A seguire, siamo ricorsi al sito di Pagine bianche che, a partire dalla ragione sociale dell'impresa restituiva l'informazione su una pagina web provvista di un link per la visualizzazione su carta tecnica o foto aerea dell'indirizzo ricercato. Si è quindi abbandonato il riferimento all'indirizzo effettivo dell'impresa a vantaggio della sua localizzazione sul territorio.

L'ultima fase della nostra ricerca ci ha visti impegnati nel risalire alle coordinate geografiche a partire dal punto collocato sulla base cartografica. Fondamentale per perseguire questo obiettivo si è rivelato il ricorso ad un'utilità di internet - *The World Coordinate Converter*¹⁰.

⁵ L'ellissoide di rotazione, superficie geometrica che approssima il geoide, ha come coordinate geografiche la latitudine e la longitudine.

⁶ Il sistema geocentrico globale 1984 (World Geodetic System) utilizza il posizionamento GPS satellitare.

⁷ Per il lavoro è stato utilizzato il software Arcmap 9.2.

⁸ La superficie terrestre nel sistema UTM è suddivisa in 60 fusi e 20 fasce orizzontali. Il Piemonte ricade nel fuso 32N. Il sistema UTM si basa sulla proiezione conforme di Gauss che mantiene inalterati gli angoli. E' chiaro che per rappresentare carte piane partendo da un elemento tridimensionale si apportano inevitabilmente delle deformazioni. Per limitare tali deformazioni deve essere limitata la superficie da considerare.

⁹ <http://www.sistemapiemonte.it/pspcsv/stradariounico.do?ris=2>

Il progetto dello Stradario Unico, nell'ottica della creazione di una vera e propria infrastruttura di Dati Geografici, favorisce la diffusione di informazioni di toponomastica consentendo di riferire automaticamente alla cartografia oggetti sulla base dell'indirizzo.

¹⁰ <http://twcc.free.fr/>

L'utilità World Coordinate Converter esplicita nel titolo la sua missione.

Questo applicativo è stato utilizzato nel nostro lavoro in modo non convenzionale. Infatti, per ottenere le coordinate si è collocato un “tag” o “indicatore punto”, su una foto satellitare in una posizione corrispondente a quella riscontrata nell’immagine della fase precedente. In una finestra si sono visualizzate le coordinate del punto tag focalizzato.

Questa utility si è rivelata essere molto efficace, anche se nella sua potenzialità risiede anche il suo limite, individuato nella gestione di una singola localizzazione per volta.

Il processo si conclude con l’acquisizione delle coordinate necessarie all’utilizzo delle stesse in ambiente GIS¹¹.

Ci sembra utile evidenziare che soltanto l’utilizzo di una molteplicità di strumenti ci ha permesso di pervenire all’individuazione della corretta localizzazione delle imprese esaminate. Nondimeno, lo sforzo profuso avrebbe potuto essere limitato, quando non azzerato, se nella fase di implementazione del questionario originario¹² fosse stata prevista anche la rilevazione dell’esatta posizione, in termini di coordinate spaziali, delle aziende esaminate, valutata tramite l’utilizzo di ricevitori GPS.

La figura 2 rappresenta l’esito del processo di georeferenziazione del campione di imprese della provincia di Cuneo. È facile osservare come le imprese individuate coprano uniformemente ciascuno dei cinque ambiti territoriali in cui la letteratura recente (Garavaglia 2009 e 2010; Demetrio, Giaccaria, 2010a) suddivide il territorio provinciale.

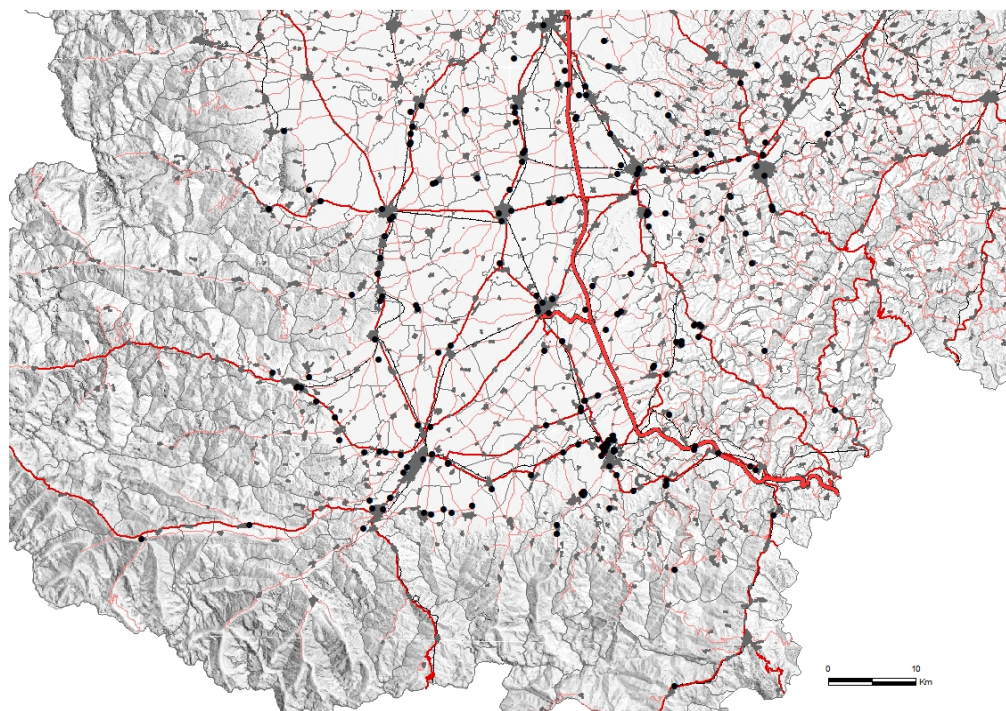


Figura 2 – Distribuzione spaziale del campione delle imprese esaminate.

¹¹ Per le rappresentazioni si è utilizzata la CTR sfumo della Regione Piemonte 1:50.000.

¹² Il presente lavoro utilizza le interviste realizzate a supporto del libro di Demetrio e Giaccaria (2010a).

4. Relazioni e performance delle imprese cuneesi

Al fine di comprendere le modalità con cui le imprese del campione interagiscano tra loro e con altri sistemi locali in termini di input, output, relazioni consolidate, reti di ricerca, ecc., abbiamo calcolato per ciascuna di esse:

- un indice relativo alla numerosità degli *input* utilizzati nel processo produttivo;
- un indice relativo alla numerosità dell'*output* locale e sovralocale;
- un indice relativo alla numerosità delle *relazioni consolidate* con altre imprese;
- un indice relativo alla numerosità delle relazioni *ricerca* locale e sovra locale.

Pur trattandosi soltanto di un primo tentativo per valutare il complesso delle dinamiche relazionali del campione, questo tipo di scelta ha permesso di comprendere meglio come le relazioni analizzate influenzino la performance competitiva delle imprese cuneesi.

In particolare sono emerse alcune interessanti correlazioni che legano le modalità di interazione con l'esterno ai livelli di export e alla variazione dell'utile delle imprese.

Nello specifico, la numerosità dei legami relativi alla ricerca influenzerebbe positivamente l'utile¹³ e l'export¹⁴ delle imprese, la forza dei legami sovra-locali l'utile¹⁵, mentre quella dei legami locali l'export¹⁶.

È interessante osservare che ciascun indice utilizzato è stato ottenuto utilizzando metodi di stima delle densità fondati su tecniche raster¹⁷. L'obiettivo che ci siamo posti, infatti, era quello di valutare il ruolo delle relazioni sulla performance delle imprese non isolando le stesse dal sistema (o sub-sistema) di appartenenza, ma tenendo conto anche del ruolo del contesto operativo.

Dal punto di vista operativo tra i due differenti metodi di calcolo della densità, Simple e Kernel¹⁸, la nostra scelta si è indirizzata sulla densità Kernel, in quanto questa pondera maggiormente i casi considerando la distanza di ogni punto dal centro di ciascuna cella.

Al fine di poter procedere all'elaborazione della funzione di Kernel è stato necessario selezionare alcuni parametri: il raggio del cerchio e la dimensione della cella.

La scelta del raggio è indubbiamente fondamentale. Nel nostro caso la scelta è stata guidata dalla considerazione che il territorio di indagine è esteso a tutta la provincia di Cuneo.

Se il raggio fosse stato fissato pari a 2,5 chilometri avrebbe evidenziato delle densità a macchia intorno alle imprese: per contro, se fosse stato adottato pari a 10 chilometri la densità avrebbe coperto la maggior parte del territorio provinciale. Conseguentemente si è utilizzato per il raggio (search radius) il valore di 5 chilometri.

La dimensione della cella è stata assunta pari a 250 metri.

Per tutti gli otto indicatori si sono calcolate le densità. Il risultato di queste operazioni consiste in 8 file raster in cui il valore associato alla singola cella è un numero decimale. Non essendo possibile visualizzare la tabella dei dati associata¹⁹, è stato necessario utilizzare la funzione *Raster calculator* al fine di trasformare, attraverso l'ausilio di una espressione algebrica, il campo decimale in un campo intero.

¹³ corr. = 0,188; α = 0,05

¹⁴ corr. = 0,208; α = 0,05

¹⁵ corr. = 0,183; α = 0,05

¹⁶ corr. = 0,227; α = 0,05

¹⁷ Per la nostra analisi abbiamo utilizzato il modulo Spatial Analyst di ArcMap 9.2

¹⁸ Ricordiamo brevemente che al punto coincidente con le coordinate delle nostre imprese è associata una terna cartesiana. I valori finali della cella sono ponderati rispetto alla distanza che intercorre tra il centro della cella definita e il baricentro del cerchio di ricerca.

Il metodo prevede che dal punto indagato si descriva una circonferenza. Al variare del raggio la funzione restituisce una differente rappresentazione della densità causato dal fatto che possono variare i numero di punti che ricadono al suo interno. Quanti più punti cadono all'interno del cerchio tanto più le funzioni di Kernel, rappresentate da "campane", si sovrappongono e i valori attribuiti alle celle comuni sono date dalla somma delle singole funzioni di Kernel.

¹⁹ La tabella dei dati associati alle celle dei file raster non si legge se il valore è decimale.

Ci interessava poter associare a ogni impresa il valore di densità attribuito alla cella in cui essa ricadeva. Per ottenere questo risultato è stato necessario abbandonare l'ambiente raster e passare ad un ambiente vector ricorrendo al tool *conversion raster to polygon*.

Nella tabella degli shapefiles areali così ottenuti ci è stato restituito di default un campo chiamato "gridcode", che è il dato della densità per ogni singola geometria. Successivamente, si è applicato il tool *Spatial Join* in cui, scegliendo una relazione "uno a uno" tra lo shapefile puntuale delle imprese e gli 8 shapefiles poligonali delle densità, si sono ottenuti altri 8 shapefiles puntuali in cui è associato il valore della densità alla singola impresa.

Al fine di poter ottenere solo 4 indicatori complessivi (input, output, relazioni consolidate e ricerca), si è utilizzato un tool di Spatial Analyst: *Weighted Sum*. Questo strumento, che permette di calcolare somme pesate di valori attribuiti alle singole celle, ci ha consentito di abbinare a coppie (valore locale e valore sovralocale) i nostri indicatori.

Lo strumento consente anche di ponderare diversamente i raster applicando fattori di riduzione. Nel caso specifico non è stato applicato alcun fattore di riduzione, il che equivale ad effettuare una semplice somma algebrica.

Lo stesso procedimento è stato applicato una prima volta per realizzare 4 carte ottenute dalla somma dei rispettivi indicatori locale e sovralocale e una seconda volta per realizzare 2 carte ottenute dalla somma dei 4 indicatori locali e dei 4 indicatori sovralocali.

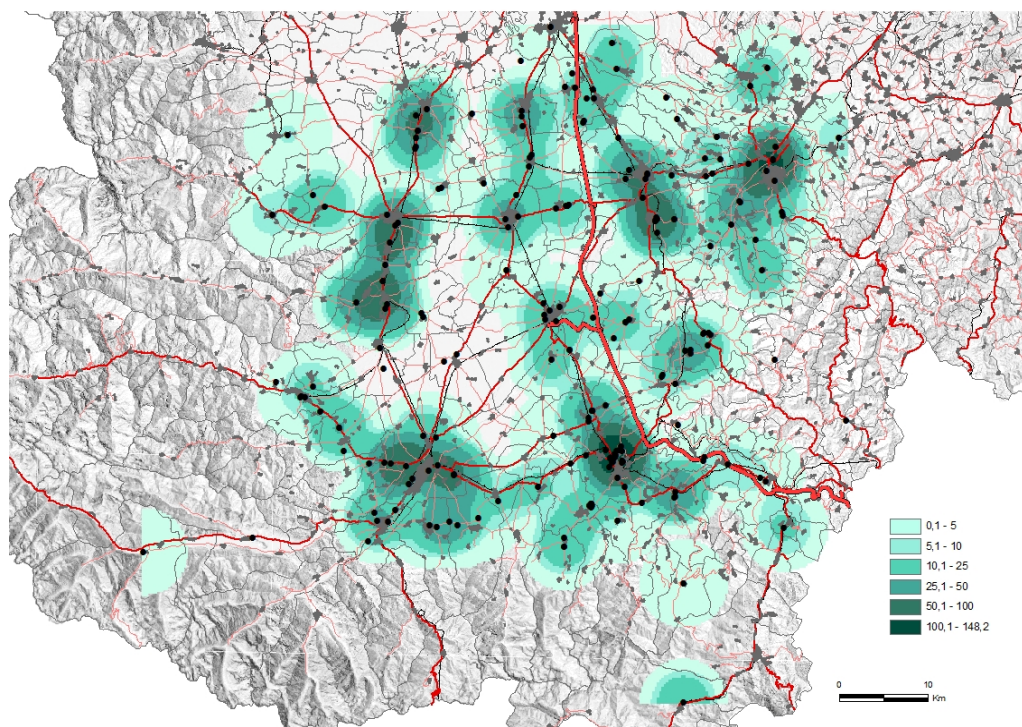


Figura 3 – Intensità dei legami di ricerca nella provincia di Cuneo.

La figura 3 rappresenta l'esito del processo sopra descritto riferito alle sole relazioni finalizzate alla ricerca e sviluppo. È facile osservare come le aree interessate dai legami di ricerca di maggiore intensità siano le aree a nord della provincia: Saluzzese, direttrice Torino-Cuneo e Langhe, vale a dire proprio quelle aree interessate da più favorevoli rapporti tra imprese innovative e adattive (Bonaverò *et al*, 2011), mentre Cuneese e Monregalese si caratterizzano per legami di ricerca di minore intensità.

5. Conclusioni

Oltre a fornire una prima stima dell'intensità dei fenomeni relazionali che coinvolgono le imprese cuneesi, questo lavoro ha tentato di comprendere le modalità attraverso cui specifiche tipologie di relazioni sono in grado di influire sulla competitività delle aziende analizzate.

In particolare, è emerso che dal punto di vista delle implicazioni sulle performance, la maggiore disponibilità di relazioni di ricerca e a scala sovra-locale sembra agire quale volano alla crescita del sistema produttivo, mentre la maggiore disponibilità di relazioni locali sembra influire positivamente sui livelli di export.

È evidente come questo sia soltanto il primo passo di un percorso verso la comprensione dell'influenza dei legami relazionali sulla performance d'impresa. Si pensi, per esempio, a come la tipologia di settore prevalente a livello di sub-sistema provinciale o di ambito territoriale (Demetrio, Giaccaria, 2010b) possa influenzare la natura e il ruolo delle relazioni interaziendali. È chiaro che un lavoro dotato di un grado di approfondimento maggiore dovrebbe anche tener conto di una qualche correzione settoriale.

Nondimeno, il nostro obiettivo era certamente più limitato: ci eravamo riproposti, infatti, di utilizzare l'analisi spaziale quale strumento complementare all'analisi statistica per tenere conto di un certo effetto di contesto nel calcolo delle correlazioni tra variabili. In quest'ottica, l'obiettivo sembra essere stato raggiunto e, pur senza alcuna correzione settoriale, le correlazioni che legano l'intensità di relazioni interaziendali alla performance d'impresa appaiono estremamente robuste.

Bibliografia

- Bonaverò P., Demetrio V., Guerreschi P. (2011), "Reti territoriali, reti d'innovazione e distribuzione della conoscenza nella provincia di Cuneo" in Atti della XXXII Conferenza Scientifica Annuale AISRe, Torino, 15- 17 settembre
- Demetrio V., Giaccaria P. (2010a), *Geografia del sistema manifatturiero piemontese: nuove forme di organizzazione e coordinamento*, Carocci, Roma
- Demetrio V., Giaccaria P. (2010b), "Centralità senza egemonia: Torino nel sistema Piemonte" in Conti, S. (a cura di) *"Nord Regione globale. Il Piemonte"*, Mondadori, Milano, pp. 279-304
- Demetrio V. e Guerreschi P. (2010), "Tecniche di analisi ed interpolazione spaziale nello studio dei sistemi produttivi: il caso della Provincia di Cuneo" in Atti della 14ª Conferenza Nazionale ASITA, Brescia, 9-12 novembre, pp. 781-786
- Garavaglia L. (2009), *Cluster produttivi e traiettorie di sviluppo nei territori del cuneese*, Fondazione Cassa di Risparmio di Cuneo, Cuneo
- Garavaglia L. (2010), "I territori del quadrante negli scenari sociali e produttivi dell'Italia del nord" in Conti S. (a cura di) *Nord Regione globale. Il Piemonte*, Mondadori, Milano

La Certosa di Pavia e la *Mediolanum Ticinum* nel contesto dell'*Ager Ticinensis*: una proposta di valorizzazione dei tracciati storici

Anna Maria Boniardi (*), Susanna Bortolotto (*), Piero Favino (**), Raffaella Simonelli (*)

(*) Politecnico di Milano, Dipartimento di Progettazione dell'Architettura,
Laboratorio di Diagnostica per la Conservazione e il Riuso del Costruito, 20158 Milano
via Durando 10, Tel. 0223995825, Fax 02 23995638

(**) Politecnico di Milano, Dipartimento di Progettazione dell'Architettura, Laboratorio di Macroubanistica
Paesaggio e Cartografia tematica, 20158 Milano, Via Durando 10, Tel. 02 23995823, Fax 02 23995638

Abstract

Il lavoro si è configurato come proposta di tutela e valorizzazione dei resti centuriati della matrice romana dell'*Ager Ticinensis*, nonché dei tracciati stradali e delle permanenze delle canalizzazioni storiche, attraverso l'analisi, la conoscenza propedeutica e la sistematizzazione in un sistema informativo (GIS). L'area d'interesse è compresa tra Milano e Pavia.

L'impostazione metodologica per lo sviluppo della ricerca si può sinteticamente riassumere in tre sezioni: una sezione storica, una tematica e una relativa alle indagini analitiche di dettaglio per l'individuazione di aree omogenee. L'esito di questi studi ha permesso di riconoscere i segni emergenti della stratificazione del territorio, le caratteristiche fisiche ed i loro rapporti, al fine di tutelare, conservare, valorizzare e soprattutto documentare - in chiave sincronica e diacronica - l'evolversi del palinsesto insediativo stratificatosi nel tempo.

Il punto di partenza è stata la rilettura del "*Master Plan per la salvaguardia ambientale, la riqualificazione e la valorizzazione delle aree attorno alla Certosa di Pavia*", che costituisce uno dei più significativi strumenti previsti dal PRUSST della zona e che ha visto coinvolti la Regione Lombardia, la Provincia di Pavia ed i comuni di Certosa di Pavia, Borgarello e Giussago.

L'obiettivo è quello di implementare tale strumento e di favorire la creazione di un parco naturalistico di salvaguardia attorno alla Certosa, così come espresso all'interno del PRUSST stesso, tenendo conto dell'infrastrutturazione acque-strade in sede storica.

Il *Master Plan*, così configurato, si pone come strumento di pianificazione strategica i cui contenuti sono orientati da un lato a determinare un assetto coerente del territorio, con l'obiettivo della salvaguardia del complesso monumentale della Certosa, dall'altro ad individuare un percorso di fattibilità per interventi coerenti con l'obiettivo della valorizzazione ambientale dell'area circostante (comprensivo della tutela dei segni di centuriazione), con particolare riguardo alle aree naturalistiche protette ed alla loro accessibilità e collegamento attraverso percorsi ciclabili.

Abstract

The work has been configured as proposal of guardianship and enhancement of the residual of Roman land division (*Centuriatio*) in the *Ager Ticinensis*, as well as of the road layouts and the permanence of the historical ducts-canalizations, through the analysis, introductory knowledge and the creation of a geographical information system (GIS). The area of interest is located between Milan and Pavia provinces. The methodological formulation for the development of the research can synthetically summary in three sections: one historical section, one thematic and one related to the analytical investigations to find homogenous parts.

The outcome of these studies has allowed to recognize the emergencies of the stratification of the territory, the physical characters and their relationships, with the purpose to protect, to preserve, to

valorize them and above all, to document - with a synchronic and diachronic interpretation key - the evolution of the stratified settlement during the centuries.

The starting point was the reinterpretation of "Master Plan for the redevelopment, environmental protection and enhancement of areas around the Certosa di Pavia", which is one of the most significant instruments from PRUSST of Pavia which saw involved the Lombardy Region, the Province of Pavia and the municipalities of Certosa di Pavia, Borgarello and Giussago. The goal is to implement this instrument and to create a safeguard natural park around the Certosa, in according to PRUSST, with the water-roads infrastructures in historical site (lines and traces of *Roman Centuriatio*). The configured Master Plan arises as a tool for strategic planning, whose contents are oriented on the one hand to establish a coherent framework of territory with the aim of safeguarding the monumental complex of the Certosa; on the other, to locate a feasibility path for consistent interventions with the objective of environmental exploitation of the surrounding land (including the protection of signs of *Roman Centuriatio*), with particular respect to the naturalistic and protected areas and their accessibility with cycling routes.

1. Paesaggio culturale, archeologia del paesaggio

L'evoluzione dell'“idea” di paesaggio è legata anche all'evoluzione tecnica e tecnologica nel campo della rappresentazione del territorio. Una cartografia sempre più precisa e l'introduzione della fotografia aerea e satellitare hanno permesso la rilevazione - dalla piccola alla grande scala - di sistemi o reti di segni del passato diffusi su ampie aree relative ad assetti centuriati, a sistemazioni agrarie, a tracciati stradali ormai “sedimentati” e non più in uso, a corsi d'acqua con le relative meandricazioni e paleovalvei. Queste presenze storiche - importanti per la forte influenza sull'evoluzione territoriale - non sono facilmente percepibili nella loro complessità e, proprio perché difficilmente conoscibili, tanto più vulnerabili. La loro conservazione diventa un passo obbligato per non perdere le tracce del passato del nostro paesaggio culturale soprattutto in un periodo, come quello attuale, in cui le trasformazioni del territorio sono sottoposte a forti pressioni. Data però la grande diffusione di questi “segni” non è pensabile un intervento tutelativo semplicemente vincolistico, ma i beni culturali e ambientali devono essere percepiti nella loro dimensione sociale ed economica e, come tali, essere inseriti nella vita del presente, attraverso l'uso o il riuso, mantenendoli nel loro contesto storico, funzionale e culturale.

Bisogna insomma rivalutare quello che Alois Riegl definiva “valore d'uso” a fronte dei valori “storico” e di “antichità”, peraltro da sempre largamente riconosciuti¹.

Scopo della tutela del paesaggio non è mantenerlo quale è e, ancor meno, riportarlo come era, ma guidarne la trasformazione nel tempo, così da recuperarne e valorizzarne tutti i segni della storia di cui esso stesso si fa portatore, dotati di un senso ben preciso anche nel presente. Tali tracce si pongono infatti come elementi della storia di una popolazione, di una civiltà e, se vogliamo, dell'umanità intera e, come recita la Convenzione europea del 2000, “componente essenziale del contesto di vita delle popolazioni, espressione della diversità del loro comune patrimonio culturale e naturale e fondamento della loro identità”. L'accessibilità di tali tracce diventa quindi possibilità di conoscenza delle proprie radici, della propria storia e, conseguentemente, della propria identità, valore fortemente messo in crisi oggi dalla modernità e dalla tecnologia che, a partire dall'epoca della rivoluzione industriale, hanno proiettato l'uomo verso il futuro e verso il progresso, sradicandolo spesso dal proprio passato. L'evolversi del concetto di “monumento/documento” e di paesaggio ha avuto importanti ricadute anche all'interno della disciplina del restauro, che ha spostato il proprio obiettivo dalla ricostruzione di una originaria, quanto arbitraria, forma del patrimonio alla conservazione di ciò che ci perviene con tutta la sua complessità e tutte le sue stratificazioni storiche, non più considerate come semplici interferenze con il progetto. L'importanza attribuita al dato materiale avvicina il lavoro dell'architetto restauratore ad alcune discipline da più tempo orientate ad indagini di questo tipo, quali l'antropologia, la geografia storica, l'archeologia. Soprattutto con quest'ultima si sono attuate contaminazioni interessanti,

ricche di ricadute pratiche per la conoscenza della complessità del territorio sul quale deve necessariamente intervenire il progetto di conservazione e gestione.

Il nuovo concetto di paesaggio, e il metodo dell'archeologia del paesaggio, rappresentano la base concettuale e metodologica di questo studio. Il lavoro si è configurato pertanto come analisi e conoscenza propedeutica ad una futura proposta di tutela e valorizzazione dei resti centuriati della matrice romana dell'*Ager Ticinensis*, delle permanenze delle canalizzazioni storiche, nonché del riuso dei tracciati stradali storici, con la progettazione di nuove connessioni, accessibilità e percorribilità tra le aree del paesaggio agrario, le emergenze monumentali ed il patrimonio diffuso.

2. Il paesaggio antropico come palinsesto: il caso dell'*Ager Ticinensis* e della *Mediolanum Ticinum*

L'area di indagine comprende l'*Ager Ticinensis*, territorio che si estende tra Milano e Pavia, interessando parte delle due province.

L'ambito così identificato è stato indagato partendo dall'analisi storico-archivistica, correlata alle analisi cartografiche delle varie soglie storiche e alle ricognizioni *in situ*.

Le tracce di centuriazione, per quanto riguarda la Provincia di Pavia, sono state scoperte e portate all'attenzione degli studiosi di storia antica negli anni Quaranta da Plinio Fraccaro; tali studi sono stati ripresi e implementati negli anni Settanta da Gianfranco Tibiletti e da Pierluigi Tozzi².

Fraccaro, unitamente alle centuriazioni, affronta anche lo studio della viabilità romana convergente su Pavia, rilevando l'esistenza dell'antico tracciato della *Mediolanum Ticinum*.

La centuriazione romana rappresenta l'organizzazione di un contesto territoriale che permette un'ordinata sistemazione di bonifica agraria e una facile amministrazione catastale, nonché un ottimale sfruttamento del suolo. Essa consiste nella misurazione e nella divisione regolare di un territorio in grandi appezzamenti quadrati di 100 *heredium* (corrispondenti a circa 50 ettari) detti appunto *centuriae*. Gli appezzamenti sono divisi mediante l'incrocio di assi ortogonali, detti *limites*. I *limites* principali sono il Cardo e il Decumano massimi, ai quali si affiancano parallelamente altri assi che, incrociandosi, costituiscono quadrati detti *centuriae*, di 20 x 20 *actus*³.

La griglia definita dalla centuriazione per delimitare gli appezzamenti da destinare a proprietari privati - realizzata tracciando sul terreno linee rette che vanno alcune da nord a sud, i cardini, e altre da est a ovest, i decumani, anche se spesso l'orientamento teorico di queste linee varia per assecondare la naturale pendenza del terreno mantenendo però la perpendicolarità degli assi della griglia stessa - da origine a lotti di forma quadrata di 2400 piedi di lato che corrispondono a 710,4 metri circa, detti appunto *centuriae*.

Questo sistema territoriale, frutto di un'opera di pianificazione precisa, costituito dalla permanenza del reticolo a maglia quadrata di strade e canali, dagli insediamenti, da divisioni particellari di terreni agricoli ed alberate, è ancora perfettamente leggibile al di là delle inevitabili trasformazioni sopravvenute nel tempo. Esso racchiude la storia materiale delle culture, delle civiltà e dei popoli in maniera così chiara e lineare come nessuna storia scritta potrebbe fare e deve essere, pertanto, oggetto di tutela e valorizzazione.

La Mediolanum Ticinum

La strada è menzionata sia dall'Itinerario di Antonino, che risale alla fine del III secolo e contiene un elenco di grandi arterie imperiali - sia dall'Itinerario Burdigalense o Gerosolimitano, che fu probabilmente redatto nel 333 d.C. e ricostruisce le tappe del viaggio tra Bordeaux e Gerusalemme. Il percorso della *Mediolanum Ticinum*, che i due documenti citati fissano rispettivamente in 20 e 22 miglia, è ancora oggi evidente sul territorio⁴.

Nell'Itinerario Burdigalense viene indicata la *Mutatio ad Decimum*, posta a metà strada tra Pavia e Milano, a 10 miglia dunque da entrambe le città. L'identificazione della *Mutatio ad Decimum* sul territorio attuale non presenta alcuna difficoltà perché tale dizione si è conservata nel rispettivo toponimo. Si tratta infatti della località Cascina Decima, situata all'incirca a 15 km da Milano, individuabile sulla cartografia tecnica regionale del 1994.

L'integrazione ai "dati itinerari" che potrebbe invece venire da indizi di carattere più strettamente archeologico (iscrizioni e reperti archeologici in genere) è piuttosto scarsa.

L'ipotesi dell'esistenza di questa strada e del suo andamento vengono confermate dalle analisi cartografiche svolte dal Fraccaro e dalle ricognizioni *in situ* svolte a partire dalla fine degli anni Novanta e confluite nel GIS messo a punto dalla presente ricerca. La strada inizia dal Carrobbio - estremità dell'attuale via Torino a Milano - dove sorgeva la più antica Porta Ticinese. Da questo punto ha inizio il moderno corso di Porta Ticinese, che va diritto sino all'attuale Porta Ticinese, passando dinanzi a San Lorenzo e per la Porta Ticinese medioevale, i cui avanzi si vedono ancora poco oltre le colonne di San Lorenzo. "La tre Porte Ticinesi, la romana, la medioevale e la spagnola, situate su una linea retta, indicano certamente la direzione che teneva uscendo da Milano sino dall'epoca romana la strada per *Ticinum*. Fuori di Porta Ticinese, questa stessa direzione è mantenuta per un certo tratto dal corso S.Gottardo [...] uscendo dalla città in aperta campagna per più di 7 km misurati dall'antica cinta romana, cioè dal Carrobbio. Questo rettilineo ha subito qua e là qualche leggera inflessione [...]. Ma poiché certamente questo rettilineo non fu tracciato nei tempi moderni, perché non avrebbe avuto scopo, dato che esso non conduce a nessun importante centro abitato, e non è d'altra parte probabile che esso lo sia stato nell'epoca medioevale, la quale non si curava di aprire strade rettilinee, non c'è dubbio che noi siamo innanzi ad un ampio frammento di strada romana, come è provato dal fatto che questo rettilineo usciva, come abbiamo visto, dall'antica Porta Ticinese di Milano romana"⁵ verso Pavia.

L'antichità di questo rettilineo trova conferma, come si è già visto, anche nella toponomastica. Ci si riferisce a Quinto Stampi e a Ponte Sesto, i cui nomi ricordano il loro sorgere in corrispondenza del quinto e del sesto miliare della strada; ipotesi confermata dalla loro distanza dal Carrobbio di Milano pari all'incirca a cinque o sei miglia romane. Un secondo rettilineo, in continuità, che si allinea con quello precedente, è individuato dal Fraccaro più a sud, tra Gambarone e Basiglio: si tratta di strade campestri che si dispongono secondo una linea retta per circa quattro chilometri.

Prolungando questa linea verso sud si passa in vicinanza della Cascina Decima, la *Mutatio ad Decimum* di cui sopra, la cui importanza sopravvive per tutto il medioevo e durante il quale assume ruolo di capo-pieve, come è ricordato anche nella Carta della Diocesi di Milano del 1300. Successivamente la pieve fu spostata nella vicina Lacchiarella e la località di Decimo perse importanza, riducendosi all'attuale cascina.

Nella Carta d'Italia di Giovanni Magini (Bologna, 1620) poco a nord di Decimo compare anche una località di nome Nono di cui attualmente però si sono perse le tracce: sorgeva probabilmente nei pressi di Cascina Crosina.

Proseguendo in linea retta, verso Pavia, si evidenzia una strada campestre di circa tre chilometri, fra Turago Bordone e Cascina Darsena, affiancata da un tratto della Roggia Cavetto. Superata la depressione percorsa dalla Roggia Barona, all'altezza di Moriago, ha inizio una strada carrozzabile che, passando vicino alla cinta muraria della Certosa, prosegue fino al cimitero di Borgarello, oltre al quale non è più chiaramente rintracciabile.

Da qui in avanti non si riconoscono altre chiare tracce della *Mediolanum Ticinum* e due sono le ipotesi sul tratto terminale avanzate dal Fraccaro: o piegava verso est per entrare da una delle porte del lato settentrionale delle mura di Pavia o proseguiva diritta per entrare in città dalla porta occidentale.

Probabilmente questa strada fu abbandonata già nell'alto Medioevo dopo la caduta dell'Impero Romano.

Le cartografie storiche IGM, le foto aeree e i sopralluoghi condotti confermano le ipotesi del Fraccaro. E' infatti possibile individuare e seguire con sicurezza il grande rettilineo che, partendo dal Carrobbio e dall'antica Porta Ticinese, inoltrandosi nella campagna, procede lungo la pianura tra Quinto Stampi, Ponte Sesto, Nono e Cascina Decima. Una volta superati lo stesso Lambro, l'Olona e la roggia Barona, il tracciato costeggia il muro perimetrale orientale del parco della Certosa (dando origine all'orientamento della Certosa stessa) e, dopo una leggera deviazione, entra nell'abitato di Pavia.

Le tracce della *Mediolanum Ticinum* si localizzano all'interno di Milano innestandosi sulla complessa maglia viaria esistente che, partendo dal Foro e dai principali edifici pubblici romani, si sviluppa attraverso la *Porta Ticinensis*. A Pavia invece la *Mediolanum Ticinum* si innestava sul cardo principale (attuale via XX Settembre) entrando attraverso la *Porta Paiaicii*.

L'Ager Ticinensis

Il Fraccaro pubblica i suoi studi sulla *Mediolanum Ticinum* nel '46, mentre risalgono al '49 quelli relativi alla centuriazione dell'*Ager Ticinensis* a nord di Pavia.

La griglia centuriata di epoca romana venne usata a lungo anche nei secoli successivi e, dove il terreno non ha subito radicali trasformazioni ad opera degli uomini o degli agenti naturali, le tracce di queste misurazioni si conservano fino ad oggi. Fondamento delle ricerche del Fraccaro sugli agri centuriati del nord Italia sono le mappe della cartografia IGM, in particolare le levate di campagna in scala 1:25.000.

Ad un primo esame, del territorio tra Milano e Pavia si rileva che la campagna fra Binasco e Pavia e fra l'Olon e la strada Casorate-Trivolzio-Pavia si presenta "orientata": "Io dico orientata una campagna nella quale strade, sentieri, canali, fossi, piantagioni, tutti o in gran parte, si svolgono secondo linee rette che si intersecano ad angolo retto e che hanno quindi, rispetto al meridiano, la medesima declinazione angolare. La cosa si osserva percorrendo la regione anche sulla grande strada Pavia - Milano, si rileva dalla carta topografica e meglio si vedrebbe dall'aereo"⁶. Una seconda osservazione ha condotto il Fraccaro ad identificare alcuni rettifili fra loro paralleli: il primo passante da Trivolzio-Torradella-Vellezzo Bellini-Giovenzano-Casatico-Cavo Borromeo-Cavo Carlasca a nord-ovest di Gualdrasco, lungo circa 12 chilometri, segnato da tronchi di strade carrozzabili o campestri, fossi, tratti di confini comunali: "E' impossibile ammettere che tutti questi elementi si siano disposti per caso su una linea retta così lunga: questa linea retta doveva rappresentare qualche cosa. Inoltre essa fu tirata con la squadra, con la *groma*, da esperti misuratori. La linea è indicata oggi specialmente da strade, ed è quindi verosimile che essa fosse in origine percorsa tutta da una strada, fiancheggiata o no da fossati"⁷.

Il secondo rettifilo, staccandosi dalla strada Trivolzio-Pavia poco a sud-est della Cappella della Madonna dell'Assunta, passa per Origioso-Liconasco-Gualdrasco. Esso dista dal primo circa 710 metri, misura equivalente al lato di una centuria. L'ipotesi che ci si trovasse in presenza di due decumani trova conferma nell'identificazione di un terzo rettifilo (cascina Montalbano-cascina Tirogno-Torriano-Villanova de' Beretti poi, dopo un'interruzione, Moriago-cascina di Novedo-ponte sulla Caronna) posto a 710 metri circa a sud del secondo e prende definitivamente corpo, il riconoscimento di alcuni cardini-rettifili perpendicolari ai precedenti, sebbene molto meno conservati. Altre tracce trovate a distanze pari a multipli del lato della centuria, sia nella direzione dei cardini che dei decumani, danno conferma definitiva che ci troviamo in presenza dei resti di una centuriazione.

L'ultima osservazione fatta è quella che la maggior parte degli abitati e delle cascine della zona si trovano proprio in prossimità dei *limites* individuati, ciò ad affermare che, fin dall'antichità, gli insediamenti sorgevano di preferenza lungo le strade/*limes* della centuriazione.

La scomparsa di queste tracce a nord di Binasco oltre il Ticinello è giustificata dal fatto che qui si trovava probabilmente il confine fra l'agro ticinese e quello di Milano.

La centuriazione di quest'area risale probabilmente al I sec. a.C. quando *Ticinum* divenne, nel 49 a.C., *municipium* romano per opera di Cesare. Dunque i più importanti storici che si sono occupati dello studio della sistemazione della Cisalpina in epoca romana sono concordi nel riconoscere, nelle campagne fra Milano e Pavia, le profonde tracce della pianificazione risalente al I sec. a.C. Il tracciato della *Mediolanum Ticinum* è, almeno nel tratto da Milano a Borgarello, confermato grazie ai segni materiali riconoscibili sul territorio che, oltre a provare l'esistenza di questa via consolare finora conosciuta solo attraverso le notizie date dagli itinerari, ne definiscono chiaramente anche l'andamento.

L'unico tratto della *Mediolanum Ticinum* che pone qualche problema interpretativo è quello fra Borgarello e Pavia, andato completamente perso nella sua consistenza materiale, a seguito della moderna sistemazione del Naviglio e della realizzazione della linea ferroviaria Milano-Genova.

Lo sviluppo nel tempo della ricerca sull'argomento, a partire dalle ipotesi iniziali del Fraccaro, sembra però far prendere corpo abbastanza decisamente alla teoria che quest'ultimo tratto piegasse progressivamente verso Pavia, adattandosi alle caratteristiche fisiche del territorio, fino a raggiungere la Porta settentrionale delle mura romane, attraverso la quale faceva il suo ingresso in città. Conosciuto a questo punto il completo andamento della strada consolare non è difficile definire la probabile posizione degli antichi miliari, benché tutti scomparsi, fissati in numero di 21 dagli antichi itinerari romani (Antonino e Bourdigalense). I toponimi di Quinto Stampi, Ponte Sesto e Cascina Decima sono "segni" forti del percorso stradale romano.

Gli studi sulla campagna ticinese hanno poi messo in evidenza i resti dei cardini e dei decumani della centuriazione che ha profondamente segnato l'organizzazione di questo territorio, tracce scoperte dal Fraccaro, confermate e approfondite dal Tozzi e dettagliate nel presente studio mediante la definizione dell'intera griglia.

Sulla base di questa pianificazione antica si è costruita l'organizzazione agricola e insediativa del territorio.

Le campagne rimangono a tutt'oggi orientate, anche nelle semplici divisioni particellari, come gli assi della centuriazione che, riprendendo peraltro la pendenza del territorio, ben si prestano alle esigenze di irrigazione e scolo delle acque.

Di nuovo si può osservare, con Tozzi, come la presenza della centuriazione e dell'organizzazione agricola impostata nel I sec. a.C. abbia impedito la formazione di insediamenti di dimensioni ragguardevoli, favorendo la dispersione sul territorio di numerosi piccoli centri, alcuni dei quali costituiti da sole cascine, seppur di notevoli dimensioni.

Anche in questo caso è facilmente rilevabile la concentrazione di toponimi di origine romana (con desinenza *-ano*) presenti in gran numero nella porzione di territorio pavese centuriato.

Se questa organizzazione territoriale è giunta fino a noi è grazie alle evolute conoscenze tecnico-scientifiche dei romani che hanno permesso di impostare la pianificazione del territorio adeguandosi il più fedelmente possibile alle caratteristiche geografiche del terreno.

Questo principio, benché perfettamente rispettato nel tracciamento della *Mediolanum Ticinum*, come dimostrato dal Tibiletti⁸ (la direzione data a questa via consolare dipende dalla scelta dei punti di attraversamento dei principali corsi d'acqua), non è stato sufficiente a salvarla dal rapido deterioramento, soprattutto nel tratto fra Basiglio e Mettone, dove incrociava numerosi corsi d'acqua con un'inclinazione troppo pronunciata, quando, caduto l'Impero Romano, è venuta meno l'assidua manutenzione. E' in questa occasione che la strada Vigentina e, più tardi, l'alzaia del Naviglio, hanno preso il sopravvento nella comunicazione viaria fra Milano e Pavia.

La profonda romanizzazione della zona oggetto di studio viene così dimostrata e sistematizzata nel *database* cartografico GIS, nelle tavole tematiche di sintesi e nelle ricognizioni che ne rilevano ad oggi la permanenza sul territorio.

3. Permanenza dei segni, toponomastica ed elementi morfologici

All'interno del GIS il tematismo "Permanenza dei segni" è stato sviluppato su base cartografica CTR 1994 in scala 1:25.000. Esso traduce graficamente l'evidenza della viabilità romana e del sistema centuriato riconosciuto attraverso la ricerca storica. A questa si affianca una lettura dei principali elementi morfologici e l'interpretazione della toponomastica.

Per quanto riguarda la centuriazione romana viene applicato un ulteriore approfondimento, cioè il risultato del confronto tra la cartografia IGM 1889 (base di riferimento degli storici) e la CTR 1994. Tale comparazione mostra la "permanenza" o la "non permanenza" delle tracce centuriate, ed individua:

- la traccia già presente in cartografia IGM 1889 permanente sulla CTR 1994;
- la traccia presente in cartografia IGM 1889 e "labile" sulla CTR 1994;

- la traccia “labile” in cartografia IGM 1889 e “labile” sulla CTR 1994;
- la traccia “labile” in cartografia IGM 1889 e “scomparsa” sulla CTR 1994;
- la traccia non esistente in cartografia IGM 1889 e “ricomparsa” sulla CTR 1994.

Per l'area oggetto di studio è parso opportuno svolgere un'attenta analisi comparata con la toponomastica che ha fornito ausilio alla conoscenza dell'organizzazione delle proprietà terriere, ai latifondi o al loro frazionamento, alle qualità dei terreni coltivati o piantagioni arboree, nonché alle caratteristiche fisiche del territorio stesso.

Esistono comunque due diversi modi di classificare i toponimi: il primo in riferimento alla collocazione temporale ed etnografica (e qui va considerato in modo particolare lo studio linguistico del toponimo: particelle prefisse o suffisse, fonetica con mutamenti di accento, consonanti, ecc. morfologia); il secondo in riferimento alle caratteristiche del territorio.

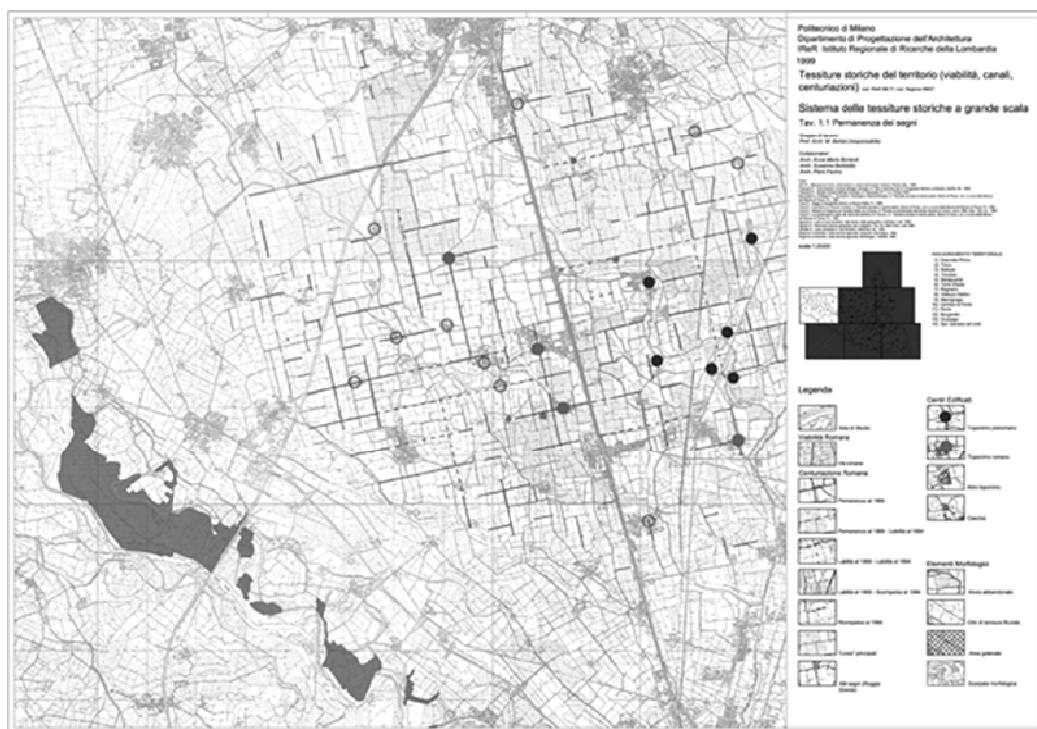


Figura 1 – La permanenza dei segni centuriati e il tracciato della Mediolanum Ticinum tra Milano e Pavia.

Nel caso specifico si sono individuati: toponimi pre-romani, romani, e post-romani. I toponimi latini si localizzano in massima parte sugli assi della centuriazione e lungo i percorsi della viabilità romana. Quelli concentrati nella zona centuriata sono tutti toponimi di origine prediale, cioè derivanti dai nomi personali dei proprietari terrieri, secondo una consueta pratica romana; questo potrebbe confermare la nascita di tali insediamenti contestualmente alla centuriazione del territorio. Le località con toponimi di origine più antica, infatti, sembrano essere localizzate con sostanziale indifferenza per la maglia centuriata (come è giusto che sia dal momento che questa ancora non esisteva), preferendo la vicinanza dei corsi d'acqua. Le centuriazioni, canalizzando l'acqua e portandola in tutto il territorio assieme alle strade, svincolano gli insediamenti romani dal legame con i corsi idrici naturali e danno quindi loro la possibilità di localizzarsi sul territorio secondo una logica diversa. Anche i nuclei medievali sorti nel pavese hanno in gran parte rispettato la regola di

rispetto a quelli secondari), le strade a fondo naturale e a fondo artificiale, secondo la classificazione della CTR 1994. Nei casi in cui i corsi d'acqua si sommano alle strade, questo dato viene cartografato, poiché tale sovrapposizione altro non è che un ulteriore rafforzamento della permanenza della traccia della matrice romana. Particolarmente interessante è il fatto che la permanenza del confine comunale, segno di natura "politica", va a consolidare le tracce della centuriazione.

Dopo aver individuato la permanenza anche qualitativa del segno della matrice romana, ci si è proposti di sondare la quantità delle tracce orientate permanenti all'interno delle singole centurie.

Un tematismo secondario, inserito nella stessa cartografia, è costituito dalle indicazioni delle principali infrastrutture e permanenze storiche con andamento indifferente rispetto alla centuriazione. In particolare questi segni sono: l'Autostrada A7 Milano-Genova, la Ferrovia Milano-Pavia-Genova, il confine del Barco Visconteo e i principali canali artificiali di irrigazione. La finalità del tematismo "Quantità della permanenza" pertanto è volta - dopo aver svolto gli studi analitici preliminari sino a qui descritti - a riconoscere aree con diversi gradi di permanenza, graficamente campite con colori diversi dal più scuro al più chiaro per sottolineare rispettivamente la maggiore o minore concentrazione di segni orientati, da cui emerge in modo evidente l'esistenza di "zone omogenee".

L'analisi così concepita è un valido strumento di sintesi della conoscenza del palinsesto territoriale e potrà costituire premessa adeguata per una pianificazione consapevole volta alla tutela, alla conservazione e alla valorizzazione del territorio.

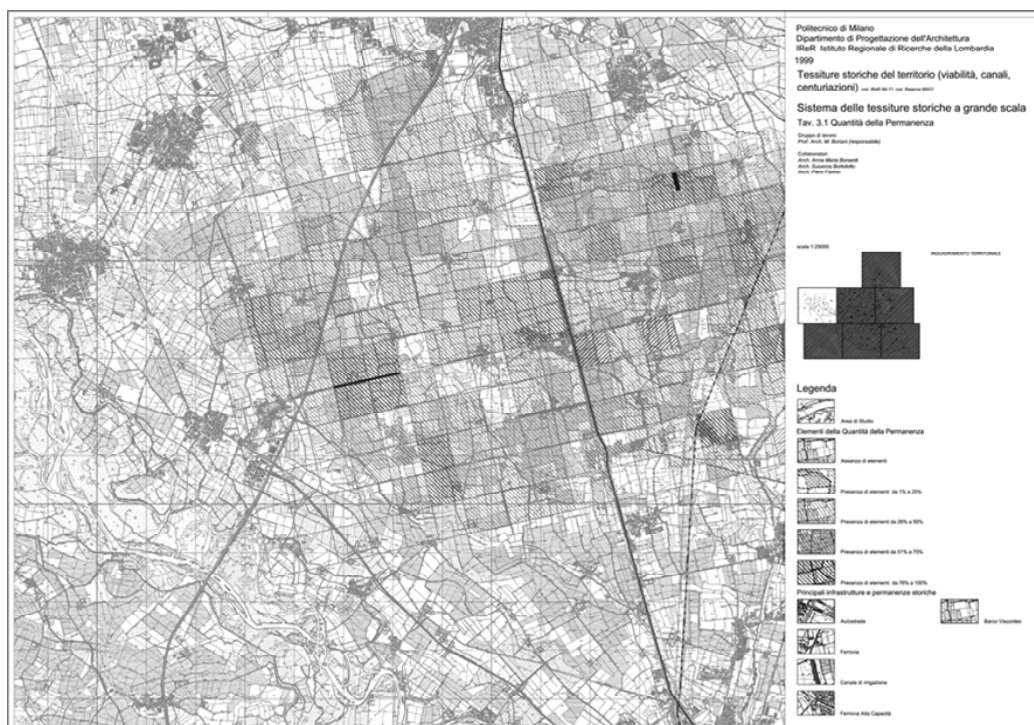


Figura 3 – La quantità della permanenza dei segni centuriati e il tracciato della Mediolanum Ticinum tra Milano e Pavia.

5. Alterazione e degrado della maglia centuriale e della viabilità storica

La centuriazione e la viabilità storica di un territorio sono soggette, con l'evolversi del tempo, ad alterazione o degrado della propria fisionomia originaria. I fattori che determinano la modifica delle tracce di questi segni sono molteplici e rispondono generalmente a motivazioni geomorfologiche e storiche.

Fanno parte del primo gruppo tutti quegli eventi che nel trascorrere dei secoli possono mutare l'assetto geofisico e idrografico del territorio, quali divagazioni di coste e di fiumi, inondazioni, bradisismi. Ma a questi fenomeni di natura precipuamente fisica si legano indissolubilmente altre situazioni storiche ed antropiche che portano a diverse forme di alterazione delle antiche tracce di pianificazione. Primo fra tutti il caso in cui i territori interessati vengono in qualche modo ripianificati: può trattarsi di una seconda centuriazione con nuovo assetto viabilistico che si sovrappone alla prima o di suddivisioni successive di epoca più recente che possono avere orientamento o modulo diversi da quella più antica. Va tenuto presente che il metodo della suddivisione ortogonale viene adottato anche successivamente all'età romana.

In epoca medievale si vengono poi a costituire nuovi insediamenti sul territorio oppure alcuni insediamenti minori acquisiscono via via maggiore importanza: se alcune volte il nuovo impianto urbanistico si adatta alla suddivisione precedente, più spesso questo si localizza con indifferenza rispetto alla centuriazione, trasformandosi in centri di attrazione che determinano un passaggio dal reticolo quadrato a quello "stellare". In questo processo gli antichi *limites* perdono la loro funzione originaria a favore dei nuovi assi, da ritenersi anch'essi di importanza storica, che organizzano il territorio attorno al polo di attrazione. Accanto a queste cause macroscopiche di alterazione, risultato di un processo pianificatorio più o meno cosciente, esistono altre forme di degrado che, pur non sconvolgendo l'assetto generale, intaccano la regolarità dei tracciati, dando inizio ad un processo di erosione del reticolato quadrato e della viabilità originale.

Si cita qui di seguito una casistica mutuata da alcuni studi che, pur non avendo la presunzione di risultare esaustiva essendo questo tipo di degrado strettamente legato alle specificità del territorio stesso, può fornire utili indicazioni sulle indagini da eseguirsi.

Uno dei fattori di degrado più comuni è il sistema idrografico, anche secondario, che può portare, con inondazioni, rotture di argini o deviazioni, alla modificazione dell'andamento del segno centuriale o all'interruzione dello stesso. Si può assistere inoltre, anche a scala minore, al fenomeno di attrazione provocato da emergenze ecclesiastiche, civili, produttive, difensive o passaggi obbligati (ponti) che possono "catturare" i *limites*, generando piccoli "sistemi stellari" o "sdoppiamento degli assi", con conseguente atrofizzazione del segno più antico a favore del nuovo. Un ultimo cenno va rivolto infine ai grossi interventi di infrastrutturazione (strade, bonifiche, trasformazioni colturali, canali) quando si localizzano sul territorio con andamento non orientato rispetto alla sua morfologia storica.

I moderni interventi di infrastrutturazione territoriale (strade a scorrimento veloce, ferrovie, canali artificiali), i grandi insediamenti industriali e terziari, le ricomposizioni agrarie/fondiarie minacciano oggi la rete centuriale residua: le loro logiche sono esterne ai luoghi e alla morfologia del territorio e la capacità di trasformazione e specializzazione del paesaggio stesso sono oggi ben maggiori che non in passato.

6. La pianificazione territoriale: il progetto di salvaguardia e valorizzazione delle tracce di centuriazione

L'individuazione della permanenza della centuriazione nel paesaggio agrario contemporaneo e la conoscenza del suo stato di degrado consentono da un lato una migliore comprensione degli elementi che caratterizzano l'antica organizzazione territoriale, dall'altro esplicitano il punto di partenza per una progettazione di "linee guida" che possono implementare il "Masterplan per la salvaguardia ambientale, la riqualificazione e la valorizzazione delle aree attorno alla Certosa di Pavia". Tale piano costituisce uno dei più significativi strumenti previsti dal PRUSST della zona di Pavia, che ha visto coinvolti la Regione Lombardia, la Provincia di Pavia ed i comuni di Certosa di

Pavia, Borgarello e Giussago, al fine di una consapevole pianificazione del complesso sistema territoriale. In tale ottica è importante la valutazione dell'impatto di nuovi progetti rispetto all'impianto romano. Si può prevedere, in aree dove la persistenza della centuriazione è particolarmente apprezzabile, uno sviluppo contenuto delle unità abitative e degli impianti industriali, per evitare che la caratteristica visione della pianura sia tagliata da volumi incompatibili con le sue originarie caratteristiche paesaggistiche. Occorre evitare che le nuove infrastrutture (ferrovie, canali artificiali, strade a scorrimento veloce, ecc.) creino fratture insanabili all'assetto idrico legato dall'organizzazione territoriale apportata dai romani con la centuriazione. E' bene inoltre includere e verificare nello studio delle V.I.A e V.A.S. (Valutazioni d'Impatto Ambientale e Ambientali Strategiche) gli effetti delle nuove progettazioni sulla maglia centuriale minore; a tal proposito buona norma è quella di adeguare, fin dove è possibile, i tracciati delle grandi infrastrutture alla rete centuriale, sia evitando le aree a maggiore densità di segni, sia mantenendo una coerenza dei nuovi tracciati rispetto agli antichi.

Altro atteggiamento, compatibile e complementare a quanto detto sin qui, è il concetto di rafforzare la traccia centuriata, per esempio sottolineando alcuni assi principali con vegetazione (alberate, siepi, filari). All'interno di una pianificazione mirata si possono prevedere zone di salvaguardia e valorizzazione delle aree meglio conservate, anche attraverso appositi progetti di restauro paesaggistico di questi stessi ambiti territoriali. Importante è programmare, altresì, che la riqualificazione del territorio porti contestualmente allo sviluppo di nuove attività economiche, eventualmente con l'ausilio di finanziamenti agli agricoltori e agli operatori, finalizzati ad una attiva salvaguardia dell'ambiente storico e naturale e al riuso del patrimonio edilizio rurale ancora diffusamente distribuito.

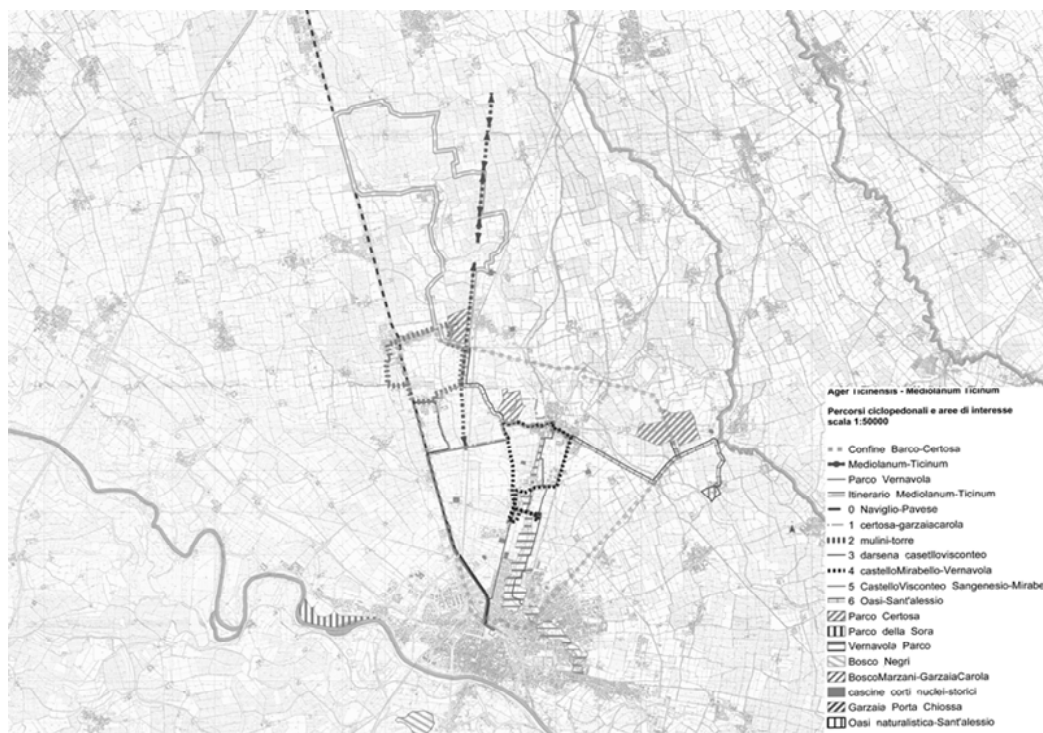


Figura 4 – Mappatura dei percorsi ciclabili esistenti e di progetto in rapporto ai parchi e alle aree paesistico-naturalistiche vincolate.

Infine si prevede la creazione di nuove accessibilità mediante percorsi ciclabili: l'uso agricolo del territorio che lambisce il complesso monumentale della Certosa di Pavia, il parco del Barco Visconteo, le zone vincolate *ex lege* 1089 e 1497 - nel tempo - hanno delimitato, e preservato, aree con forti valenze storico-paesistico-naturalistiche.

La preesistenza del sistema centuriato, la presenza di rogge e mulini, di nuclei rurali di antica formazione, di un sistema di viabilità interpoderale di notevole interesse paesistico, l'esistenza nel territorio pavese dei parchi della Vernavola, della Sora e del Ticino, della Garzaia Carola, dell'Oasi di Sant'Alessio, hanno infatti permesso di proporre aree di salvaguardia e percorsi ciclabili che interessano il territorio compreso tra Milano e Pavia. Itinerari di accessibilità che potranno percorrere il territorio da nord a sud (da Milano a Pavia) lungo l'argine del Naviglio Pavese e da sud a nord (da Pavia a Milano) grazie alla presenza della *Mediolanum Ticinum* che passa accanto alla Certosa. Tale soluzione progettuale, volta a restituire una rinnovata esperienza percettiva del paesaggio, potrebbe riconnettere, all'interno di un unico disegno, trame e segni del palinsesto territoriale attraverso percorsi coerenti con l'obiettivo della valorizzazione paesistico-ambientale circostante il complesso della Certosa⁹.

¹ La Monica G. (a cura di) (1982), *Alois Riegl, Scritti sulla tutela e il restauro*, Ed. San Paolo, Palermo

² Fraccaro P. (1949), "Centuriazioni romane dell'agro ticinese", *Atti e memorie del IV congresso storico lombardo*, Giuffrè, Milano

Fraccaro P. (1946), "Strade romane dell'agro pavese", *Bollettino della società pavese di storia patria*, Pavia

Tibiletti G. (1978), "Problemi gromatici e storici", *Storie locali dell'Italia romana*, Como

Tozzi P. (1974), *Saggi di topografia storica*, La nuova Italia, Firenze.

³ L'*actus* è la base metrica agraria della *centuria* il cui nome deriva dal fatto che, in origine, una *centuria* veniva assegnata a cento possessori, ad ognuno dei quali andavano due *iugeri* che equivalgono ad un *heredium*.

⁴ Si veda nota 2.

⁵ Si veda P. Fraccaro, 1946.

⁶ Si veda P. Fraccaro, 1949.

⁷ Si veda P. Fraccaro, 1949.

⁸ Si veda G. Tibiletti, 1978.

⁹ Ad Anna Maria Boniardi si deve l'apporto scientifico della sua tesi di laurea dal titolo *La Mediolanum Ticinum e il parco delle centuriazioni: proposta di tutela e valorizzazione di un ambito paesistico di matrice romana*, Relatore M. Boriani, Correlatore S. Bortolotto, a.a. 1997/1998. Nel presente testo i paragrafi 1 e 2 sono da stati scritti da Susanna Bortolotto; i paragrafi 3 e 4 da Piero Favino; i paragrafi 5 e 6 da Raffaella Simonelli.

Nuove esperienze di documentazione territoriale con tecnologia LIDAR del B.I.M. dell'Adige ed analisi critica delle risultanze

Narciso Bonuzzi (*), Giampaolo Mistura (**), Marco Michelini (***), Mario Fondelli (****), Mario Gasperi (*****), Simone Ceresini e Andrea Orsi (*****).

(*) Consulente del Consorzio di Bacino Imbrifero Montano dell'Adige della Provincia di Verona
Via Barco di Sotto 1, 37030 Lavagno (VR), Tel. 045.983229, e-mail: narcisobonuzzi@gmail.com

(**) Professore Associato, Dipartimento di Fisica G. Galilei, Università di Padova, Via F. Marzolo 8, 35121 Padova
Tel. 049.8277020, e-mail: giampaolo.mistura@unipd.it

(***) Fotogrammetra, Studio A, Via Antonio Meucci 3, 50015 Grassano, Bagno a Ripoli (FI)
Tel. 055.644081, e-mail tecnico@studioafi.it

(****) Già Professore Ordinario di Topografia nella facoltà di ingegneria dell'Università di Firenze e
Università IUAV di Venezia, Facoltà di Pianificazione del Territorio, Via Jacopo Nardi 50, 50132 Firenze
Tel. 055.243898, e-mail: m.fondelli@3consulting.it

(***** MG URBAN PLANNING, Via Seregnano 50/A Loc. Civezzano, 38045 Trento, Tel. 0461.858860
e-mail: gaspermario@gmail.com

(***** Esperti tecnologia LIDAR, BlomCGR, Via Cremonese 35, Parma, Tel. 0521994948
e-mail: simone.ceresini@blomasa.com – andrea.orsi@blomasa.com

Riassunto

La coincidenza di un rilievo su area vasta con la tecnologia a sensore passivo quale quella aerofotogrammetrica e a sensore attivo *laser scanning* – *LiDAR* ha offerto l'opportunità di metterle a confronto per valutarne le peculiarità in termini metrico/qualitativi. In particolare è stata posta attenzione alla quarta risposta del segnale laser ossia all'intensità per valutare se questa preziosa informazione poteva essere messa in relazione con le precisioni del rilievo.

Abstract

I find the coincidence of a vast areas of the passive sensor technology such as that aerophotogrammetric and the active laser sensor scanning – LiDAR has the opportunity to compare them to assess their characteristics in terms metric / qualitative. In particular attention was paid to the fourth response of the laser signal intensity or to determine whether this valuable information could be related with the precision of the survey.

Il Consorzio del Bacino Imbrifero Montano dell'Adige di Verona, di seguito denominato Consorzio B.I.M. Adige, riunisce quell'insieme di territori, perimetrati per decreto del Ministero dei Lavori Pubblici, le cui acque confluiscono in un ampio territorio circostante, punto di confluenza di un intero sistema idrografico, ovvero la valle dell'Adige e il Lago di Garda.

Ad esso aderiscono ventinove comuni: Malcesine, Ferrara di Monte Baldo, Brentino Belluno, San Zeno di Montagna, Caprino Veronese, Rivoli Veronese, Dolcè, Sant'Anna d'Alfaedo, Fumane, Sant'Ambrogio di Valpolicella, Marano di Valpolicella, Negrar, Boscochiesanuova, Grezzana, Cerro Veronese, Roveré Veronese, Erbezzo, Velo Veronese, San Mauro di Saline, Verona, Mezzane di Sotto, Selva di Progno, Badia Calavena, Tregnago, Vestenanova, San Giovanni Ilarione, Cazzano di Tramigna, Roncà, Montecchia di Crosara.

Il Consorzio B.I.M. Adige, costituitosi nel 1954, è il destinatario degli indennizzi per i disagi conseguenti alla realizzazione di bacini, impianti per la produzione di energia idroelettrica nelle aree montane previsti dall'applicazione della Legge 27 dicembre 1953 n. 959, (detta anche Legge sull'Economia Montana) la quale prevede un sovracano a carico dei concessionari di derivazioni

d'acqua pubblica finalizzata alla produzione di forza motrice, e di quanti hanno opere di presa sopra i 500 metri all'interno del bacino imbrifero dell'Adige.

In coerenza con quanto indicato nella Legge suddetta, il Consorzio B.I.M. Adige, all'art. 2 del proprio Statuto, ha posto, quale obiettivo centrale della propria operatività, l'attivazione di tutte le iniziative e le incentivazioni idonee a favorire lo sviluppo economico e sociale della montagna veronese secondo una programmazione triennale da realizzare con investimenti annuali specificamente destinati.

Considerato che le realtà comunali ricomprese nell'ambito territoriale consortile, sono caratterizzate da:

- territori di dimensioni modeste con peculiarità altimetriche tali da comportare disagi nella fornitura dei servizi e nelle attività di controllo;
- strutture gestionali assai ridotte (uffici tecnici sguarniti e/o affidati a personale esterno);
- conoscenza approssimativa del territorio, conseguente a rilievi parziali, spesso realizzati in modo impreciso e/o da terzi con inadeguata competenza;
- cronica carenza di risorse umane e tecnologiche

e rilevato, altresì, che per tutti i Comuni è vitale la conoscenza puntuale del proprio territorio e la possibilità di seguirne l'evoluzione in tempo reale, il Consorzio B.I.M. Adige ha da tempo posto in essere il progetto "SER.P.I.CO." (Servizi Permanenti Informativi Comunali), che si configura come un intervento strategico globale di sistema finalizzato a fronteggiare e risolvere le difficoltà funzionali proprie dei sistemi operativi dei singoli Comuni.

L'impiego costante e organicamente strutturato di tecnologie innovative al servizio della struttura organizzativa del Consorzio B.I.M. Adige in appoggio alle realtà locali, ha consentito di sviluppare sinergie ad alta efficienza e stringente efficacia operativa.

Ciò ha garantito, oltre ad un'altrimenti impensabile linearità di funzionamento, anche notevoli vantaggi in termini economici e temporali, favorendo, aspetto di non minore importanza, l'integrazione armonica di ambienti amministrativi non sempre in grado di assettarsi adeguatamente fra loro in modo veloce e proficuo.

Ne è nata una sorta di holding tecnico-amministrativa funzionalmente calibrata sulle complesse esigenze di un territorio articolato e multiforme, ancorché sostanzialmente omogeneo sul piano ambientale, morfo-geologico e amministrativo.

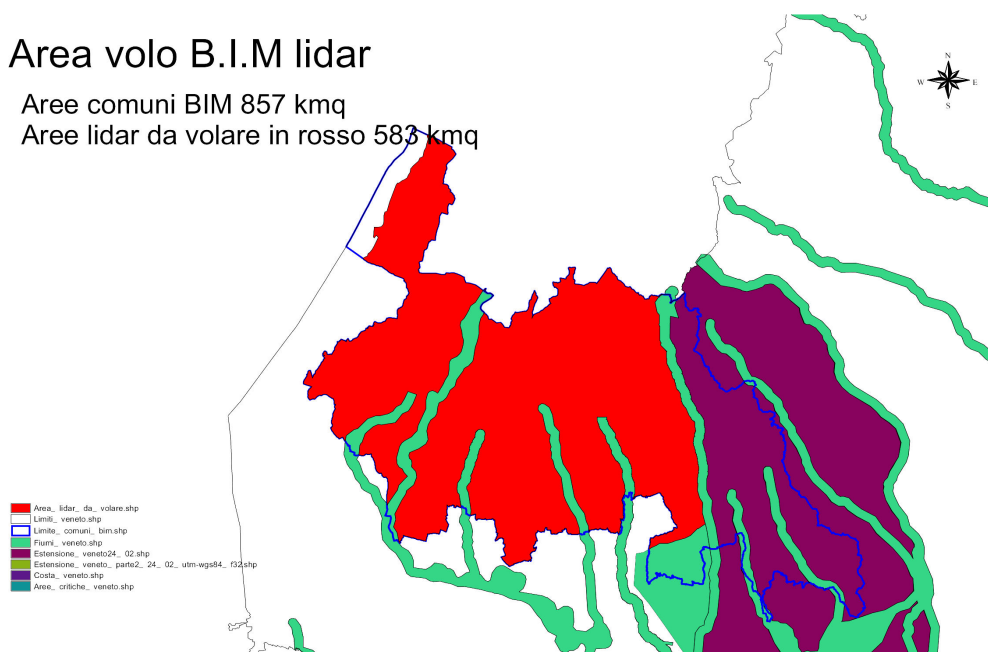
Dopo la costituzione del polo tecnico presso il Consorzio B.I.M. Adige, che garantisce nel tempo, la raccolta e la diffusione di dati e servizi ai Comuni, è scaturita l'urgenza di adeguare i sistemi informativi comunali con dati aggiornati e innovativi; pertanto a seguito dell'avvio dei lavori di formazione della nuova CTRN e DB geografico in collaborazione con la Regione del Veneto, e del visualizzatore nadirale/prospettico metricamente sensibile, è stata avviata la campagna di voli per l'acquisizione della scansione laser aerea di parte del territorio consortile.

Tale rilievo è integrato nel Progetto Nazionale di Telerilevamento del Ministero dell'Ambiente a completamento di quanto già realizzato dal Ministero rappresentato nella figura seguente:

Area volo B.I.M lidar

Aree comuni BIM 857 kmq

Aree lidar da volare in rosso 583 kmq



1. Territorio interessato dal progetto del rilievo Laser Scanning-LiDAR.

Al progredire della domanda di informazioni territoriali per la gestione delle risorse naturali e antropiche ha offerto in questi ultimi tempi, un prezioso contributo il *laser scanning 3D*, nella sua applicazione aerospaziale *LiDAR* (*Light Detection And Ranging*). Un sistema ottico di prospezione a scansione, che usa lunghezze d'onda ultraviolette, nel visibile o nel vicino infrarosso, utilizzando la tecnologia *laser* per misurare la distanza tra il punto di emanazione dell'impulso laser e gli ostacoli che ne generano la riflessione, per ricavare modelli digitali virtuali delle superfici DSM (*Digital Surface Model*) e DTM (*Digital Terrain Model*), con una notevole densità di punti del relativo spazio XYZ, caratterizzati da una alta georeferenziazione spaziale.

Allo stato dell'arte, come noto, gli orientamenti operativi nel settore dei rilevamenti ambientali, tendono, in generale, a preferire le tecnologie dei sistemi di *remote sensing* attivi. I principali vantaggi di queste tecnologie sembrano risiedere nell'elevata precisione assicurata dai dati osservati, nella immediatezza delle misure, nella sensibilità alla natura fisica degli oggetti illuminati, nel controllo della sorgente di energia emessa. E questo, perché l'acquisizione dei dati osservati presenta alcuni importanti meriti operativi rispetto alle tradizionali tecnologie passive, come l'aerofotogrammetria, dato che la resa finale delle misure non è influenzata dal livello di insolazione degli oggetti osservati e il sensore attivo non è direttamente disturbato dalle variazioni meteorologiche.

Ricerche sperimentali hanno recentemente messo in luce che la percezione della forma non è soltanto un problema di geometria spaziale, ma soprattutto un problema fisico degli oggetti illuminati, dato che la precisione metrica conseguibile nei processi di rilevamento *LiDAR* può variare al mutare delle proprietà fisiche dei materiali costituenti gli oggetti di volta in volta esaminati. Poiché la luminosità del segnale di ritorno all'emittente laser scanner, dagli oggetti di volta in volta illuminati, derivante dal bilancio energetico tra emissione, assorbimento e riflessione, differisce al variare della natura fisica propria degli stessi materiali interessati, della loro porosità intrinseca e della loro posizione nello spazio 3D che li accoglie.

Al fine di colmare, almeno in via preliminare, le lacune finora rilevate sulla surrogabilità o meno dei dati osservati con l'uno o l'altro sistema, in relazione ad una loro integrazione reciproca, per un monitoraggio nel tempo degli stati di consistenza e di conservazione del patrimonio architettonico ed ambientale, è stato dato avvio di recente ad una valutazione delle discrepanze deducibili dal confronto dei modelli digitali del terreno di una stessa area campione territoriale, ottenibili dall'alternata applicazione delle due diverse metodologie, passiva e attiva.

Per questa preventiva analisi sperimentale, è stato prezioso il *test* offerto dalla documentazione in corso d'opera dell'area del Consorzio B.I.M. Adige, sottoposta ad una copertura aerofotogrammetria a colori, realizzata con *Digital Mapping Camera DMC* dalla quota relativa media di volo di 1.700 m circa, e ad una congiunta scansione laser della stessa area territoriale, tramite il *Sistema Lidar Optech Pegasus*, operante da quota relativa di 1.600 m circa, ottenendo una densità media di punti pari a circa 2 punti/m². Sensore di ultima generazione che ha le seguenti caratteristiche:

Parametri	Caratteristiche
Operatività	Tra 300m e 2500 m di quota di volo relativa
Accuratezza orizzontale	1/5.500 x quota di volo relativa; 1 σ
Accuratezza verticale (1 σ)	< 5 – 15 cm; 1 σ
Acquisizione dell'impulso	4 misure per ciascun impulso
Acquisizione dell'intensità	12 bit dinamici per ciascuna misura
Angolo di scansione	Programmabile fino a 65° max
Abbracciamento	Variabile da 0 a 0,93 x la quota relativa (m)
Sistema GPS/inerziale	Applanix-Optec custom POS con ricevitore interno a 12 canali Dual frequency a 10 kHz
Frequenza di scansione	Programmabile da 100 a 400 kHz
Divergenza del raggio laser	0,20 mrad (impronta a terra di 20 cm a 1000 m di quota)

Un *test* quello sviluppato, che fatte le debite constatazioni qualitative e dimensionali, poteva fornire appunto validi elementi di giudizio e di indirizzo per un eventuale più approfondito confronto tra i due diversi sistemi di *remote sensing*, quello LiDAR e quello aerofotogrammetrico, mirato soprattutto alla documentazione del patrimonio architettonico ambientale per la relativa salvaguardia delle risorse naturali ed antropiche.

Prendendo le mosse dall'opportunità di verificare l'affidabilità di un rilevamento topo-cartografico realizzato a partire da una copertura aerofotogrammetrica digitale a colori, e la corrispondente affidabilità di una sistematica scansione *LiDAR*, interessanti ognuna la stessa area sperimentale territoriale, si è così provveduto ad un approfondito saggio comparativo degli elaborati prodotti dai due sistemi, e successivamente ai necessari diretti riscontri di verità sul terreno.

L'esame è stato effettuato portando a confronto varie sezioni longitudinali altimetriche della stessa lunghezza di 500 m circa, opportunamente situate ed orientate: sono stati confrontati i due diversi modelli digitali virtuali risultanti, ottenuti dall'applicazione coniugata del sistema fotogrammetrico passivo e del sistema *LiDAR* attivo, nonché del rilevamento topografico diretto *GPS* per il necessario controllo metrico finale.

Dall'insieme delle 15 sezioni *test* realizzate ne sono state estratte in seguito 3 a campione per una più approfondita diretta verifica a verità sul terreno, mediante appropriate e accurate determinazione *GPS*.

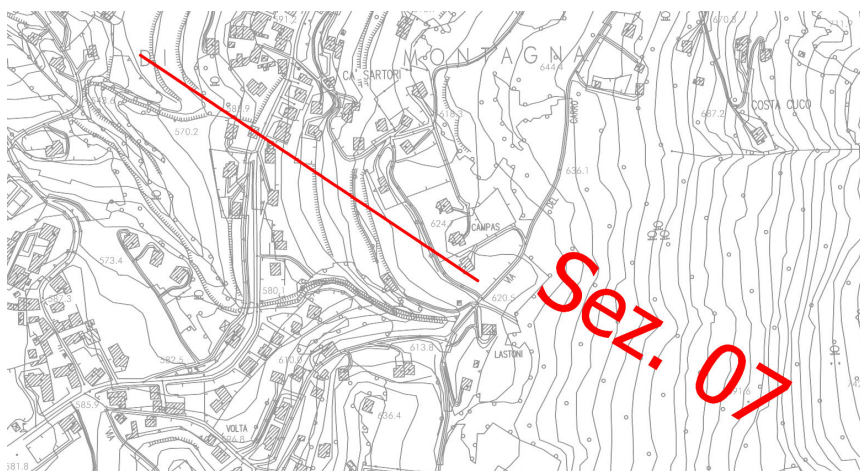
I risultati ottenuti dalle comparazioni medesime sono definiti dalle discrepanze altimetriche medie quadratiche che seguono:

- a) scansione *LiDAR* - cartografia aerofotogrammetria: $\pm 0,19$ m
- b) scansione *LiDAR* - verità a terra *GPS*: $\pm 0,25$ m
- c) cartografia aerofotogrammetria - verità a terra *GPS*: $\pm 0,23$ m

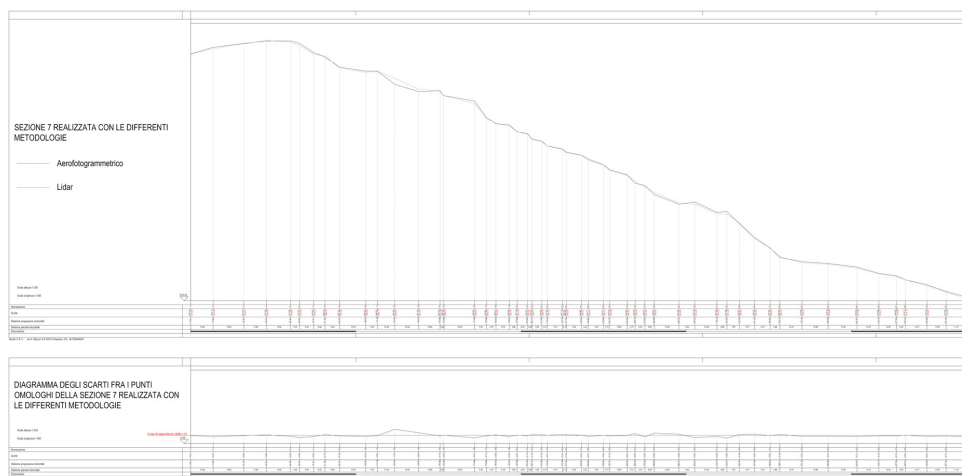
che chiaramente mostrano come le discrepanze fra le misure attive e quelle passive, od errori sperimentali di misura, presentino fra loro una congruente omogeneità e compatibilità.

Entità definite, nelle misure col *LiDAR*, dalla variazione del segnale laser di ritorno, definita dalla variazione dell'intensità della luminanza riflessa, che secondo quanto mostra il diagramma della sezione 7, sembra condensare i valori minori delle discrepanze nelle aree di maggior riflessione degli oggetti illuminati ed i relativi valori maggiori in quelle di minor riflessione, o di maggior assorbimento. Nel diagramma la graduazione dei livelli dell'intensità di luminanza riflessa è stata espressa per maggior evidenza attraverso una semplice scalatura decimale.

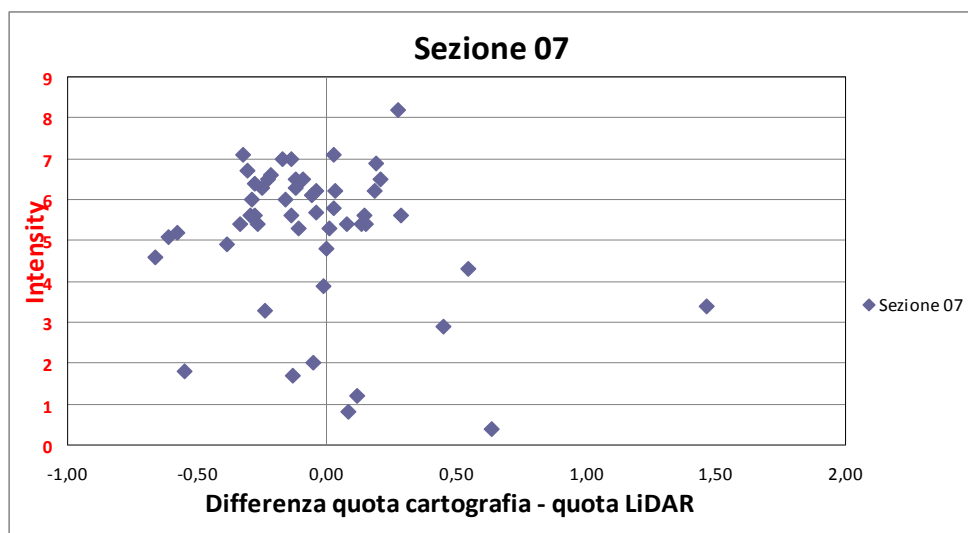
Per maggior chiarezza sono riferiti di seguito per la medesima sezione 7 a campione, nell'ordine: la rappresentazione cartografica del territorio interessato dalla sezione campione, i profili altimetrici derivati dal metodo aerofotogrammetrico, dall'esplorazione LIDAR e dalle determinazioni *GPS a verità* sul terreno, nonché la distribuzione di densità degli scarti ottenuti in relazione all'intensità della relativa luminanza di ritorno.



2. Tracciato su CTRN della sezione n. 7 di verifica e controllo dei diversi rilievi.



3. Grafico dei profili aerofotogrammetrico-LiDAR-GPS della sezione n. 7.



4. Grafico di dispersione della misura di intensità riferita alle differenze di quota tra il rilievo aerofotogrammetrico e quello LiDAR.

Fatte le opportune riserve sull'accuratezza o meno delle analogie proposte, il *test* sviluppato sembra dunque evidenziare la possibilità di ottenere un'affidabile omogeneità metrica e qualitativa dei dati numerici ricavabili dall'applicazione simultanea delle tre diverse metodologie sperimentate messe a confronto. Per cui se ne può agevolmente dedurre, che il loro impiego nel monitoraggio programmato degli stati di consistenza e salvaguardia del patrimonio architettonico ed ambientale, non possa sollevare incertezze nella loro alternanza operativa, quando rimangano identiche le condizioni della misura.

Ampiamente confermato appare comunque l'interesse scientifico dell'*intensità della luminanza riflessa*, nella corretta interpretazione dei dati provenienti dal *sistema attivo*, poiché consente di attribuire il grado di affidabilità dei dati osservati e di selezionarne la relativa qualità informativa. Così come, appare importante l'incremento della *densità della nuvola di punti* per unità di superficie, preziosa per assicurare ai dati metrici richiesti una migliore accuratezza.

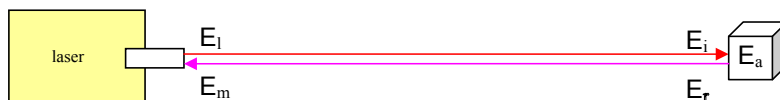
Una sorta di metadati questi, indispensabili per l'apprezzamento della precisione della misura metrica e per rilevare altresì la discontinuità delle caratteristiche fisiche dei materiali costitutivi degli oggetti terrestri di volta in volta illuminati dalla sorgente energetica controllata. Visto che, riepilogando, l'intensità del segnale retroriflesso può esprimere il peso da attribuire al dato osservato, mentre la densità dei punti della nuvola può altresì esprimere l'accuratezza del DTM dal quale potrà essere infine estratto lo stesso dato osservato.

È comunque evidente come il sistema attivo LIDAR possa avere ulteriori imprevedibili sviluppi con l'acquisizione dei modelli digitali virtuali degli oggetti esplorati, quando la tecnologia *laser scanning* sarà in grado di realizzare, con la nuvola di punti dello spazio XYZ considerato, anche la copertura fotografica dello stesso spazio, mediante l'impiego di opportune fotocamere metriche digitali coassiali incorporate nel medesimo sensore attivo.

Dalla fusione delle metodologie attiva e passiva, sembrerebbe possibile pervenire infine anche alla percezione della firma spettrale degli stessi oggetti illuminati, utile a riconoscerne nel contempo la loro natura fisica e tecnologica.

Dall'analisi comparata di tutte le quindici sezioni di controllo rilevate con particolare riguardo al valore dell'intensità del raggio riflesso o intensità misurata che contiene informazioni sulla natura della superficie riflettente, si è provveduto a tracciare un bilancio energetico del lanciato fascio

luminoso emesso dalla strumentazione laser per evidenziare, sinteticamente, alcuni elementi utili al confronto:



E_l = energia emessa dal laser;

E_i = energia incidente;

E_a = energia assorbita;

E_r = energia riflessa;

E_m = energia misurata;

da cui,

$$E_i = E_l - E_a \quad [1]$$

L'energia riflessa dalla superficie E_r può essere espressa come

$$E_r = E_i \times R \quad [2]$$

dove R è il coefficiente di riflessione o riflettanza che dipende da moltissimi fattori, tra cui la natura della superficie riflettente. La riflettanza è una quantità adimensionale e numericamente $0 \leq R < 1$ dove i due valori limite 0 (1) si riferiscono ai casi ideali di un corpo perfettamente assorbente (riflettente).

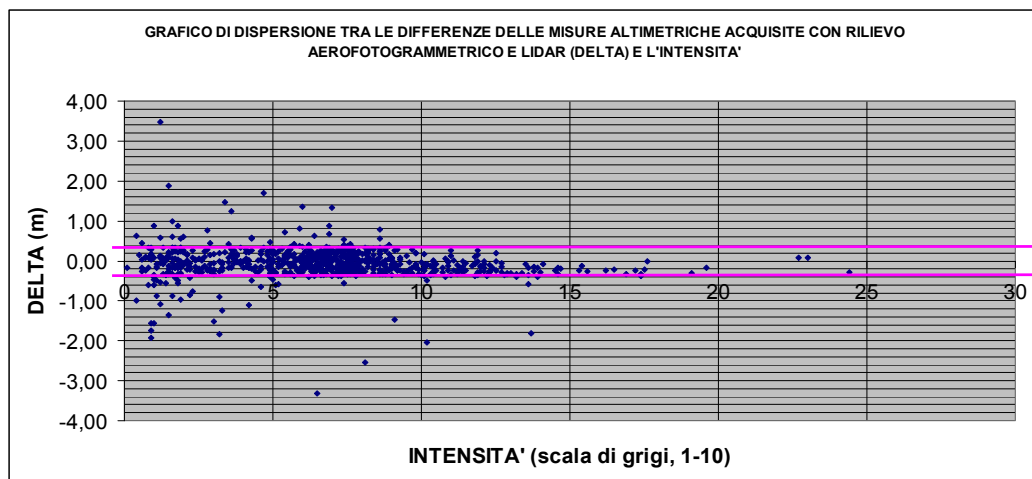
L'energia misurata dal rivelatore montato sull'aereo E_m è quindi il risultato del bilancio energetico

$$E_m = (E_i - E_a) \times R - E_a \quad [3]$$

Se si considera un'area media della sezione a terra del fascio luminoso A , le considerazioni precedenti possono applicarsi anche alle corrispondenti intensità luminose essendo le intensità proporzionali al rapporto E/A .

L'ingegnerizzazione digitale ha reso le strumentazioni elettroniche utilizzate oggi estremamente efficienti; pertanto, considerato che nella tecnica LIDAR il segnale laser riflesso spegne un temporizzatore che conta il tempo di volo del fascio dalla sua emissione alla sua rivelazione, è lecito assumere che questa operazione non sia influenzata dall'intensità misurata, se questa è superiore ad una determinata soglia. In altre parole, possiamo aspettarci che la determinazione altimetrica non sia influenzata dal valore dell'intensità del fascio.

Per verificare questa ipotesi sono stati prese in considerazione simultaneamente i dati delle quindici sezioni di controllo acquisite a campione sul comprensorio. Le misure LIDAR sono state confrontate con quelle effettuate con il rilievo aerofotogrammetrico. La differenza tra le due misure, indicata con delta, è stata graficata in funzione dell'intensità rilevata del fascio laser.



5. Grafico di dispersione della misura di intensità riferita alla differenze di quota tra il rilievo aerofotogrammetrico e quello LiDAR per tutte le quindici sezioni.

Come si vede, nell'intervallo di intensità esplorato compreso tra 1 e 10 i valori Delta si distribuiscono in modo essenzialmente uniforme in una fascia orizzontale avente una larghezza (dispersione) pari a circa $20 \div 30$ cm. I valori più lontani da questa fascia sono dovuti ad errori accidentali corrispondenti a situazioni anomale che disturbano la misura (alberi, siepi, ombre, fabbricati, ecc.) che possono essere eliminati, di cui si fornisce esempio di seguito:

Punto	est	nord	Z-cartografia	Z-LiDAR	delta	note	intensità
38	634860.96	5054981.14	631.88	631.22	-0.66	Siepe	4.6



6. Posizione del raggio laser corrispondente a situazione anomala che ne disturba la misura.

Il risultato finale del *test* è chiaro: le incertezze sulla rilevazione non dipendono dall'intensità rilevata del fascio laser e sono comprese in un intervallo (una deviazione standard) di circa $20 \div 30$ cm. Si ribadisce quindi che la precisione non è influenzata direttamente dall'intensità del raggio riflesso, gli errori si distribuiscono in modo gaussiano indipendentemente dall'intensità misurata.

È evidente quindi, a meno di ulteriori riflessioni, che un'interessante ipotesi di lavoro è quella di sfruttare l'intensità del fascio laser riflesso per la classificazione dei materiali riflettenti (biomasse, amianto, ecc). Proprio la quantificazione e classificazione delle biomasse presenti sulla montagna veronese potrebbe essere uno dei settori sui quali il Consorzio B.I.M. Adige potrebbe orientare la propria attenzione, utilizzando il rilievo *laser scanning - LiDAR*, nell'immediato futuro.

Riferimenti bibliografici

(M. Fondelli, M. Gasperi, A. Floris 2010), "Analisi qualitativa del dato LiDAR nell'informazione territoriale ad alta risoluzione". Atti 14° Conferenza Nazionale ASITA. Brescia 9-12 novembre 2010.

(M. Kasser and Y. Egels 2002), "Digital Photogrammetry". Taylor & Francis Ltd. London, 2002.

(US Geological Service NGP 2010), "Lidar Guidelines and Base Specification". February 22, 2010.

Telerilevamento HR multispettrale/LIDAR e modellistica SVAT 3D per la stima del bilancio energetico in ambiente urbano

Flavio Borfecchia (*), Luigi De Cecco (*), Maurizio Pollino (*),
Sandro Martini (*), Luigi La Porta (*), Michele Zinzi (**), Emiliano Carnielo (***)

(*) ENEA, Unità Tecnica Modellistica Energetica ed Ambientale (UTMEA), Laboratorio Analisi e
Osservazione del sistema Terra (TER)

(**) ENEA, Unità Tecnica Efficienza Energetica (UTEE-ERT)

(***) Università degli Studi Roma Tre

Centro Ricerche Casaccia, Via Anguillarese 301, 00123 Roma
Tel. 06.3048.6042, Fax 06.3048.3362, flavio.borfecchia@enea.it

Riassunto

Le grandi città, collocate nelle zone meteo-climatiche calde, come quella del bacino del Mediterraneo, a causa dei cambiamenti climatici sono sempre più soggette a fenomeni legati all'aumento di temperatura rispetto ai dintorni rurali, meglio noti come isole di calore (*Urban Heat Island*), rilevanti specialmente nelle loro aree centrali più dense ed antropizzate. Attualmente più del 50% della popolazione mondiale vive in agglomerati urbani che crescendo, spesso senza appropriata pianificazione, aumentano le loro infrastrutture, con notevoli cambiamenti nel *land cover/use* e conseguenti apprezzabili modificazioni nei parametri biofisici relativi al bilancio radiativo, al ciclo idrologico ed al microclima. Il conseguente impatto sui consumi energetici e sulla qualità dell'ambiente urbano in termini di salubrità e confort costituisce uno dei problemi più gravi che impegna le amministrazioni per la messa a punto di strategie di mitigazione dei fenomeni che, per poter essere efficaci, necessitano d'informazioni aggiornate ed a scale spazio-temporali adeguate alle quali le più recenti tecniche di osservazione aerospaziale basate su piattaforme satellitari ed aeree possono dare un contributo rilevante. In quest'ottica, l'attività qui descritta consiste pertanto nello sviluppo di metodologie integrate per il monitoraggio di parametri strutturali, climatologici e di qualità dell'ambiente urbano tramite dati di osservazione aerospaziale della terra, modellistica e rilievi in sito. In particolare, l'obiettivo è quello di supportare la caratterizzazione dei consumi energetici e di fenomeni attinenti all'inquinamento atmosferico ed all'isola di calore (UHI), legati anche all'impatto delle attività antropiche ed ai cambiamenti climatici. Un aspetto rilevante della ricerca riguarda il supporto alla sperimentazione condotta dal settore energetico dell'ENEA e connessa all'introduzione nel contesto urbano di materiali strutturali e di copertura innovativi (*cool material*) dalle caratteristiche adatte a massimizzare il potere di riflessione della radiazione solare delle superfici nella prospettiva di mitigare i fenomeni suddetti. Le metodologie proposte, basate su tecniche di image processing e GIS, prevedono l'uso integrato di dati provenienti da rilievi LiDAR, unitamente a riprese multi/iperspettrali satellitari ed aeree ad alta risoluzione spaziale (HR), per la caratterizzazione geometrica 3D e tipologica di un ambiente urbano a scala di dettaglio (risoluzione ~1-10 m.) nelle sue componenti di tipo infrastrutturale, della vegetazione e del suolo. Tali risultati sono poi utilizzati per la configurazione semiautomatica degli input ad un modello di tipo SVAT (*Soil Vegetation Atmosphere Transfer*) 3D che ha consentito di simulare le distribuzioni spaziali a scala locale con le relativa dinamica temporale delle varie variabili d'interesse su aree del comune di Avellino e Roma a partire dai valori di alcuni parametri atmosferici iniziali, della locazione geografica e del periodo dell'anno.

Introduzione

Il tessuto urbano, rispetto alle aree rurali, è caratterizzato da una più alta eterogeneità dovuta alla presenza d'infrastrutture e materiali aventi caratteristiche termiche e di riflettanza notevolmente variabili la cui discriminazione estensiva richiede sovente tecniche di telerilevamento ad elevato livello di dettaglio. In questo contesto, le più recenti tecniche di osservazione aerospaziale multispettrale ad alta risoluzione a terra basate su piattaforme satellitari ed aeree possono dare un contributo rilevante a tali esigenze ma devono essere integrate da modellistica adeguata per sopperire alle necessità d'informazioni sulla dinamica temporale dei fenomeni legata alle interazioni che coinvolgono il suolo e l'atmosfera. Tipicamente infatti tali piattaforme satellitari sono collocate in orbita polare con periodi tipici di rivisitazione, alle nostre latitudini, di giorni, e quindi non in grado di permettere l'acquisizione di dati capaci di supportare un monitoraggio efficace della dinamica temporale dei fenomeni di scambio di calore ed acqua tra suolo ed atmosfera che governano il microclima urbano, la cui evoluzione si basa su cicli diurni (Figura 1), con tempi caratteristici inferiori all'ora.

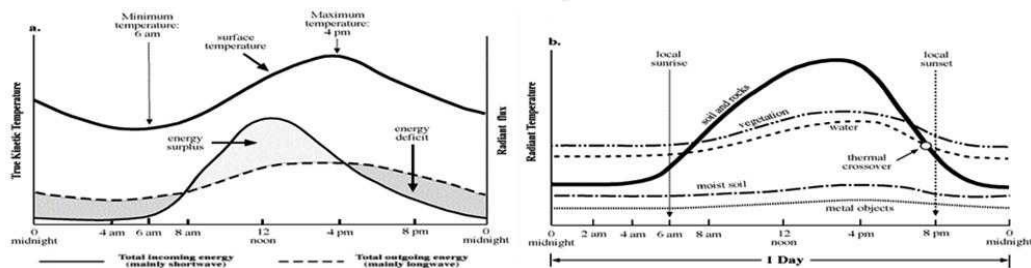


Figura 1 – Cicli giornalieri di flussi energetici (a sinistra) e temperature (a destra) nella vegetazione e nei vari materiali ed infrastrutture.

I dati satellitari sono rilevati tipicamente con varie periodicità da sensori su piattaforme in orbita polare o geostazionaria. I sensori in orbita polare, collocati mediamente a 400-800 Km dalla superficie terrestre, sono basati prevalentemente su sistemi passivi od attivi di acquisizione dei segnali elettromagnetici di risposta dalla superficie terrestre ed hanno caratteristiche spettrali, di risoluzione radiometrica e spaziale di maggior interesse in questo contesto. La loro periodicità di ripresa dipende in prevalenza dalla risoluzione spaziale e dalla copertura della frame ma anche dalla loro capacità di orientamento “in flight” del sensore verso l’area target anche da orbite diverse, in ogni caso i valori minimi non scendono al di sotto di 0,5-3 giorni. Le risoluzioni spaziali variano da valori submetrici a vari Km, mentre le bande di acquisizione, per quanto attiene i sistemi multi/iperspettrali passivi, notevolmente diffusi, si distribuiscono negli intervalli dal visibile, al NIR (Near InfraRed) e SWIR (Short Wave InfraRed) sino al TIR (Thermal Infra Red) e risultano utili per la caratterizzazione dei materiali e della vegetazione anche dal punto di vista del bilancio energetico e termico, alla base della modellistica SVAT. I modelli SVAT sono rappresentazioni matematiche dei vari meccanismi fisici interagenti che controllano i trasferimenti di energia e di massa tra suolo vegetazione ed atmosfera (bilanci radiativo e idrico) utilizzate sotto forma di codici informatici per simulazioni deterministiche degli andamenti temporali delle variabili di stato d’interesse relative ai tre mezzi a scale temporali compatibili con quelle dei vari processi, tipicamente quelli atmosferici, che in genere risultano maggiormente dinamici.

Materiali e metodi

Specialmente nelle aree urbane la grande varietà di superfici differenti e delle infrastrutture può produrre una varietà di distinti sistemi microclimatici. Per simulare convenientemente questi tipici effetti locali (i.e. effetto canyon) è necessario considerare non solo gli schemi di interazione a

microscala superficie-pianta-aria ma si deve tener conto adeguatamente anche delle infrastrutture presenti che giocano un ruolo rilevante negli scambi e nelle resistenze aerodinamiche al flusso d'aria all'interno del tessuto urbano dove i meccanismi di feedback tridimensionale tra vegetazione lungo i viali e le superfici artificiali possono avere un peso significativo. In quest'ottica non solo risulta importante la caratterizzazione radiometrica delle infrastrutture ma anche la stima adeguata dei loro parametri geometrici tridimensionali relativi sia all'estensione delle superfici interagenti che agli ostacoli che determinano i flussi turbolenti di aria all'interno del "urban canopy". Per queste esigenze, è stato utilizzato il modello SVAT 3D non-idrostatico ENVI-met¹ (Bruse & Fleer, 1998), che, tramite i metodi di discretizzazione spaziale e temporale CFD (*Computational Fluid Dynamics*), è in grado di simulare i flussi di vapore e calore tenendo conto degli ostacoli tridimensionali rappresentati sia dalle infrastrutture artificiali che dalla vegetazione, caratterizzata anche dai parametri specifici di densità fogliare e capacità di evapo-traspirazione (stomi). Il codice è in grado di trattare adeguatamente anche le interazioni che coinvolgono i suoli tenendo conto delle specifiche caratteristiche radiative, termiche ed idrauliche. Le sue simulazioni permettono di stimare le distribuzioni delle variabili di stato specifiche relative alla vegetazione, al suolo ed all'atmosfera dell'area d'interesse nonché il loro andamento temporale, tipicamente giornaliero. In aggiunta il codice ENVI-met prevede la valutazione di mappe tematiche analoghe relative alla diffusione d'inquinanti (particelle o gas) o a parametri legati al confort umano. Le simulazioni del codice ENVI-met si basano sulle distribuzioni delle infrastrutture artificiali, della vegetazione e dei suoli nell'area d'interesse, opportunamente discretizzata (sino ad un massimo di 256x 256 *pixel*), ottenute manualmente tramite un apposito *editor*. Per gli edifici ed infrastrutture a differente altezza sono previsti parametri radiometrici e termici a livello dell'intera area, mentre per la vegetazione sono selezionabili diverse tipologie sulla base di un data-base aggiornabile di corredo al codice. E' prevista anche la selezione interattiva dei diversi suoli in termini di profili stratigrafici (sino a 14 strati) da un data-base alfanumerico aggiornabile da parte dell'utenza. Negli scambi di calore ed acqua tra suolo ed atmosfera a livello di superficie terrestre la vegetazione riveste un'importanza rilevante in quanto grazie alle sue capacità di evapotraspirazione determina la ripartizione locale tra i flussi di calore sensibile e latente sulla base dei processi di turbolenza determinati anche dalla sua struttura tridimensionale. Tenendo conto quindi dell'importanza di disporre preventivamente delle distribuzioni della vegetazione e dei differenti materiali nonché della loro tipologia e configurazione geometrica tridimensionale ad idonee risoluzioni ed accuratezza per supportare adeguatamente la modellistica SVAT 3D a microscala di ENVI-met, sono stati implementati vari metodi per utilizzare differenti dati telerilevati da satellite

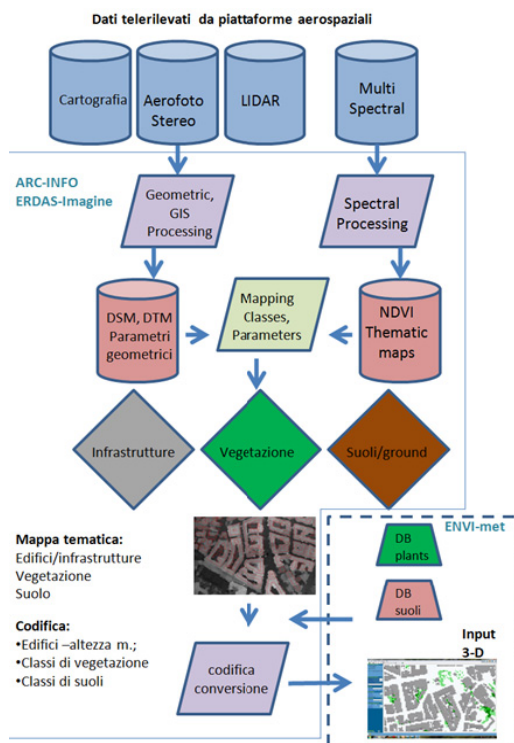


Figura 2 – Schema generale della metodologia sviluppata per la generazione semiautomatica della mappa di input al codice ENVI-met da dati telerilevati e cartografia.

¹ ENVI-met è un software freeware, scaricabile - previa registrazione - al seguente link: <http://www.envi-met.com/>

ed aereo al fine di produrre in modo semiautomatico tali informazioni complementari in formato opportuno tramite una metodologia appositamente sviluppata che s'interfaccia alle basi-dati di suoli e vegetazione presenti nel codice (Figura 2). Tale metodologia prevede elaborazioni specifiche con differenti strumenti (principalmente in ambiente ERDAS Imagine ed ESRI ArcGIS) per ricavare sia i parametri geometrici che tipologici delle classi di suoli, vegetazione ed edifici/infrastrutture dopo una loro preventiva discriminazione. Tali informazioni dopo un'opportuna codifica sono elaborate da un software appositamente sviluppato al fine di generare mappe tematiche secondo il formato previsto per l'input al codice ENVI-met. Le mappe così ottenute sono state utilizzate per condurre simulazioni in aree dei comuni di Roma ed Avellino su base giornaliera in coincidenza ad eventuali riprese satellitari/aeree e/o fenomeni climatici d'interesse. Al fine di testare il metodo alla massima risoluzione su aree sufficientemente grandi ma compatibili con i requisiti generali indicati per il codice (1÷10 m² di risoluzione) per questo lavoro sono state selezionate zone di circa 1 Km², rappresentative di tipologie edilizie localmente diffuse e/o d'interesse per le sperimentazioni sui *cool material* suddetti.

Per la caratterizzazione della vegetazione, oltre alla sua distribuzione, in questo contesto, assume rilevanza la discriminazione delle diverse specie/tipologie alle quali sono legati i parametri che regolano le interazioni con l'atmosfera ed il suolo quali ad esempio il LAI (*Leaf Area Index*) od il LAD (*Leaf Area Density*). Tenendo conto degli aspetti peculiari che presentano le misure di riflettanza nell'infrarosso vicino (NIR) e nel rosso (RED) della vegetazione fotosintetica, varie loro combinazioni algebriche sono diffusamente utilizzate operativamente sotto forma di indici spettrali per la stima estensiva dei relativi parametri biofisici, a partire dalle immagini telerilevate multispettrali. Tra i vari indici utilizzati per avere informazioni riguardanti la distribuzione spaziale della vegetazione ed il suo monitoraggio, quello più comunemente usato è il *Normalized Difference Vegetation Index* NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad [1]$$

Esso si basa sulla combinazione di bande spettrali (quella del rosso-RED e dell'infrarosso-NIR). Essendo tutte le piante caratterizzate da un'alta riflettanza nel NIR e bassa nel RED (per l'assorbimento fotosintetico), tale indice normalizzato (con variabilità tra -1 ed 1) non solo risulta proporzionale, con buona approssimazione, a vari parametri biofisici della pianta, tra cui il LAI/LAD, ma permette anche di minimizzare gli eventuali effetti di rumore introdotti dall'atmosfera e dal suolo. Su queste basi, considerando che tipicamente la maggior parte di sensori per telerilevamento aerospaziale ad alta risoluzione spaziale d'interesse per queste applicazioni in ambito urbano dispone di bande di acquisizione nel visibile e NIR per la mappatura della vegetazione attraverso questo indice è stato utilizzata una soglia inferiore per l'NDVI posta a valori positivi all'incirca maggiori del 10%. Per la discriminazione successiva delle varie tipologie vegetali è stata quindi implementata e messa a punto una procedura integrata basata sia sui valori di NDVI compresi nella soglia sia sui risultati di procedure semiautomatiche di classificazione multispettrale di tipo hard o soft. La prima è stata impiegata per dati multispettrali con risoluzione paragonabile a quella adottata nel modello (~ 4 m) ENVI-met, mentre la seconda, assimilabile con la SMA (*Spectral Mixture Analysis*), è stata prevista e testata su dati multispettrali ETM+ con risoluzione meno dettagliata (da 10 a 50 m). Metodologie analoghe sono state utilizzate per la stima delle distribuzioni dei vari materiali e superfici di tipo naturale od artificiale presenti nell'area d'interesse. Per la stima dei parametri geometrici della vegetazione e delle infrastrutture sono state implementate due procedure basate sull'elaborazione di aerofoto stereo e cartografia vettoriale 2D tramite tecniche fotogrammetriche digitali e LIDAR. Da rilievi Landsat ETM+ effettuati nella banda termica (10.4-12.5 μ) debitamente corretti per gli effetti atmosferici è stata, infine, dedotta una mappa termografica di temperatura superficiale tenendo conto delle differenti emissività ed utilizzata per operazioni di validazione delle distribuzioni simulate tramite ENVI-met.

Casi di Studio

Avellino

Per la caratterizzazione preventiva dell'area del comune di Avellino (Figura 3) scelta per i test di simulazione con il codice ENVI-met, le metodologie sviluppate si basano sull'uso integrato di rilievi di tipo LIDAR precedentemente acquisiti e dati multispettrali satellitari *QuickBird* (4 bande: RGB NIR; 2,5 m risoluzione a terra). Il rilievo LIDAR è stato effettuato nel 2007 da elicottero tramite una apparecchiatura Optech ALTM 3100

multimpulso sull'intero comune di Avellino con un'accuratezza di 4 punti/m² ed un piano di volo adeguato ad ottimizzare la restituzione tridimensionale degli edifici nelle aree urbanizzate. Da questi

rilievi sono stati estratti tramite metodi appositamente calibrati sulle aree d'interesse sia il DEM (*Digital Elevation Model*) del suolo sia le altimetrie in corrispondenza degli edifici (DSM, *Digital Surface Model*) ad adeguata risoluzione. Da questi è stato poi possibile derivare estensivamente le altezze e le planimetrie vettoriali per ogni singolo edificio. Tramite procedure di filtraggio morfologico e dimensionale sulla base delle sue risposte multiple sono state inoltre ottenute la distribuzione e caratterizzazione morfologica 3D della vegetazione nell'area d'interesse. I rilievi multispettrali satellitari *QuickBird* sono stati utilizzati per la produzione di mappe tematiche di NDVI e relative alle tipologie di coperture (strade/vie) dell'urbanizzato e della vegetazione (Figura 4) con le metodologie di classificazione precedentemente citate. Le simulazioni con ENVI-met sono state effettuate per il giorno 21 giugno 2007, in coincidenza con l'acquisizione *QuickBird*, a partire dalle ore 6.00 sino alle 18.00, sulla base di dati meteo di temperature, umidità e campo di vento rilevati da stazioni meteo cittadine dell'area con altezza media a circa 300 m sul livello del mare.

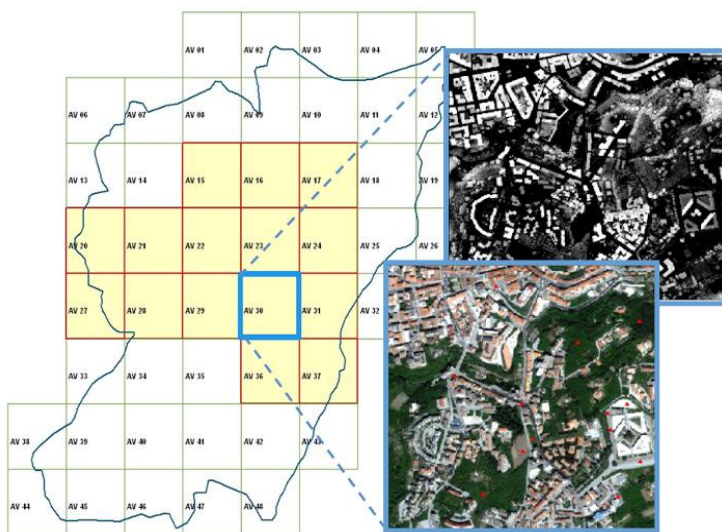


Figura 3 – Area d'interesse del Comune di Avellino. In alto a destra, DSM. In basso a destra, la corrispondente porzione di QuickBird true color con punti di controllo in overlay (triangoli rossi).

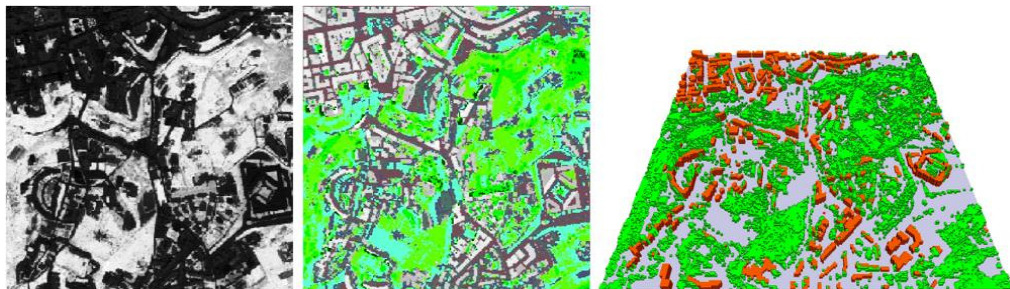


Figura 4 – Mappa NDVI (a sin.) e mappa tematica (al centro) codificata con 4 classi di vegetazione in verde, 2 classi di suoli (tonalità scure) ed edifici con altezze (tonalità di grigio). A destra, input 3D ENVI-met con edifici/infrastrutture (arancione/marrone) vegetazione e suoli (grigio).

Per la discretizzazione spaziale l'area d'interesse di circa 1Km² (riquadrate in azzurro in Figura 3) è stata divisa in 222x 232 pixel orizzontali di 4 m e 33 verticali di 6 m. Le temperature superficiali simulate come si vede (Figura 5) sono notevolmente influenzate dalla presenza della vegetazione con differenze medie tra le superfici vegetate e non di circa 7-9 °C nelle ore centrali della giornata corrispondenti a massimi di oltre 36 °C in corrispondenza di aree di asfalto assolate nei pressi delle infrastrutture a cui sono associati valori unici dei parametri (scambio, coibentazione, albedo, remissività, ecc.) in questa versione del software. In queste aree, come si vede in Figura 6, la temperatura radiante dell'aria simulata ad un metro dal suolo può risultare più alta di anche di decine di °C mentre la diminuzione di calore sensibile rilasciato da parte della vegetazione (Figura 6) mantiene le aree alberate a temperature sensibilmente più basse. In Figura 7 è riportata la distribuzione dell'umidità relativa alla sezione verticale indicata con linea tratteggiata bianca in Figura 6. L'andamento temporale delle temperature superficiali e dell'aria ad 1 m di altezza derivanti dalle simulazioni nei punti corrispondenti a differenti tipologie di copertura indicati in Figura 3 è stato riportato nei grafici di Figura 8. I valori simulati per la temperatura superficiale sono confrontabili con quelli medi registrati dalla vicina stazione di meteo di Montella della rete meteo regionale in quella data. Sempre in Figura 8 si nota anche come l'effetto schermante delle strutture tridimensionali influisce sull'andamento delle temperature superficiali della vegetazione e del suolo (curve meno regolari).

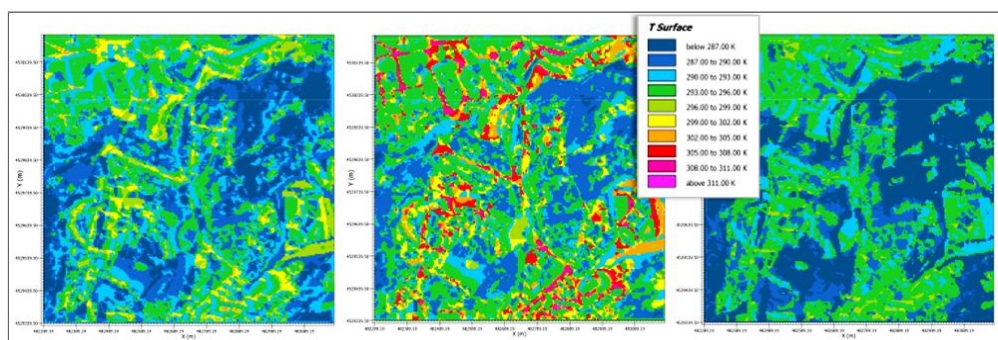


Figura 5 – Mappe di distribuzione della temperatura superficiale (K) del 21-6-2007 alle ore 9.00 (a sinistra), 11.00 (al centro) e 18.00 (a destra) ottenute da ENVI-met.

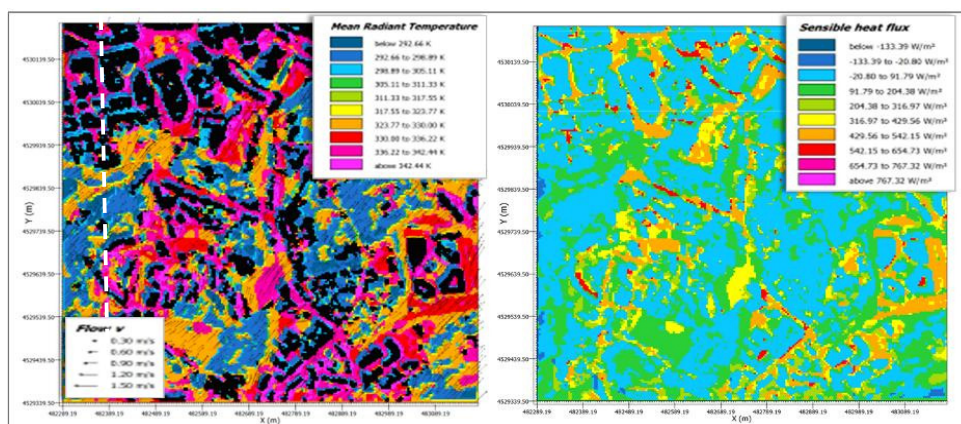


Figura 6 – Mappe di distribuzione della temperatura di radianza dell'aria ad 1 m da terra (sezione verticale in tratteggiato bianco, edifici/infrastrutture in nero e flow vettoriale in overlay a sinistra) e flusso di calore sensibile (destra) del 21-4-2007 alle ore 11.00 ottenute da ENVI-met.

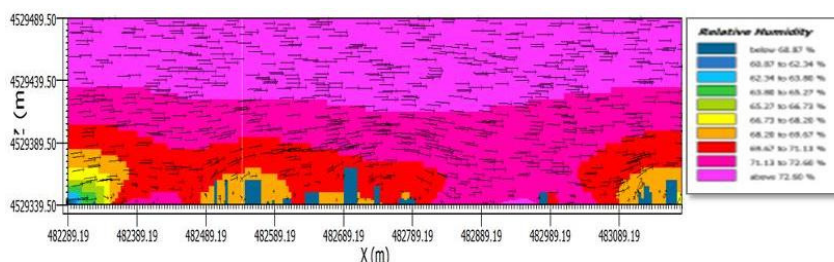


Figura 7 – Distribuzione verticale dell'umidità ed air flow alle ore 11.00 in corrispondenza della sezione indicata in Figura 6 ottenuta da ENVI-met.

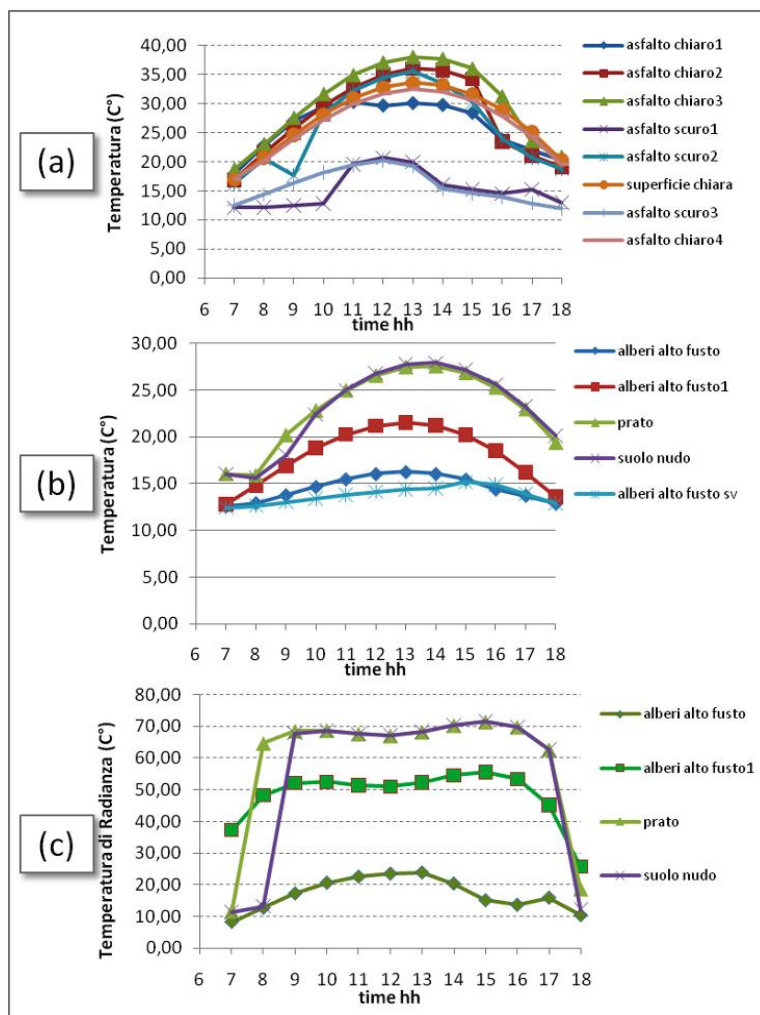


Figura 8 – Andamento temporale delle temperature simulate a terra (grafici a e b) ed ad 1 m di altezza (grafico c) per l'area di Avellino in data 21-06-2007 in corrispondenza dei punti a terra riportati in Figura 3 relativi a varie tipologie di coperture.

Roma-Prati

Le attività svolte nell'area di Roma centrale del quartiere Prati (Figura 9) sono state finalizzate come si è detto a supportare le ricerche qui in corso dedicate ai *cool material*, aventi caratteristiche di riflettanza (albedo) ed emissività tali da ridurre il calore immagazzinato da parte delle infrastrutture (edifici, asfalti, superfici artificiali,...) dando luogo ed un bilancio energetico più favorevole tra le superfici in gioco e l'aria esterna. Una temperatura minore dell'aria della zona induce un conseguente risparmio energetico indiretto su scala di edificio che si aggiunge a quello diretto dovuto al decremento della temperatura interna legato all'applicazione dei suddetti materiali. E' stata selezionata l'area centrale di Roma nel quartiere Prati di circa 1 Km² indicata in Figura 9 utilizzando un'immagine multispettrale Landsat ETM+ a 7 bande (6 nell'intervallo riflessivo del visibile, NIR e SWIR, una nel termico-emissivo), acquisita il 29 Luglio 2005 e con risoluzione spaziale di 30 m a terra (60 m per il canale termico). Nel giorno selezionato l'andamento delle temperature rilevate dalle stazioni meteo locali presenta un massimo

superiore alle medie stagionali del periodo per cui la situazione risulta idonea alla stima degli effetti massimi aspettati dall'introduzione dei *cool material* in condizioni tipiche dell'UHI tipicamente notturna. Tale fenomeno è documentato anche dalla mappa (1 Km di risoluzione) di differenze tra le temperature diurne (10.00) e notturne (21.00) rilevate dal sensore MODIS nello stesso giorno (Figura 11). I dati multispettrali Landsat ETM+, preventivamente corretti geometricamente e per gli effetti atmosferici sono stati utilizzati per l'individuazione e la caratterizzazione preventiva della vegetazione e delle infrastrutture (edifici e superfici artificiali) con le metodologie sopra descritte.

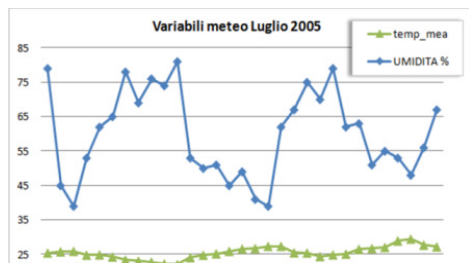


Figura 9 – Variabili meteo medie dell'area di Roma-Prati del Luglio 2005.



Figura 10 – Area d'interesse Roma-Prati, individuata su frame Landsat ETM del 29-07-2005. Dettaglio (in basso) dell'area di simulazione riquadrata in viola su true-color RGB con punti di verifica (triangoli rossi) in overlay.

In particolare oltre al NDVI, considerando che a causa della risoluzione di 30 m, a differenza del dato *QuickBird*, gran parte dei pixel dell'ETM+ corrispondenti all'area urbana risultano di tipo "mixed", cioè caratterizzati dalla presenza di più coperture differenti in termini di firma spettrale, è stata adottata una *soft-classification* ed SMA per l'individuazione preventiva delle firme spettrali delle coperture pure (*endmembers*) tramite l'algoritmo SMACC (*Sequential Maximum Angle Convex Cone*, Gruninger et al., 2004). In questo modo sono state individuate 6 coperture corrispondenti alle tipologie

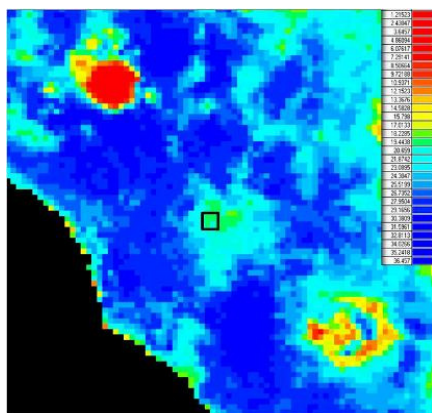


Figura 11 – Differenza (°C) di temperature rilevate da passaggi MODIS diurno (10.00) e notturno (21.00) del 29-7-2005. Area d'interesse riquadrata in nero al centro.

informazioni tipologiche e geometriche della vegetazione e delle infrastrutture nell'area d'interesse è stato derivato il modello 3D dell'area su cui sono state poi effettuate le simulazioni.

Tali simulazioni sono state progettate tenendo conto delle esigenze preliminari di valutare gli effetti dell'introduzione di *cool material* in quest'area per le superfici relative agli edifici (tetti e pareti) ed alle strade/vie, tipicamente coperte di asfalto. In particolare si è partiti da set di valori di albedo (riflettanza) ed emissività relativi sia a materiali comunemente usati (*normal*) in queste infrastrutture che a *cool material* sperimentali a basso (*cool1*) ed ad alto (*cool2*) impatto sul bilancio energetico e quindi sulla temperatura. I valori di riferimento utilizzati sono riportati nella Tabella 1.

	Edifici		Asfalto	
	Albedo		Albedo	Emissività
Materiali	Tetti	Mura		
Normal	0,25	0,45	0,13	0,9
cool 1	0,5	0,45	0,25	0,9
cool 2	0,7	0,6	0,35	0,9

Tabella 1 – Parametri relativi ai *cool material* utilizzati nella simulazione.

principali (*endmembers*) della vegetazione, delle superfici infrastrutturali e degli edifici presenti nell'area di test le cui firme spettrali tipiche unitamente alla loro denominazione riscontrata tramite foto interpretazione sono riportate nella Figura 12. Come si vede sono state individuate differenti tipologie di tetti e vegetazione, caratterizzata per il massimo in corrispondenza della banda 4 (NIR) e con due specie principalmente presenti nell'area (platani e lecci). Per ogni pixel dell'area di test sono state infine stimate le percentuali di tali coperture "pure" presenti (*soft-classification*). Per la caratterizzazione geometrica ed altimetrica, non disponendo di dati LIDAR, ci si è avvalsi di cartografia vettoriale planimetrica degli edifici a scala 1:2000 e di una stereocoppia di foto aeree (altezza volo 2400 m circa, scala 1:14.000) del '94 dalle quali sono stati estratti il DSM ed il DTM con tecniche di stereo restituzione digitale debitamente calibrate sul sito. Dalla mappa tematica ottenuta come descritto precedentemente e contenente le

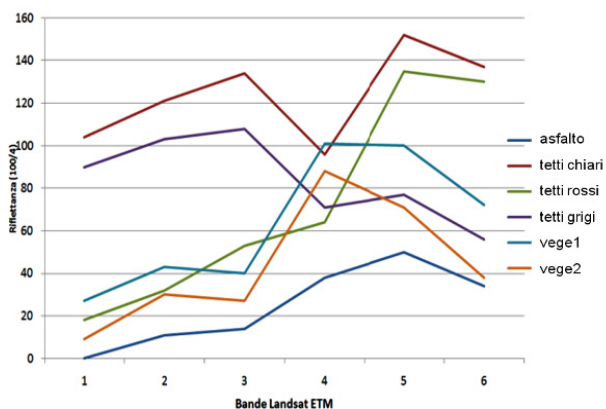


Figura 12 – Firme spettrali delle coperture principali individuate con l'algoritmo SMACC per l'area d'interesse rispetto alle 6 bande riflesse Landsat ETM.

Nella versione 3.5 qui utilizzata di ENVI-met gli edifici sono trattati ciascuno con la loro specifica struttura tridimensionale mentre per i parametri di albedo e di trasmittanza termica (tetti e pareti) nonché di temperatura interna (fissata) sono utilizzati valori unici per l'intera area di simulazione preselezionati a cura dell'utente. Al fine di simulare adeguatamente l'andamento temporale delle distribuzioni dei parametri dell'area nell'intervallo di maggior interesse senza appesantire i calcoli anche in termini di output, è stato selezionato l'intervallo temporale dalle 06.00 sino alle 18.00, considerando che al suo interno sono contenuti i previsti valori massimi di variazione delle temperature (Figura 1). A differenza delle simulazioni effettuate su Avellino, per Roma-Prati è stata adottato un "forcing" (disponibile nella versione 3.5 ma non nella 3.1 utilizzata per Avellino) basato sull'andamento delle temperature giornaliere misurato dalle stazioni meteo al fine di conservare una maggior aderenza alla situazione reale. I risultati delle 3 simulazioni con i parametri della Tabella 1 sono sintetizzati nei grafici di Figura 14. Come si evidenzia l'introduzione di *cool material* a diverso impatto ha un sensibile effetto di mitigazione delle temperature, sino ad oltre 5 °C di differenza sui massimi per le superfici asfaltate ed artificiali mentre per la vegetazione dalle temperature notevolmente più basse, l'effetto è meno rilevante ed addirittura negativo in corrispondenza delle periodo pomeridiano nel caso dei *cool material* a basso impatto (cool1).

L'elaborazione della componente termica dell'immagine multispettrale Landsat ETM+ è stata finalizzata a produrre la mappa LST (*Land Surface Temperature*), corrispondente al passaggio satellitare Landsat (9.30-10.00), dell'area d'interesse con cui effettuare una prima validazione delle simulazioni. Dopo la correzione atmosferica per gli effetti prevalenti di attenuazione del vapor d'acqua, la relativa radianza L ($W / m^2 \text{ str } \mu$) è stata convertita in temperatura T utilizzando i valori dei coefficienti (K_1 , K_2) di corredo all'immagine (Mallick et al., 2008) e dell'emissività (ϵ):

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1 \epsilon}{L} + 1\right)} \quad [2]$$

Oltre al calcolo con un valore costante dell'emissività (0.97), per tener conto dei valori di ϵ variabili per i vari materiali infrastrutturali e la vegetazione presenti in percentuali diverse nei vari pixel dell'immagine sono stati utilizzati altri due metodi basati rispettivamente sull'NDVI (Jose' A. Sobrino et al., 2004) e sulla decomposizione SMA precedentemente calcolata (Figura 12) con dati di riferimento desunti dalla letteratura (Tabella 2) per le coperture principali. La simulazione effettuata con i parametri relativi alla situazione normale è stata confrontata con la distribuzione di temperature così ottenuta dalle riprese Landsat ETM+ alle ore 10.00 con differenze risultanti nei punti di controllo riportate in Figura 15 che per le superfici asfaltate (*asfxx*) si attestano dai 3 ai 6 °C, mentre quelle rilevate corrispondenti alla vegetazione (*vegxx*) risultano notevolmente (oltre 10 °C) più alte, presumibilmente a causa del maggior impatto della risoluzione del sensore ETM+ che

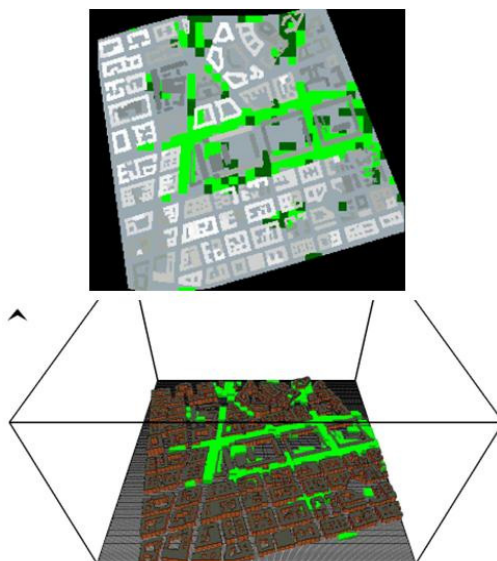


Figura 13 – Mappa tematica della distribuzione della vegetazione (2 tipologie in verde) e delle infrastrutture (suoli ed edifici) nell'area d'interesse (sopra) e relativo modello 3D derivato per l'input ad ENVI-met (sotto).

nel canale termico si attesta sui 60 m a terra. Le differenti metodologie per la stima dell'emissività producono valori che portano a stime di temperatura che differiscono per frazioni di grado C°.

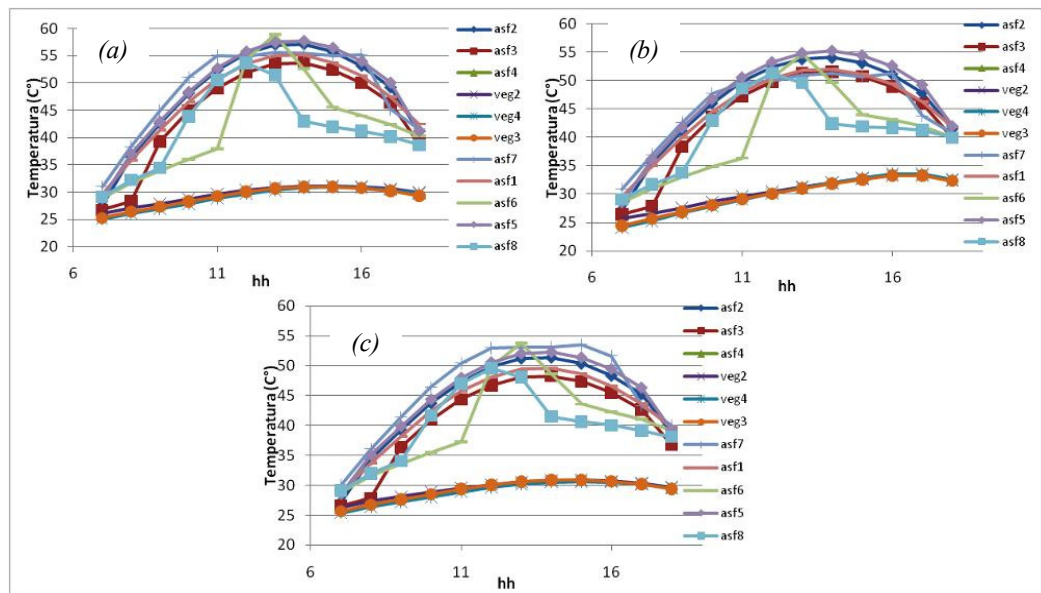


Figura 14 – Andamento delle temperature superficiali simulate sui punti di controllo introducendo cool material con parametri riportati in Tabella 1 (Normal (a), cool1 (b) e cool2 (c) dall'alto).

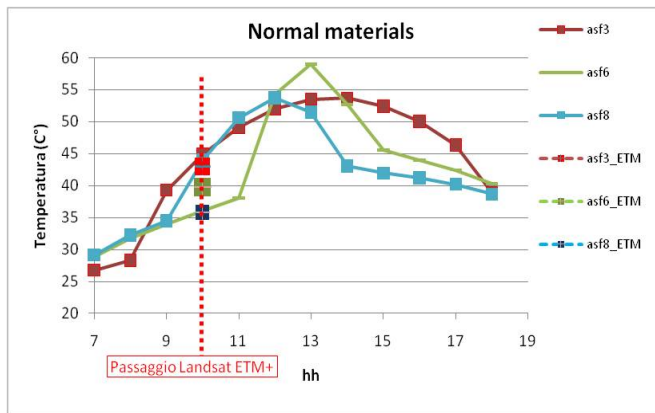


Figura 15 – Confronto tra temperature superficiali simulate e rilevate tramite sensore Landsat ETM+ alle ore 10.00 (linea verticale tratteggiata) su alcuni punti di controllo di Figura 9.

Coperture principali	Emissività
1-tetti grigi	0,93
2-asfalto	0,95
3-tetti rossi	0,94
4-tetti chiari	0,9
5-vege1	0,967
6-vege2	0,977

Tabella 2 – Valori di emissività adottati.

Conclusioni e sviluppi futuri

L'integrazione delle differenti tecniche di telerilevamento satellitare ed aereo ad alta risoluzione geometrica qui utilizzate hanno permesso di sviluppare vari metodi con i quali supportare adeguatamente la calibrazione e la validazione delle simulazioni delle variabili climatologiche effettuate con il nuovo codice SVAT 3D ENVI-met, progettato per l'ambiente urbano e le analisi a scala locale. Tali metodologie hanno permesso di ottenere in modo semiautomatico dai dati

telerilevati con sensori attivi/passivi le informazioni geometriche e tipologiche relative alla vegetazione ed alle infrastrutture necessarie per l'imput alla simulazione. Inoltre, mappe termiche ottenute dalle immagini telerilevate all'infrarosso debitamente corrette per gli effetti atmosferici sono state impiegate proficuamente per una prima verifica delle distribuzioni simulate. I risultati ottenuti sull'area di Avellino utilizzando dati LIDAR e satellitari multispettrali *QuickBird* sono serviti oltre che a mettere a punto le procedure automatiche di conversione anche per una verifica preliminare dell'andamento delle temperature simulate rispetto a quelle registrate a terra da stazioni meteo della zona. Nella zona test di Roma nel quartiere Prati sono state effettuate 3 simulazioni con differenti parametri di albedo ed emissività per le infrastrutture e le superfici artificiali (prevalentemente asfalti) preventivamente identificati e caratterizzati corrispondenti a *cool material* sperimentali (Tabella 1). I risultati preliminari hanno consentito di effettuare una prima stima della riduzione di temperature superficiali ottenibile nelle condizioni relative ad una situazione tipica di UHI notturno con valori intorno ai 4-7 C° per i massimi relativi alle superfici artificiali, in particolare ad alcuni asfalti (Figura 14). Per la vegetazione gli effetti dall'introduzione dei *cool material* sono meno evidenti e nel caso dei materiali a basso (*cool I*) impatto (grafico (b) di Figura 14) le simulazioni relative agli orari successivi alle 12.00 prevedono un aumento di temperatura rispetto alla situazione standard (grafico (a) di Figura 14).

Dal confronto tra la distribuzione delle temperature simulate e registrate dal sensore ETM+ al suo passaggio alle ore 10.00 sull'area test di Roma, con la stima dell'emissività effettuata per i vari materiali artificiali (asfalti,...) sulla base della loro distribuzione preventivamente ottenuta dai dati telerilevati con tecniche di classificazione multi spettrale, si registrano differenze contenute entro 3-7 C° mentre per la vegetazione tali differenze aumentano sensibilmente sino ad oltre 10 C°, a causa probabilmente della scarsa risoluzione geometrica del canale termico e di una poco adeguata parametrizzazione suscettibile di miglioramento col supporto di rilievi a terra.

Per quanto attiene le differenti metodologie di stima dell'emissività, i valori forniti da quella originale qui introdotta, basata sulla decomposizione SMA, danno luogo a valori di temperatura maggiormente vicini a quelli simulati rispetto all'altra più diffusa basata sull'NDVI. Questa procedura unitamente a quelle precedenti per la discriminazione dei vari materiali avrebbero portato senz'altro a risultati migliori potendo disporre di dati iperspettrali ad idonea risoluzione geometrica supportati da adeguati rilievi a terra sincroni alle riprese aerospaziali.

Sebbene l'integrazione tra le tecniche applicative del telerilevamento HR ed il codice ENVI-met abbia prodotto risultati preliminari notevolmente interessanti ed utili a supportare la caratterizzazione energetica e la pianificazione urbana permangono difficoltà connesse alla necessità di notevoli risorse di calcolo da parte del codice (circa una settimana per ciascuna simulazione su Workstation con CPU Xeon E5504 a 2 Ghz e 6 GB di RAM) su cui comunque è concentrato attualmente lo sforzo degli sviluppatori che nel prossimo futuro dovrà portare sensibili miglioramenti anche sul versante della capacità di gestire singolarmente le varie infrastrutture aumentando così le sue capacità predittive.

Bibliografia e riferimenti

- Bruse M., H. Fleer (1998), "Simulating Surface- Plant-Air Interactions Inside Urban Environments with a Three Dimensional Numerical Model", *Environmental Software and Modelling*, 13, 373-384
- Gruninger J., Ratkowski A. J., Hoke M. L. (2004), "The Sequential Maximum Angle Convex Cone endmember model", *SPIE proceedings - Algorithms for multispectral, hyperspectral and ultraspectral imagery*, Vol. 5425:1
- ENVI-met online manual, <http://www.envi-met.com/htmlhelp/helpindex.htm>
- Mallick J., Kant Y., Bharath B.D. (2008), "Estimation of land surface temperature over Delhi using Landsat-7 ETM+", *J. Ind. Geophys. Union*, 12:3, 131-140
- Jose' A. Sobrino, Juan C. Jimenez-Munoz, Leonardo Paolini (2004), "Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5", *Remote Sensing of Environment*, 90, 434-440.

Nuovo metodo di elaborazione dati laser scanner e fotogrammetrici applicati all'archeologia: il caso della chiesa di San Giorgio di Hône

Bornaz Leandro (*), Monteleone Luigi (**), Sartorio Gabriele (***)

(*) Ad Hoc 3D Solutions srl, fraz. La Roche 8, 11020 Gressan (AO), (+39)0165.267173, leandro.bornaz@adhoc3d.com

(**) Archeos Aosta, C.so Lancieri di Aosta 15/5, Aosta, (+39)0165.060648, archeos.aosta@tiscali.it

(***) Regione Autonoma VdA, Soprintendenza per i beni e le attività culturali Direzione Restauro e Valorizzazione, (+39) 0165 27.5953, g.sartorio@regione.vda.it

Il laser scanner e la fotogrammetria sono ormai divenuti un elemento fondamentale e sempre più diffuso nella documentazione e nello studio delle rilevanze archeologiche, in particolare in casi di ritrovamenti significativi e difficilmente descrivibili mediante le tecniche classiche. L'ambito archeologico, a differenza di altri settori nei quali le tecniche di rilevamento sono utilizzate da tempo, richiede un'attenzione ed una sensibilità particolari, non solo nelle fasi di rilevamento, ma anche nelle fasi di elaborazione dei dati e di gestione e fruizione dei risultati.

La chiesa di San Giorgio di Hône in Valle d'Aosta presenta un caso di studio ed applicazione di queste tecniche particolarmente interessante ed innovativo. La compresenza all'interno dello stesso sito di almeno 4 differenti fasi edilizie databili tra il primo bassomedioevo ed il XVIII secolo, la necessità di rilevare fedelmente paramenti murari in condizioni di luce scarsa ed artificiale, nonché la limitata possibilità di manovra all'interno dell'area di scavo, sono i fattori alla base di condizioni operative del tutto particolari. Per l'allineamento delle scansioni è stato utilizzato un nuovo metodo di elaborazione basato sull'analisi completa della forma dell'oggetto, mentre per la colorazione e la generazione delle tavole grafiche ed ortofoto è stata sviluppata una metodologia che combina la tecnica HDR con il blending delle immagini risolvendo così le problematiche relative all'illuminazione ed aumentando la leggibilità del prodotto finale e dei dettagli fotografici. Un'attenzione particolare è stata infine dedicata alla gestione dei dati per lo studio e la fruizione del sito archeologico.

Abstract

Laser scanning techniques are nowadays more and more employed in archeology in order to describe objects and interesting sites in 3D. The archeology field needs a special and accurate approach in survey and data treatment techniques, in particular if the laser scanner is used.

The San Giorgio church in Hône, Aosta Valley, is a very particular case study for archeology, that needs special and very high performing survey techniques in order to well describe and document the whole site. This site is characterized by 4 different construction phases, very particular sun and light conditions and very small and not so easy to reach scanning areas.

In this paper we describe the used survey technique and the obtained results. A set of new data treatment algorithms have been carried out. The true orthophotos have been obtained using a HDR technique and a blending method. In addition some special features in data exploitations have been developed according to archaeologist needed.

Introduzione

L'intervento nella chiesa di Hône, eseguito dalla ditta Archeos sotto la direzione dall'ufficio beni archeologici della Soprintendenza per i beni e le attività culturali della Valle d'Aosta prevedeva la realizzazione di una nuova pavimentazione e il consolidamento delle strutture della chiesa attuale. Significativi fattori di criticità, quali la necessità di mantenere la funzionalità della chiesa o

perlomeno di una sua parte per l'intera durata dei lavori e la scarsa accessibilità del sito, privo di un collegamento diretto con una via carrozzabile, hanno fortemente influenzato le soluzioni adottate. Le operazioni sono state articolate in diverse *tranches* durante le quali è stata assicurata la protezione dell'apparato decorativo della chiesa attuale; di particolare difficoltà è stata la realizzazione di una capriata in acciaio di sostegno della cantoria lignea, dimensionata al carico dell'organo soprastante.

In corso d'opera è emersa inoltre la necessità di valorizzare le vestigia archeologiche emerse sotto il piano di calpestio attuale: è stata scelta una pavimentazione a grandi riquadri, alcuni in legno ed altri in vetro, che permettessero la fruizione delle strutture archeologiche sottostanti, opportunamente illuminate. La scelta del telaio in acciaio, leggero e maneggevole, di dimensioni ridotte funzionali alla movimentazione manuale dei carichi, montato sul posto senza saldature risponde all'esigenza di poter modificare con facilità la pavimentazione in funzione delle esigenze e di permettere un facile accesso all'area archeologica.

Il cantiere archeologico che si trova all'interno della chiesa di Hône rappresenta un esempio di scavo documentale particolarmente interessante e complesso.

Citata per la prima volta in una bolla papale nel 1176, originariamente dedicata alla Madre di Cristo (*Sancta Maria ecclesia de Hauna*), l'attuale parrocchiale di San Giorgio di Hône è stata completamente ricostruita all'inizio del XVIII secolo. Precedenti indagini archeologiche, eseguite tra il 2005 ed il 2008 dalla ditta Archeos sotto la direzione dall'ufficio beni archeologici della Soprintendenza per i beni e le attività culturali della Valle d'Aosta, localizzate all'esterno dell'edificio sacro e nell'area della cripta, avevano dimostrato l'esistenza di un contesto pluristratificato, connesso alla presenza di una viabilità più volte modificata nel corso dei secoli ed in stretto dialogo con una situazione geomorfologica alquanto complessa. L'esecuzione nel 2009 di sondaggi esplorativi all'interno della chiesa aveva quindi svelato la presenza, nello stesso sito, di almeno quattro edifici sacri successivi, le cui murature denotavano una qualità formale ed un grado di conservazione di indubbio interesse, fatto che ha spinto la Soprintendenza a decidere di proseguire l'indagine allargando lo scavo all'intera navata centrale.

L'indagine del 2011 ha dunque riportato alla luce un vero e proprio palinsesto storico, tuttora in fase di studio, che permette probabilmente di retrodatare la costruzione di una prima cappella sul sito a prima del XIII secolo, confermando dunque in parte le notizie archivistiche. Un primo edificio a navata unica, orientato ed absidato, occupa la porzione più occidentale e sommitale di un promontorio roccioso a sbalzo sulla strada pubblica, sfruttando l'intero, e limitato, spazio disponibile. Successivamente una nuova chiesa sostituisce la cappella primitiva, prolungando verso oriente l'intera costruzione, oltrepassando il salto di quota dettato dalla morfologia del luogo, fino ad inglobare di fatto lo sperone roccioso su cui era stata edificata la prima chiesa. Il nuovo edificio, a navata unica orientata ed absidata, presenta una notevole qualità formale e concorre a dare l'idea di un complesso ecclesiastico di una certa importanza, fatto confermato anche dalla grande quantità di frammenti di intonaco affrescato rinvenuti in corso di scavo e che verranno studiati in vista di una loro ricomposizione, ma che già in prima battuta sembrano avallare una datazione al pieno Due-Trecento per questa fase edilizia. Di particolare interesse è stato il rinvenimento di una struttura di forma parallelepipedica all'interno dell'abside, precedente dal punto di vista stratigrafico quest'ultima, a circa 3 metri di profondità, chiusa da un piccolo voltino recante tracce in superficie di un intonaco rosso molto degradato. Interpretata in prima battuta come una tomba, si è rivelata invece essere priva di camera interna, e dunque più associabile, in attesa di confronti dettagliati, ad un cenotafio piuttosto che ad una vera e propria tomba.

Una terza chiesa viene a sostituirsi probabilmente in piena età rinascimentale (post XV secolo) a quella ora descritta, forse a seguito di un evento catastrofico (crollo?), caratterizzata da un'ulteriore espansione verso Est e dotata di una cripta e di un'abside poligonale. La parrocchiale Settecentesca porta alle estreme conseguenze la ricerca di spazio verso oriente, sia inglobando porzioni anche consistenti degli elevati del precedente edificio sacro, sia soprattutto prolungando la zona absidale e sopraelevandola ad oltrepassare la sottostante via pubblica.



Figura 1 – Immagine del sito archeologico.

Dal punto di vista del rilevamento il sito presenta diverse difficoltà operative. In primo luogo la zona da documentare si trova in parte all'interno di una chiesa, in parte all'esterno della stessa. Le condizioni di illuminazione, causate dalla forma e dalla posizione degli scavi, risultano molto variabili tra interno ed esterno, ma anche molto mutevoli con il passare delle ore della giornata. Anche cromaticamente vi sono notevoli difficoltà nel documentare fotograficamente il sito a causa delle vetrate colorate e delle superfici riflettenti presenti all'interno della chiesa.

Le difficoltà operative non si limitano però alle sole condizioni di illuminazione. Lo scavo ha portato alla luce strutture verticali appartenenti ad absidi preesistenti la chiesa attuale molto vicine le une alle altre (dai 15 cm a circa 1.5 m) e aventi altezza variabile tra poche decine di centimetri a diversi metri di forma circolare (vedi fig. 1) ed una parte rocciosa caratterizzata da vari sottosquadri e dalla presenza di una tomba.

L'insieme di questi aspetti e la posizione dello scavo non permette mai di avere una visione ottimale o globale dei paramenti verticali, necessaria allo studio archeologico, e rendono difficile la movimentazione all'interno del sito di persone e attrezzature.

Tecnica di rilevamento

Per la descrizione del sito, viste le difficoltà sopra descritte, è stato scelto di adottare una tecnica mista di rilievo che utilizza il GPS, per la georeferenziazione del sito, la topografia per la determinazione di una rete locale di riferimento allineata al sistema di documentazione utilizzato dagli archeologi per lo studio dell'area (*quadrillage*), il laser scanner, per la descrizione tridimensionale del sito, la determinazione di dettaglio dei volumi di scavo, e la descrizione architettonica dell'opera ed un rilevamento fotogrammetrico per la generazione dell'ortofoto nadirale del sito e delle ortofoto cilindriche dei paramenti murari verticali di pregio rinvenuti con gli scavi.

Le misure GPS e topografiche non hanno causato particolari problemi operativi, in quanto il rilevamento segue regole standard. Al contrario i rilevamenti laser scanner e fotogrammetrici, per le ragioni descritte in precedenza sono stati progettati accuratamente ed hanno impegnato a fondo il gruppo di rilievo. In totale sono state realizzate 21 posizioni di acquisizione per la descrizione completa dello scavo. Le acquisizioni sono state effettuate in parte dall'esterno dello scavo, in parte

dall'interno, a distanza obbligatoriamente molto ravvicinata delle strutture, per la descrizione dei setti verticali e dei sottosquadri presenti. Gli strumenti a scansione laser sono però caratterizzati da distanze minime sotto le quali l'acquisizione o non avviene, o avviene non garantendo i valori di accuratezza dichiarati nella scheda tecnica dalla casa costruttrice.

Questo aspetto ha caratterizzato particolari accorgimenti sia in acquisizione che nell'utilizzo di tecniche di controllo della precisione nelle fasi di elaborazione dei dati.

Il sito è stato così scansionato per la sua interezza. Lo strumento utilizzato è un laser scanner Riegl VZ400 caratterizzato da un sensore a lettura digitale completa della forma d'onda. Lo strumento utilizzato è in grado di acquisire ad una distanza minima di 1.5 m, valore che può essere ridotto fino a 0.5 m se si effettua un controllo di precisione della superficie acquisita. Il controllo della precisione avviene ripetendo la scansione con caratteristiche del segnale laser differenti in termini di potenza ed intensità ed effettuando un controllo incrociato di precisione con la topografia su punti specifici di controllo.

Particolare attenzione è stata posta anche nella progettazione e nell'esecuzione del rilevamento fotogrammetrico a causa delle difficili condizioni operative e di illuminazione e cromatiche. La progettazione delle riprese fotografiche ha anche permesso al team di rilievo di sviluppare e testare una nuova metodologia di acquisizione dei dati che combina la tecnica HDR in acquisizione con il *blending* delle immagini in elaborazione risolvendo così le problematiche relative all'illuminazione ed aumentando la leggibilità del prodotto finale e dei dettagli fotografici.

Essendo presente una tomba al centro dello scavo il rilevamento laser scanner e fotogrammetrico sono stati ripetuti, in quella zona, sia prima che dopo l'apertura della tomba stessa, ottenendo così un modello multi-temporale dello scavo.

Elaborazione dati

Le condizioni particolari descritte in acquisizione ed una nuova tecnica di rilevamento fotogrammetrico significano anche l'utilizzo di nuove tecniche in elaborazione dei dati.

I modelli acquisiti sono stati per prima cosa filtrati per ottenere un modello privo del rumore di acquisizione (sempre presenti qualsiasi sensore venga utilizzato) e degli oggetti non contestuali alla zona di interesse (persone, vegetazione, attrezzature varie, ponteggi, ...).

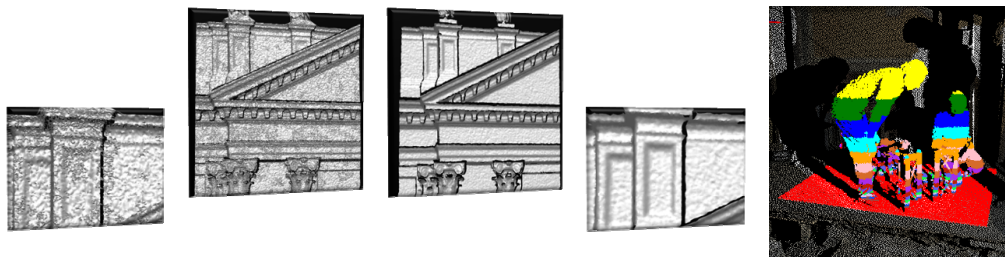


Figura 2 – Esempio dei risultati ottenuti mediante l'utilizzo degli algoritmi di filtratura adottati da Ad hoc 3D. Rimozione del rumore di acquisizione (a sinistra) ed eliminazione delle entità non contestuali al modello (a destra).

Per allineare le scansioni laser sia tra loro che sul sistema di riferimento locale ci sono diversi metodi. Il metodo classico per l'allineamento è utilizzare dei target posizionati sulle aree in comune tra due o più scansioni, opportunamente posizionati in funzione della geometria del sito e della posizione delle scansioni. Nel caso di un sito molto complesso, come quello di Hône, questo metodo per funzionare correttamente, richiede il posizionamento di un numero di target decisamente molto elevato.

Altro metodo sempre più diffuso è quello automatico ICP (*iterative closest points*). E' un metodo di allineamento sviluppato in meccanica per il controllo dei pezzi di precisione, che va molto bene per allineare scansioni di oggetti piccoli e con geometrie definite. Diversi test eseguiti a livello universitario hanno però dimostrato che spesso questo metodo va in crisi in ambito archeologico. Infatti il metodo ICP è un sistema che si basa sulla convergenza iterata sulla migliore approssimazione. La migliore approssimazione su oggetti geometricamente complessi e non definibili per via matematica causa però la presenza di minimi locali ottenendo così modelli non allineati correttamente, non coerenti, né accurati. Il metodo ICP ha il pregio di utilizzare tutta la forma dell'oggetto ma anche il grande difetto di non avere la possibilità di integrarsi alle misure topografiche classiche, perdendo così il significato geomatrico dell'allineamento e qualsiasi relazione con il sistema di riferimento topografico o cartografico.

Per l'allineamento delle scansioni dello scavo di Hône è stato utilizzato un nuovo algoritmo basato sull'analisi della forma dell'oggetto che supera tutti i limiti descritti in precedenza del metodo classico e dell'algoritmo ICP. Il metodo sviluppato dalla società Ad Hoc trova le sue radici nel metodo di triangolazione a modelli laser scanner (Bornaz e al. 2003). In questi ultimi anni il metodo è stato completamente riscritto e migliorato. In particolare un nuovo algoritmo di riconoscimento di evidenze geometriche presenti in ogni singola scansione permette di estrarre un insieme di punti significativi dalla nuvola di punti. Gli stessi punti sono poi associati come oggetti omologhi tra scansioni adiacenti qualora una serie di descrittori geometrici risultino comuni tra due punti. In questo modo, oltre ad avere i classici marker in allineamento, utilizzati sia come punti omologhi che di appoggio e controllo topografico, è possibile sfruttare anche punti omologhi automaticamente individuati nelle scansioni. L'efficienza dell'algoritmo permette di individuare ed associare un elevatissimo numero di punti significativi e quindi di allineare le scansioni utilizzando un numero di punti di molto più elevato che nel caso classico dei target. Questo aspetto consente quindi di utilizzare un numero più limitato di target e suggerisce di adottare, al posto delle classiche tecniche statistiche ai minimi quadrati, metodi robusti di stima dei parametri. Nel caso in oggetto, da ognuna delle 21 scansioni sono stati estratti circa 25000 punti geometrici significativi. La procedura di calcolo ha utilizzato 4 target come punti di appoggio per la georeferenziazione globale, 26 associazioni tra target di riferimento e circa 60000 punti associati in modo automatico. La stima robusta ha permesso di eliminare gli eventuali errori grossolani ed accidentali e di ottenere una precisione globale in allineamento tra le 21 scansioni di 2mm $\pm$ 0,2 mm. L'ottima qualità dell'allineamento è facilmente visualizzabile sezionando il modello completo composto dalle 21 scansioni.

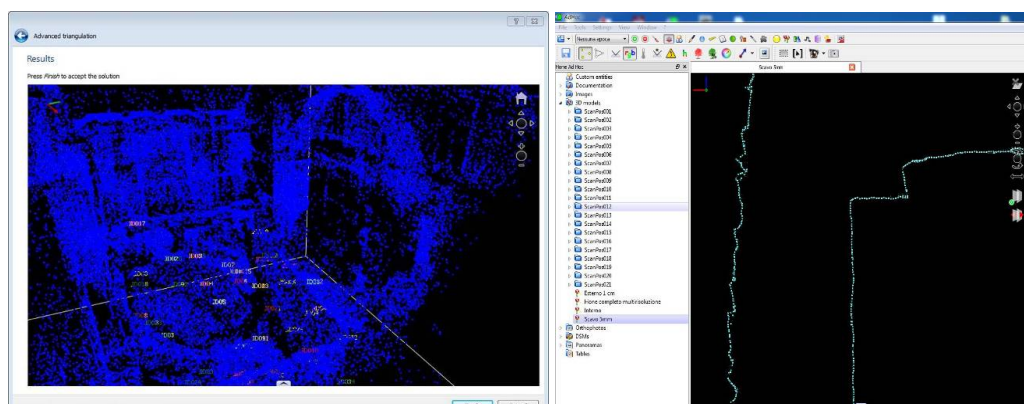


Figura 3 – A sinistra: Vista 3D dei punti utilizzati in allineamento (target + punti automatici). A destra: vista della sezione ottenuta dalla nuvola di punti completa (21 scansioni).

Tutto il rilievo è stato espresso nel sistema di riferimento utilizzato dalla ditta che si è occupata dello scavo e della documentazione archeologica (Archeos), quello del quadrillage.

Per la georeferenziazione dello scavo alcuni dei target retroriflettenti posizionati nel sito sono stati misurati anche con tecnologia GPS a doppia frequenza. I target sono così stati determinati nei sistemi di riferimento geocentrico, geografico e cartografico UTM WGS84 e UTM ED50 con quota ortometrica. In questo modo è stato possibile determinare per via analitica i parametri e le regole che consentono di trasformare le tavole, il modello 3D, i disegni e le sezioni dal sistema di riferimento *quadrillage* locale non deformato a quelli cartografici UTM ED50 e UTM WGS84, in modo rigoroso, punto per punto.

Fotogrammetria

Quando si effettuano immagini fotografiche in ambiente chiuso, in particolare in presenza di grandi vetrate, come nel caso della chiesa di Hône, realizzare immagini di colore e luminosità omogenei su tutta la superficie fotografata è molto difficile.

L'HDR, acronimo di High Dynamic Range, è una tecnica utilizzata in grafica computerizzata e in fotografia per consentire che i calcoli di illuminazione possano essere fatti in uno spazio più ampio e si possano rappresentare valori di illuminazione molto alti o molto bassi. Le tecniche HDR sono fondate sulla natura fisica della luce. Per i calcoli si utilizzano le stesse unità di misura della fotometria, dove, per esempio, al sole viene assegnato un valore di luminosità milioni di volte più grande di quello del monitor del personal computer. L'HDR dà la possibilità di immortalare una scena avendo poi il totale controllo sull'immagine finale

Le informazioni memorizzate in un'immagine HDR di solito corrispondono ai valori fisici della luminosità e della radianza che possono essere osservate nel mondo reale; in questo differiscono dalle informazioni memorizzate nelle normali immagini digitali classiche.

La conseguenza più immediata della tecnica HDR in fotografia è una immagine radiometricamente più corretta e molto più facilmente leggibile dal punto di vista dell'illuminazione. Oltre alla tecnica HDR nella realizzazione delle immagini nel sito di Hône è stato utilizzato un algoritmo di enfattizzazione dei dettagli che agevola ulteriormente la lettura dell'immagine.

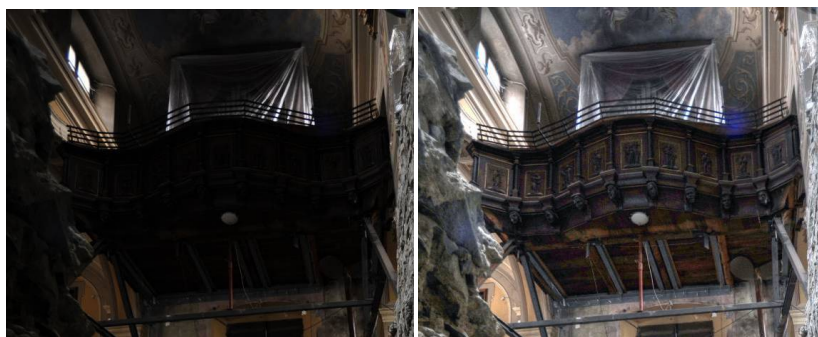


Figura 4 – Dettaglio di differenza tra immagine fotografica digitale classica (a sinistra) e HDR (a destra).

La tecnica descritta è stata utilizzata sia per l'acquisizione delle immagini necessarie alla colorazione del modello laser scanner con la fotocamera rigidamente connessa al sensore laser, sia per le immagini del rilevamento fotogrammetrico classico.

Tutte le immagini acquisite per la fotogrammetria sono state orientate tra loro utilizzando sia punti di legame naturali che gli stessi target utilizzati per l'allineamento delle scansioni, per l'orientamento assoluto del blocco fotogrammetrico. Le immagini per la realizzazione delle ortofoto sono state acquisite a distanza costante e ridotta secondo il progetto di presa fotogrammetrico per ottenere un alto livello di dettaglio fotografico.

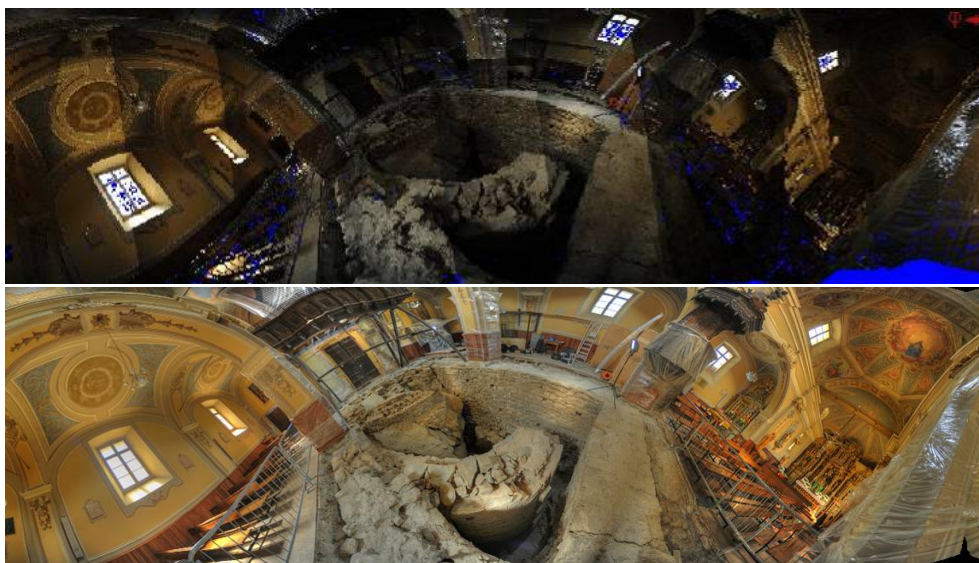


Figura 5 – Vista panoramica della scansione laser colorata utilizzando le immagini digitali classiche (in alto) e utilizzando le stesse immagini elaborate con la tecnica messa a punto da Ad hoc 3D Solutions srl (in basso).

Modello 3D a colori reali

La nuvola di punti ottenuta alla fine delle fasi di allineamento è stata suddivisa in 3 porzioni differenti a seconda del dettaglio necessario alla descrizione dell'opera.

1. Scavo archeologico: 11.979.525 di punti con una risoluzione di 5mm
2. Struttura interna della chiesa: 16.620.125 punti con una risoluzione di 6 mm
3. Esterno della chiesa: 10.269.994 con una risoluzione di 1 cm

Le tre porzioni sono quindi state riunite in un unico modello multi-risoluzione composto da 38.869.644 punti.





Figura 6 – Viste 3D della nuvola di punti a colori reali dello scavo e del interno della chiesa.

Ortofoto

Utilizzando le immagini HDRI ed i modelli 3D laser scanner si sono prodotte le tavole autocad di descrizione del sito e le ortofoto di precisione dello scavo piano e cilindriche in scala 1:20

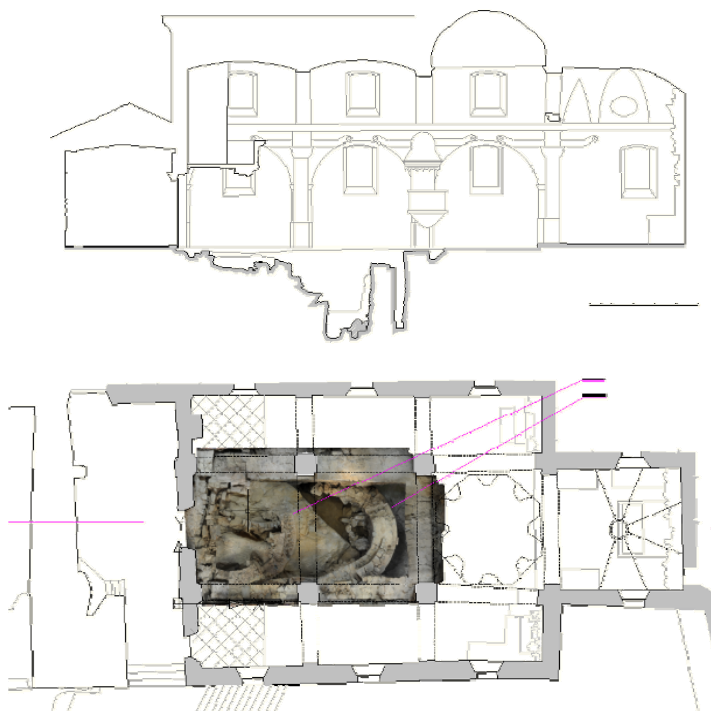


Figura 7 – Sezioni della chiesa con indicazione delle ortofoto prodotte.



Figura 8 – Ortofoto nadirale di precisione. Scala della rappresentazione 1:10.



Figura 9 – Ortofoto cilindrica di precisione dell'abside circolare ad est. della rappresentazione 1:10.

Utilizzo dei dati

I software commerciali oggi presenti sul mercato permettono di utilizzare la nuvola di punti, visualizzarla o effettuare misure di vario genere. Altri permettono di aprire ed utilizzare le ortofoto. Nessuno di questi consente però il dialogo tra immagini, topografia, ortofoto, modelli 3D e sistemi di riferimento differenti, perdendo così un valore aggiunto importante offerto dal laser scanner.

La società Ad Hoc 3D solutions srl, per mettere a disposizione dei fruitori dei dati il massimo delle potenzialità offerte dalle tecniche di documentazione moderne, da tempo sviluppa un apposito software per la fruizione dei dati che si chiama Ad Hoc[®]. Questo software è fornito gratuitamente assieme ai dati acquisiti, come formato aggiuntivo di consegna ai modelli 3D, alle ortofoto ed alla

documentazione fotografica. Il software è costantemente aggiornato in funzione delle esigenze dei clienti ed è appositamente studiato per massimizzare le potenzialità e la fruibilità dei dati laser scanner con strumenti specifici per lo studio archeologico ed architettonico, per l'estrazione di qualsiasi misura geometrica o l'inserimento di dati esterni all'interno del modello 3D, come ad esempio le tavole grafiche di scavo disegnate secondo il sistema di riferimento *quadrillage*, documenti di scavo, hyperlink o simili. Le ortofoto, le immagini ed i modelli 3D sono tutti integrati tra loro. Questo consente di disegnare una entità sull'ortofoto e di vederla all'interno del 3D nella sua posizione corretta e viceversa.

Il software è dotato anche di un motore per la gestione di DB, la creazione di tabelle e moduli, l'inserimento dati e la ricerca relazionale integrata. I risultati delle ricerche sono evidenziati sul modello 3D. In questo modo il sistema consegnato non è solo un modello 3D od un rilievo classico ma si trasforma in un vero e proprio GIS 3D per la gestione completa dello scavo archeologico.

Sono disponibili anche, a supporto degli studi archeologici, *plugin* aggiuntivi del software, come ad esempio un motore per la gestione completa delle schede US/USM/USR, del *matrix* e della gestione delle fasi costruttive.

Conclusioni

La metodologia adottata ha il pregio di offrire prodotti finali di ottima qualità, ma soprattutto l'enorme valore aggiunto di fornire prodotti semplici, gestibili in piena autonomia, studiati e creati per soddisfare le differenti ma precise esigenze dell'utente finale. La piattaforma software AdHoc infatti si caratterizza per essere particolarmente *user friendly*. Gran parte delle operazioni vengono effettuate attraverso una interfaccia fotografica, o seguendo procedure guidate.

I risultati del rilievo sono di supporto a diverse attività di gestione, documentazione, manutenzione del sito e divulgazione dei risultati ottenuti. Si possono ad esempio censire le aree da restaurare, discretizzare le parti originali da quelle oggetto di restauri precedenti, evidenziare le diverse fasi costruttive, caratterizzare i materiali... e tutte queste attività condividono lo stesso supporto geometrico. In generale non si tratta semplicemente di descrivere in maniera continua e completa un sito, "congelandolo" ad un dato momento il sito, quanto di proporre l'utilizzo del rilievo laser come database 3D, in grado di contenere informazioni strutturate, ordinate in base alla loro posizione spaziale. Misure, restituzioni, analisi e valutazioni possono essere eseguite ex-post, in base alle esigenze contingenti. Dovesse cambiare la conformazione del sito, o proprio per monitorare le variazioni, è possibile programmare delle nuove sessioni di misura, allineandole rispetto allo stesso sistema di riferimento, permettendo confronti multi temporali, e quindi la ricostruzione della storia recente di un sito. Sessioni multi temporali di rilievo laser sono in grado di documentare l'andamento dello scavo e registrare lo stato di fatto durante le diverse fasi dell'indagine, e conservare l'informazione anche a scavo concluso.

Bibliografia

- Rinaudo F.; Bornaz L.; Ardisson P (2007) *3D High accuracy survey and modelling for Cultural Heritage Documentation and Restoration*. In: VAST2007, 26-29 Nov 2007, Brighton (UK).
- Bornaz L.; Botteri P; Fangi G (2007) *Decay development and technology development. Ancyra project: the temple of augustus in Ankara*. In: 29. INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF EXCAVATIONS, SURVEYS AND ARCHAEOOMETRY, 28 maggio - 1 giugno, Kocaeli.
- Agosto; E; Ardisson P; Bornaz L.; Rinaudo; F (2007) *The solid image. A new tool for the documentation of archaeological heritage*. In: CAA 200 Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, 2 - 6 Aprile 2007, Berlino.
- Bornaz L.; Peretti L; Porporato C; Rinaudo F (2006) *Tecniche integrate di rilievo a supporto delle analisi del degrado delle pietre ornamentali*. In: 10a Conferenza Nazionale ASITA, 14-17 novembre 2006, Bolzano.
- SARTORIO G. -CORTELAZZO M. (2009), *Fouilles archéologiques dans l'église paroissiale Saint-Georges de Hône*, in "Bollettino della Soprintendenza per i beni e le attività culturali (Aosta)", 6/2009, Saint-Christophe (AO), p. 117
- SIMONOTTI M. (1998), *La Chiesa e la Parrocchia di Hône. Note storiche*, Aosta

Rilievo e rappresentazione 3D di siti archeologici attraverso tecniche di fotogrammetria di prossimità mediante micro e mini UAV

Andrea Borruso (*), Antonio D'Argenio (*), Francesca Julitta (**), Lorenzo Mancon (**),
Vincenzo Pampalone (*)

(*) Consorzio Ticonzero, Palermo

(**) Zenit s.r.l., Busto Arsizio (VA)

Riassunto

Le attività di valorizzazione e conservazione dei beni archeologici ed architettonici richiedono lo sviluppo di specifici nuclei di conoscenza che ne consentano una descrizione in termini di posizione, colore e geometria. Questa esigenza è alla base dello sviluppo di nuove metodologie di indagine, un esempio dei quali è presentato in questo lavoro. Le attività descritte si riferiscono allo studio del sito archeologico di Himera (Sicilia) attraverso tecniche di fotogrammetria aerea di prossimità unite all'uso di piattaforme leggere di tipo UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*). La tecnica utilizzata permette di associare alla documentazione fotografica il modello 3D dello scavo su cui è possibile drappeggiare le immagini. Il flusso operativo che genera i prodotti fondamentali si dipana attraverso le fasi di programmazione ed esecuzione del volo automatico, orientamento delle prese, elaborazione di nuvole di punti, georeferenziazione e ortorettifica dei fotogrammi. Il sito è stato suddiviso in due aree: (i) una più ampia (circa 135 x 285 m) corrispondente alla parte alta dell'antico centro abitato su cui sono state acquisite immagini a 100 m di quota e (ii) una di minori dimensioni (35 x 60 m) che include i resti di un edificio religioso e che è stata ripresa ad una quota di 20 m, ottenendo fotogrammi di elevato dettaglio. La procedura utilizzata ha consentito di acquisire i dati necessari ad estrarre ortofoto e DSM (*Digital Surface Model*) dell'intero sito e modelli 3D di elevato dettaglio e accuratezza circoscritti all'area sacra. Parallelamente, sono state rilevate immagini atte a creare panorami sferici interattivi del sito.

Abstract

Activities devoted to the enhancement and preservation of cultural heritage require the development of specific knowledge nuclei to allow its description in terms of position, colour and geometry. This need is the basis for the development of innovative technologies and introduction of new investigation tools. This work is particularly focused on the study of an archaeological site (Himera, Sicily) done by using close-range aerial photogrammetry techniques with micro UAVs (Unmanned Aerial Vehicles). The technique used allows to obtain, besides the photographic documentation, a 3D model of the site that can be textured with the acquired images. The adopted workflow unfolds through phases of automatic flight planning, image matching and orientation, point clouds processing and geoprocessing of images. The site has been divided in two areas: (i) a larger one (about 135x285 m) corresponding to the highest part of the ancient inhabited town which has been covered by pictures taken from a relative height of 100 m and (ii) a smaller one (35x60 m) that includes the remains of a religious building, covered by images shot from a relative height of 20 m, obtaining an higher geometric detail. The adopted procedure allowed to acquire the data necessary to extract orthoimages and a Digital Surface Model of the whole site and high resolution and accuracy 3D models of the religious area. Further images have been taken to create an interactive spherical panorama of the site.

Introduzione

Il tema della valorizzazione e della conservazione del patrimonio culturale è intimamente connesso con la messa a punto di processi innovativi di creazione, gestione e fruizione di nuova conoscenza. L'adozione di metodologie di rilievo aereo di prossimità e restituzione fotogrammetrica, basate sull'impiego di piattaforme leggere di tipo UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), consente di generare, in tempi rapidi e con investimenti adeguati ai *budget* della Pubblica Amministrazione, i dati necessari alla realizzazione di prodotti metrici utilizzabili sia come strumento di conoscenza specialistica che come base per la realizzazione di prodotti mediatizzati destinati al grande pubblico. In questo lavoro vengono presentati metodologie utilizzate e risultati ottenuti nel corso di un rilievo eseguito nel febbraio del 2011 di una porzione dell'area archeologica di Himera (Termini Imerese, PA), che ospita le rovine dell'antica colonia greca del VII sec. a.C.. Il rilievo è stato condotto su quella parte della Città Alta che occupa il Piano di Himera. In quest'area sono riconoscibili due gruppi di edifici, corrispondenti ai Quartieri Settentrionali dell'abitato ed all'area sacra del *Temenos* di Atena. Di tale area, i dati metrici dall'alto (pubblici) disponibili alla data del rilievo erano rappresentati dalle "Ortofoto ATA 2007/2008" dell'Assessorato Territorio e Ambiente della Regione Siciliana. La risoluzione di queste immagini (25 cm/px), sebbene adeguata ad un corretto posizionamento dei singoli edifici ed al loro riconoscimento, risulta insufficiente sia alla generazione di prodotti derivati di tipo specialistico (restituzioni vettoriali e modelli tridimensionali di dettaglio) sia al loro inserimento in applicazioni multimediali (figura 1).



Figura 1 – Comparazione visiva tra le "Ortofoto ATA 2007/2008" (a sinistra) ed uno stralcio dei dati acquisiti nel corso del rilievo (a destra). Il riquadro rosso indica il dettaglio oggetto del confronto. L'immagine si riferisce ai Templi A-B del Temenos di Atena.

Il rilievo, che ha prodotto un significativo miglioramento della qualità dei dati disponibili sull'area, rappresenta la prima applicazione in Sicilia di una metodologia già sperimentata su altre aree archeologiche italiane. Tale metodologia, che si caratterizza per l'uso diffuso di strumenti e tecniche tipici dei GIS, è presentata in dettaglio in un altro lavoro di questo volume (Sarazzi et al., 2011) a cui si rimanda per i necessari approfondimenti.

Strumentazione e metodi

Il rilievo sull'area archeologica di Himera è stato realizzato utilizzando un quadrirotore elettrico radiocontrollato md4-200. Questo vettore è caratterizzato da un'elevata programmabilità ed è in grado di eseguire efficientemente voli automatici pianificati in precedenza. Caratteristiche e prestazioni del vettore sono illustrate in tabella 1. Le immagini (formato 4/3 a 12 Mpx) sono state acquisite utilizzando una fotocamera Pentax Optio A40 opportunamente calibrata.

Tabella 1 – Caratteristiche e prestazioni del quadrirotore elettrico md4-200.

Capacità di carico (kg)	0,2
Peso (kg)	0,9
Dimensioni in volo (cm)	70
Dimensioni a terra (cm)	70
Raggio d'azione (m)	500
Altitudine relativa massima (m)	150
Autonomia di volo (minuti)	20
Condizioni di volo	Vento fino a 15 km/h
Motore	Elettrico (4 x 250W flatcore brushless)
Strumento di ripresa	Pentax optio A40
GPS	✓
Pilota automatico	✓

Dal punto di vista metodologico, il flusso di lavoro tipico di un rilievo con finalità metriche si articola nei passi seguenti:

- analisi dell'area,
- pianificazione delle operazioni di volo e di ripresa,
- esecuzione del rilievo,
- elaborazione fotogrammetrica.

Ai punti precedenti si aggiunge poi la generazione ed il rilascio dei prodotti finali (ortofoto, modelli 3D, prodotti multimediali).

L'analisi dell'area consiste nella sua individuazione su cartografia di base (CTR, ortofoto, ecc.) che viene inserita in ambiente GIS e nel riconoscimento, sul campo, di tutte le problematiche locali che caratterizzano il singolo rilievo (presenza di ostacoli, andamento della morfologia, ecc.).

La pianificazione dei voli è di norma realizzabile attraverso il software a corredo del velivolo (Microdrones MD Cockpit) ma, nel caso in esame è stata eseguita in ambiente GIS, utilizzando una metodologia originale (sviluppata da Zenit s.r.l.), che consente di definire con elevata precisione, oltre alla rotta di volo (*waypoint*), lo schema delle riprese (assetto del vettore in ciascun *waypoint*) ed i parametri di acquisizione delle immagini (orientamento della fotocamera, livello di zoom). Nel caso di Himera sono state programmate 4 diverse sessioni di acquisizione di cui tre (riferite all'area nel suo complesso) ad una quota relativa di 100 m ed una (di maggior dettaglio e relativa al *Temenos* di Atena) a 20 m di altezza (figura 2). Utilizzando una risoluzione di 12 Mpx ed una lunghezza focale di 7,9 mm, le due quote di volo consentono di acquisire fotogrammi con risoluzione al suolo rispettivamente di 2,40 e 0,48 cm/px.

Inoltre, considerate le finalità del rilievo (generazione di prodotti metrici bi e tridimensionali), nello schema di ripresa si è scelto di adottare una sovrapposizione frontale dei fotogrammi (*overlap*) dell'80% ed una laterale delle strisciate (*sidelap*) del 60%.

Infine, è stato preparato un piano di volo studiato per realizzare panorami sferici ripresi dall'alto.

Una volta definiti i piani di volo si passa alle operazioni in campo che iniziano con il posizionamento di una serie di bersagli (30 nel caso in esame), di dimensioni tali da consentirne l'individuazione nelle immagini, la cui posizione relativa viene rilevata con una Stazione Totale. Di alcuni di essi vengono inoltre battute le coordinate GPS. I bersagli rappresentano i punti di controllo al suolo (GCP, *Ground Control Point*), che saranno utilizzati successivamente in fase di elaborazione delle immagini. Le acquisizioni vengono realizzate eseguendo i voli pianificati in precedenza e precaricati sul quadrirotore. Nel caso di Himera le fasi di volo si sono concluse nell'arco di circa due ore e hanno consentito di raccogliere 68 prese a 100 m di quota, 16 prese a 20 m cui si associano le 53 prese del piano di volo dedicato all'immagine sferica.

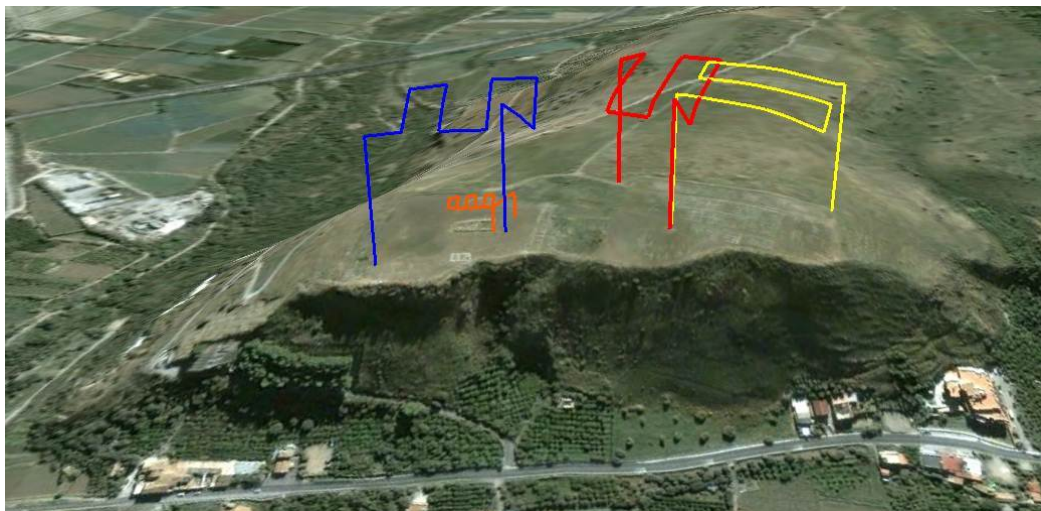


Figura 2 – La Città Alta sul Piano di Himera e le rotte corrispondenti alle quattro sessioni di acquisizione.

Le immagini acquisite vengono poi sottoposte ad una procedura di elaborazione condotta in un ambiente software dedicato. Nel caso delle immagini destinate alla realizzazione di prodotti metrici, il *processing* fotogrammetrico è stato condotto in PhotoModeler Scanner, un prodotto ampiamente utilizzato nella modellazione di oggetti a partire da prese raccolte da terra. Il software consente di estrarre nuvole di punti a partire da coppie di immagini il cui orientamento esterno viene ricavato in maniera semiautomatica. Nel caso in esame, la generazione delle nuvole dei punti è stata eseguita secondo due modalità differenti: (i) manualmente per la modellazione dei Templi A-B del *Temenos* di Atena, (ii) in maniera automatica per quella della più ampia area (circa quattro ettari) dei Quartieri Settentrionali della città alta (figura 3).

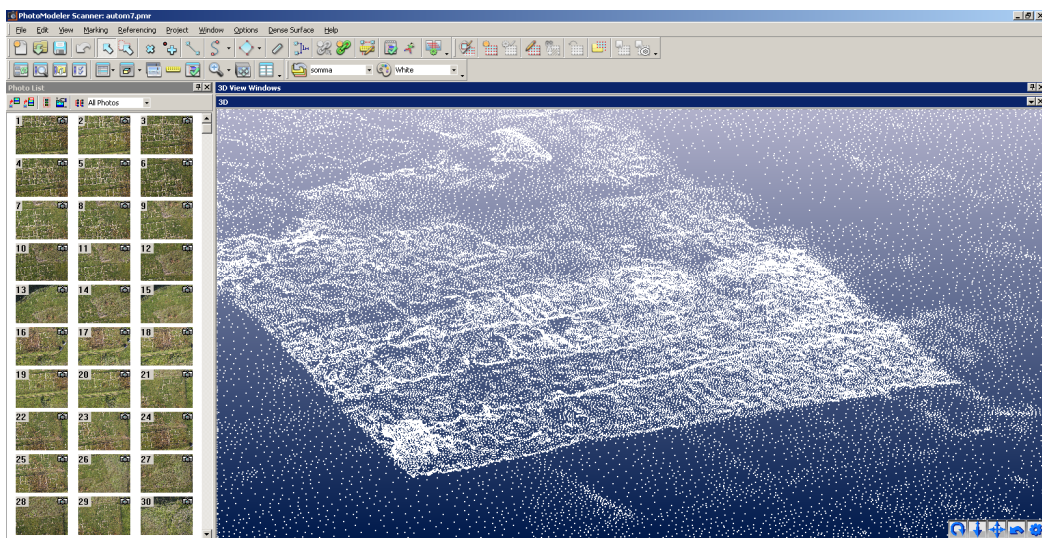


Figura 3 –Fasi di estrazione delle nuvole di punti relative ai Quartieri Settentrionali della Città Alta in PhotoModeler Scanner.

Le nuvole di punti estratte possono essere esportate per essere mosaicate, normalizzate e georeferenziate in ambiente GIS, ottenendo delle griglie di punti 2,5 D del passo desiderato, utilizzabili per successive elaborazioni ed in particolare per l'ortorettifica delle immagini, ottenendo così prodotti intermedi e risultati finali pienamente compatibili con ambienti software di tipo cartografico.

Nel caso delle immagini sferiche, la procedura di elaborazione è stata realizzata in Pano2VR, un'applicazione in grado di generare panorami sferici e cilindrici e di esportarli in formato Flash, HTML5 e QuickTime VR. La procedura viene eseguita in maniera semiautomatica e consente la generazione di prodotti con caratteristiche multimediali (presenza di collegamenti web, *hotspot* con immagini e filmati, testi, sonoro, ecc.) e multimodali (dai file residenti sul PC dell'utente ai prodotti visualizzabili su piattaforme mobili).

Risultati

Il processo sinteticamente descritto nelle righe precedenti ha portato alla realizzazione dei seguenti prodotti metrici di base:

- ortofoto a risoluzione 5 cm/px dell'area dei Quartieri Settentrionali (figura 4),
- ortofoto a risoluzione 1 cm/px dei Templi A-B del *Temenos* di Atena (figura 5),
- modello 2,5 D a passo 10 cm/px dell'area dei Quartieri Settentrionali (figura 6),
- modello 2,5 D a passo 2 cm/px dei Templi A-B del *Temenos* di Atena (figura 7).

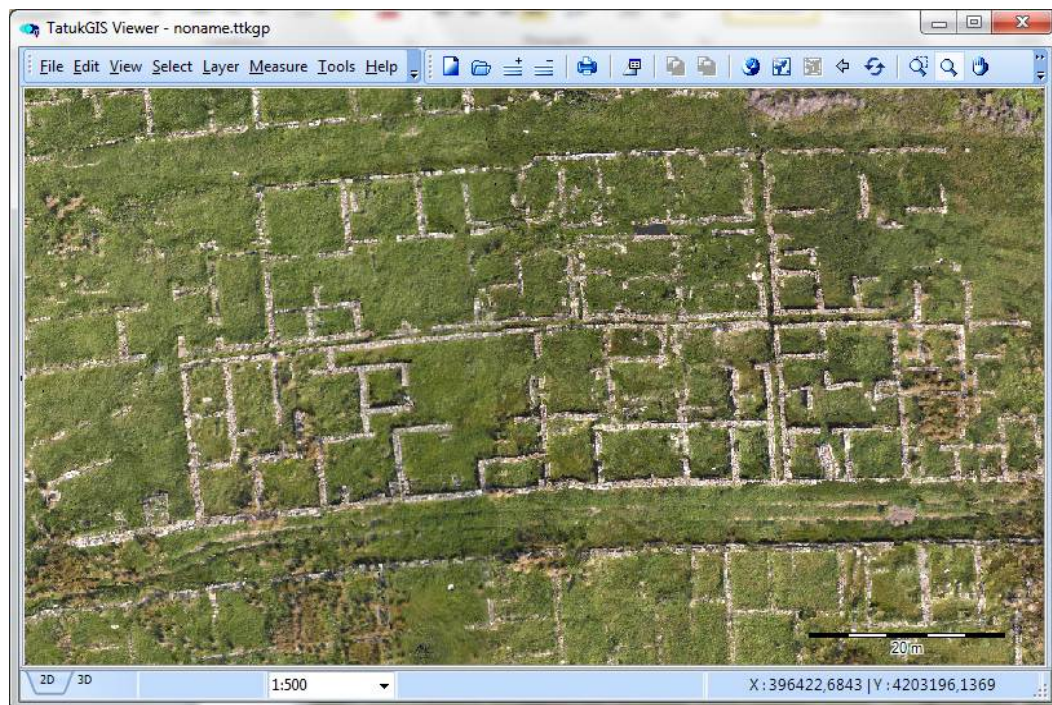


Figura 4 – Particolare dell'ortofoto dell'area dei Quartieri Settentrionali del Piano di Himera visualizzato in ambiente GIS.



Figura 5 – Ortofoto dei Templi A-B del Temenos di Atena.



Figura 6 – Ortofoto dell'area dei Quartieri Settentrionali drappeggiata su modello 2,5 D.

Tutti i prodotti sono georeferenziati ed è quindi possibile il loro inserimento in ambiente cartografico (figure 4 e 5) ed il loro impiego a fini specialistici. In aggiunta, a partire da questi elaborati di base, sono stati realizzati alcuni prodotti derivati destinati ad un uso diverso e principalmente alla fruizione ed in particolare: video da modelli tridimensionali (figura 7), panorami sferici distribuibili su varie piattaforme (figura 8).



Figura 7 – Frame video con visualizzazione tridimensionale (basata su modello 2,5 D a 2 cm/px) di una porzione dei Templi A-B del Temenos di Atena.

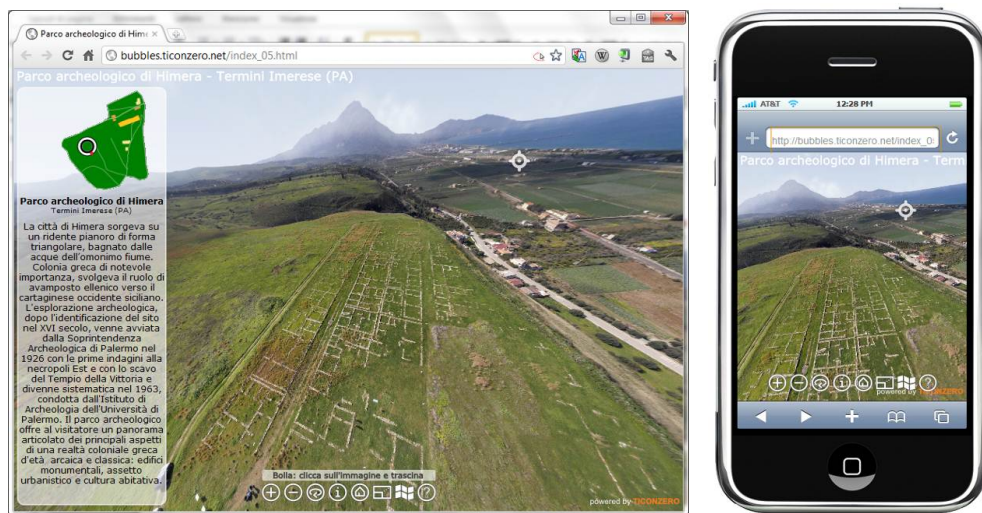


Figura 8 – Immagine sferica del Piano di Himera. Esempio di distribuzione multimodale: su web in formato Flash e su piattaforma mobile in HTML5.

Discussione e conclusioni

Il rilievo eseguito nel febbraio del 2011 sull'area archeologica di Himera ha portato alla acquisizione in volo pianificato, di 137 prese uniche riferite ad un'area superiore ai 4 ettari. Le operazioni di volo hanno richiesto circa due ore di tempo ed i dati acquisiti sono stati utilizzati per generare elaborati metrici e multimediali.

La estrema velocità delle fasi di rilievo è da attribuire all'adozione di una metodologia che associa tecniche di fotogrammetria a strumenti tipici della geomatica. In questo senso la fase cruciale è la

pianificazione dei voli in ambiente cartografico che consente di utilizzare efficientemente le piattaforme UAV come parte integrante di una strumentazione destinata alla raccolta di misure. La pianificazione, oltre ad ottimizzare le operazioni di volo e di ripresa, produce il vantaggio di renderle perfettamente riproducibili nel tempo, consentendo (i) l'acquisizione di serie temporali riferite alla medesima scena o (ii) quella di più set di dati basati su differenti sensori (come termocamere o camere nel vicino infrarosso). Da questo punto di vista, l'esempio presentato in questo lavoro rappresenta solo una delle possibili tipologie di applicazione delle piattaforme leggere di tipo UAV al vasto ambito tematico in cui si incrociano tecniche di fotogrammetria aerea a bassa quota e di telerilevamento di prossimità.

La risoluzione dei prodotti metrici ottenuti fa ritenere queste piattaforme particolarmente indicate nel rilievo di aree delle dimensioni tipiche degli scavi archeologici. In tali contesti, l'uso di metodi *image based* che sfruttano gli UAV di tipo leggero può rappresentare un valido complemento ed, in taluni casi, una significativa alternativa ad altre metodologie di rilievo metrico come quelle basate sul *laser scanner* terrestre. Al di là dell'estrema rapidità di esecuzione, la possibilità di acquisire dati dall'alto, oltre a fornire un punto di vista unico, consente di risolvere alcuni problemi tipici dei rilievi dal basso (come l'acquisizione delle coperture degli edifici o la presenza di ostacoli non aggirabili da terra). Inoltre, l'esecuzione di voli a quote ridotte, ed il conseguente incremento di risoluzione geometrica delle immagini, consente di generare su aree selezionate ortofoto e modelli di elevato dettaglio. I modelli di aree e manufatti presentati in questo lavoro possono essere destinati a differenti usi. Le ortofoto possono essere impiegate come base per la produzione di prodotti vettoriali riferiti all'area in esame o per documentare le fasi successive di uno scavo archeologico. I modelli tridimensionali di maggior dettaglio possono essere texturizzati ed impiegati in operazioni di restauro virtuale o possono essere utilizzati come copie digitali di un bene di particolare interesse (Manferdini et al., 2008; Remondino, 2008; Remondino et al., 2010).

Allo stesso tempo, le medesime informazioni possono rappresentare le basi di oggetti destinati alla fruizione alternativa del bene archeologico da parte del grande pubblico ed entrare a far parte di prodotti che sfruttino la convergenza di differenti modalità di accesso al bene (diretta, documentale, virtuale) e utilizzino la molteplicità di sistemi e dispositivi oggi disponibili (dalle sale per la Realtà Virtuale Immersiva agli *smartphone* utilizzati per arricchire di contenuti la fruizione tradizionale).

Ringraziamenti

Il rilievo della Città Alta del Piano di Himera è stato eseguito nell'ambito di una sperimentazione promossa dalla dott.ssa Francesca Spatafora, Direttore del Parco Archeologico di Himera e dal dott. Enrico Carapezza, Dirigente del "Servizio Promozione e valorizzazione delle tradizioni e dell'identità siciliana" del "Dipartimento Regionale dei Beni Culturali e dell'identità siciliana". A entrambi va il sentito ringraziamento degli autori.

Riferimenti Bibliografici

- Manferdini A.M., Remondino F., Baldissini S., Gaiani M., Benedetti B. (2008), *3D modeling and semantic classification of archaeological finds for management and visualization in 3D archaeological databases*. Proc. of 14th Int. Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM 2008), Limassol, Cyprus, 221-228.
- Remondino F. (2010), *Documentazione e modellazione 3D di Beni Culturali. L'approccio multi-sensoriale e multi-risoluzione*. Archeomatica, 1/2010, 8-11.
- Remondino F., El-Hakim S.F., Gruen A. e Zhang L. (2008), *Turning Images into 3D models*. IEEE Signal processing Magazine, 55-64.
- Sarazzi D., Mancon L., Julitta F., Quartieri A. (2011), *Micro e mini UAV per l'acquisizione ed elaborazione fotogrammetrica di immagini di scavi archeologici e strutture architettoniche* (questo volume).
- Vassallo S. (2004), *Himera, guida breve*, Regione Siciliana - Assessorato dei Beni Culturali e dell'identità siciliana, Palermo, pp.56.

Batimetria *multibeam*: sviluppo e possibili applicazioni

Alessandro Bosman, Daniele Casalbore

CNR, Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, Area della Ricerca di Roma 1, Montelibretti
Via Salaria Km 29,300, Monterotondo (RM), Tel. 06.90672595 - Fax 06.90672733, alessandro.bosman@cnr.it

Riassunto

In questi ultimi dieci anni la batimetria *multibeam* si è rivelata come uno dei mezzi più efficaci per mappare ed interpretare le morfologie sommerse sia in ambito marino che in acque interne (fiumi e laghi), ampliando notevolmente le conoscenze dei processi geologici attivi come frane, faglie, eruzioni sottomarine, fuoriuscita di fluidi ecc.. Recentemente tale tecnica geofisica è stata utilizzata con successo anche per ricerche archeologiche e per la mappatura degli habitat naturali, nonché per una prima valutazione dei rischi naturali e antropici in aree marine. L'obiettivo di questo lavoro è illustrare l'efficacia di tale metodologia e fornire alcuni esempi di applicazioni *multibeam* ad alta risoluzione, che spaziano dall'archeologia sino all'individuazione di geo-rischi marini.

Abstract

In the last decade, multibeam bathymetry has revolutionized our ability to interpret seabed morphology in subaqueous environments, such as marine and inland waters (rivers and lakes), greatly widening our knowledge on the geological processes that sculpture the seafloor, such as landslides, faults, submarine eruptions, fluid escapes etc.. In recent times, multibeam bathymetry has been also efficiently used for archeological studies and habitat mapping as well as for a first geo-hazard assessment in marine areas.

The aim of the paper is to show some applications of multibeam data to archeological studies such as Tiber River in Rome and for a first mapping of marine geohazard features along the Italian coasts.

Introduzione

In quest'ultimo decennio, il crescente sfruttamento delle risorse naturali in acque sempre più profonde, la presenza di infrastrutture ubicate sui fondali (cavi, fibre ottiche, condotte ecc.), nonché la maggiore importanza economica e sociale delle aree costiere-marine, ha portato ad un'intensa diffusione ed utilizzo di sistemi ecometrici multifascio allo scopo di mappare le aree marine in tempi relativamente brevi e a costi contenuti.

La mappatura batimetrica *multibeam* ha aumentato notevolmente le conoscenze dei lineamenti morfologici presenti sui fondali e dei processi geologici che agiscono in tali ambienti, coinvolgendo diversi settori disciplinari come la geologia-geofisica marina, l'ingegneria marittima, l'archeologia, la geodesia ecc..

La possibilità di ottenere DEM ad alta risoluzione e precisione, insieme a misure di riflettività dei fondali, rappresenta oggi un mezzo unico ed insostituibile per lo studio ed il monitoraggio ambientale, l'individuazione dei geo-rischi marini, la progettazione di opere marittime e il loro monitoraggio, sino all'individuazione di siti archeologici.

Metodologia d'indagine

La tecnologia *multibeam* si basa sull'emissione di un fascio di onde acustiche, caratterizzate da un'elevata frequenza (da decine a centinaia di kHz), molto ampio nel piano trasversale alla rotta (tra

60° e 120°) e stretto nel piano ad essa parallelo (da 0.5° a 6°). Le onde diffratte dal fondo marino sono registrate da un trasduttore ortogonale (apertura 0.5°-2°) all'emettitore dopo un tempo che dipende dalla distanza percorsa e dalla velocità del suono nella colonna d'acqua. I fondali sono quindi insonificati in maniera omogenea, ottenendo una semina di punti quotati (*soundings*) con risoluzione decrescente (*footprint size*) all'aumentare delle profondità.

L'impiego dell'ecoscandaglio multifascio prevede una complessa architettura del sistema d'acquisizione, costituita da: 1) un sistema di posizionamento GPS con correzione differenziale (DGPS, RTK e/o PPK), 2) un sensore inerziale per la definizione dei parametri di assetto dell'imbarcazione (*roll*, *pitch* e *heave*), 3) una girobussola per l'orientamento del sistema (*yaw*), 4) due trasduttori per l'emissione e la ricezione degli impulsi acustici, 5) un sistema software e hardware per la gestione ed il controllo dell'acquisizione dei dati, 6) una sonda di velocità del suono per il calcolo del profilo di velocità lungo la colonna d'acqua per il ri-tracciamento (*ray tracing*) delle onde acustiche, 4) una stazione mareografica in sito per le correzioni delle escursioni di marea.

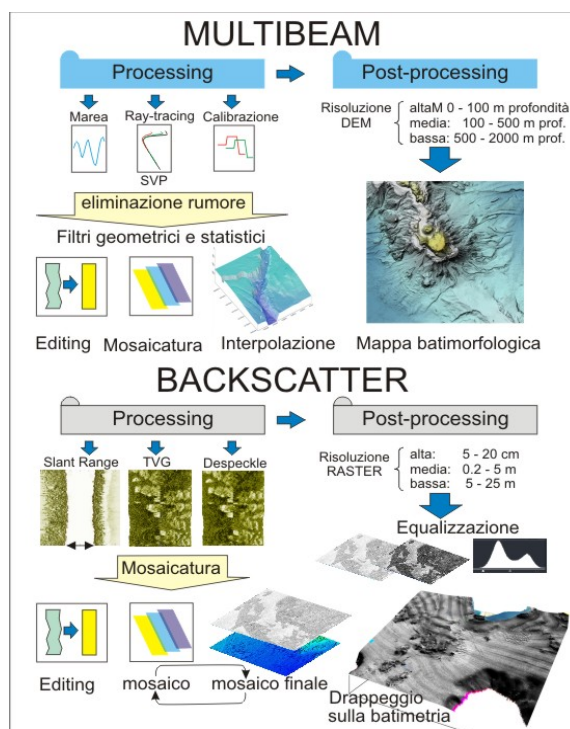


Figura 1 – Diagrammi di flusso per l'elaborazione dei dati ecometrici multifascio per la generazione di DEM e mosaici di riflettività (*backscatter*) del fondale.

Attraverso l'elaborazione dei punti quotati si ottengono Modelli di Elevazione del terreno (DEM), rappresentabili sotto forma di superfici 3D, rilievi ombreggiati e isobate. In funzione delle tecniche di posizionamento, delle profondità d'investigazione, delle frequenze impiegate dai sensori di emissione e ricezione, nonché degli standard di elaborazione utilizzati e dalla metodologie di acquisizione (calibrazione dei sensori ecometrici, determinazione degli offset strumentali, stato del mare, ecc.), si otterranno modelli digitali del terreno a bassa, media ed alta risoluzione.

In generale la risoluzione dei DEM decresce all'aumentare del battente d'acqua (distanza sorgente fondo mare) e alla conseguente diminuzione della frequenza del segnale acustico emesso, problema

in parte risolto abbassando la sorgente a poche decine di metri dal fondo con sistemi autonomi profondi (AUV - *Autonomous Underwater Vehicle*).

Nei sistemi *multibeam* più recenti, è possibile registrare anche l'ampiezza dei segnali ricevuti (*backscatter* o riflettività del fondo), che fornisce importanti informazioni sulla distribuzione superficiale dei sedimenti ivi presenti (sedimenti fini, medi e grossolani). Il trattamento dei punti quotati e delle riflettività dei fondali comportano complesse fasi di elaborazione realizzate con software commerciali e non. Uno schema esemplificativo delle principali fasi di elaborazione dei segnali è illustrato in figura 1.

Posizionamento nei rilievi batimetrici multibeam

Uno degli aspetti più critici nei rilievi geofisici marini consiste nelle tecniche di posizionamento dei natanti, che in questi ultimi hanno subito un notevole sviluppo nell'ambito delle indagini marino-costiere. Comunemente nelle indagini geofisiche a mare sono utilizzate correzioni differenziali con precisioni stimate a pochi metri (misure di codice). Negli ultimi anni però lo sviluppo di sensori ecometrici ad elevata capacità risolutiva ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) ha reso necessario l'impiego di precisioni sempre maggiori, comunemente impiegate nella geodesia terrestre. Attualmente una delle più utilizzate tecniche di posizionamento di alta precisione dei natanti in ambito marino-costiero risulta essere la modalità RTK (misure di fase) che consente di raggiungere precisioni dell'ordine centimetrico/decimetrico sul piano orizzontale e verticale. Tali correzioni possono essere trasmesse per mezzo di modem GSM, stazioni radio UHF o mediante protocollo NTRIP. Tuttavia l'utilizzo di suddette correzioni ha evidenziato come in molti casi si possano verificare problemi legati alla trasmissione dei segnali con conseguente perdita della precisione (*FLOAT* – ambiguità di fase non fissata ad intero) e, conseguente aumento dei tempi nelle fasi dell'acquisizione.

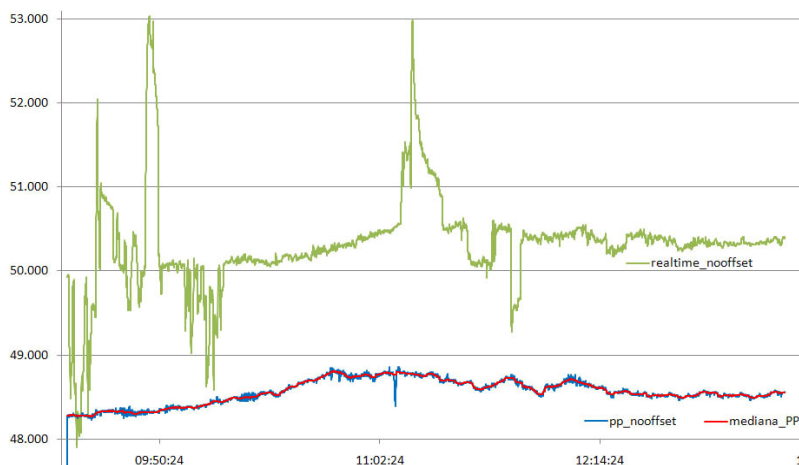


Figura 2 – Comparazione delle quote ellissoidiche in modalità RTK (verde) e post elaborate (blu) durante un rilievo morfobatimetrico. I dati post elaborati sono stati successivamente trattati con mediana mobile a 2 minuti e utilizzati per la correzione mareografica.

La precisione ottenibile tramite posizionamento GPS, indipendentemente dalle metodologie e tecniche di rilievo adottate, è fortemente condizionata dal numero di satelliti tracciati e dalla qualità dei segnali ricevuti. Un basso numero di satelliti visibili, o interruzioni nella ricezione dei segnali (*cycle-slips*), portano ad una diminuzione di precisione nel posizionamento. Questi problemi possono essere riscontrati in fase di rilievo, specialmente nelle zone con visibilità di cielo limitata spesso presenti in prossimità di coste alte (isole vulcaniche, falesie ecc.) o in aree fluviali per la presenza di argini, alberi e ponti, il cui l'attraversamento da parte dell'imbarcazione causa una

interruzione nella ricezione dei segnali dei satelliti tracciabili. Tale problema è stato in parte superato mediante le tecniche di *post-processing* attraverso l'utilizzo di software dedicati (Leica LGO, Trimble GTO), che consentono di elaborare i dati in tempi relativamente brevi con congruenza e continuità della soluzione, con una diminuzione del rumore e assenza di discontinuità, migliorando significativamente la qualità del dato (Fig. 2), ma soprattutto, accorciando drasticamente i tempi d'acquisizione che possono tradursi anche nel 30-50% del tempo impiegato con conseguente risparmio dei costi.

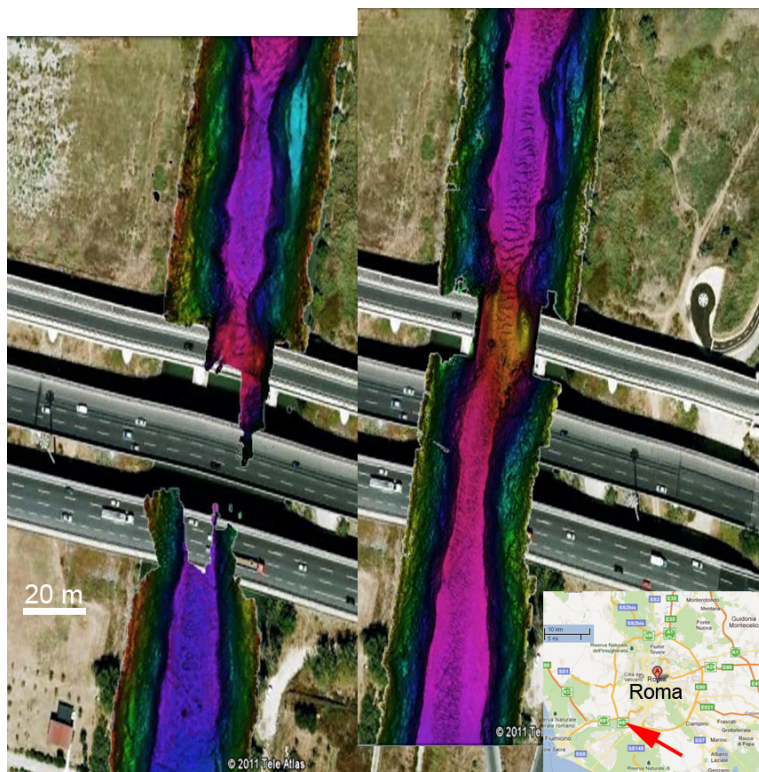


Figura 3 – Comparazione tra due rilievi ecometrici ad alta risoluzione (10 cm), realizzati in prossimità dell'alveo Tiberino presso il GRA (Ponte Mezzocammino) attraverso la tecnica tradizionale RTK a sinistra e *post-processing* con sistema POSMV e POSPac a destra.

Attualmente tra i software commerciali più diffusi e affidabili dedicati all'elaborazione per applicazioni marine e/o acque interne ricordiamo il POSPac che, oltre a fornire tempi relativamente brevi di calcolo, permette di ottenere una copertura batimetrica continua anche in aree con scarsa visibilità dei satelliti a precisioni accettabili. A titolo di esempio, in figura 3 è illustrata la comparazione tra due rilievi ecometrici multifascio ad alta risoluzione acquisiti nell'alveo Tiberino con tradizionale tecnica RTK (sinistra nel 2006) e *post-processing* mediante il sistema d'acquisizione POSMV e software POSPac (destra nel 2011). È evidente la continuità delle morfologie sull'immagine di destra in presenza di tre tratti stradali che interrompevano la ricezione dei segnali dai satelliti, e l'assenza di dati batimetrici a sinistra, acquisiti in modalità tradizionale.

Batimetria multibeam e applicazioni archeologiche

La tecnologia *multibeam* ad alta risoluzione ha recentemente avuto una grande espansione nel campo delle ricerche archeologiche in ambito marino, lacustre e fluviale, in quanto consente di ottenere in acque poco profonde un'elevatissima risoluzione e densità dei punti quotati (centinaia di punti per metro quadro), che possono essere utilizzati per una ricostruzione dettagliata delle morfologie sommerse e delle strutture antropiche ivi presenti (Fig. 4).

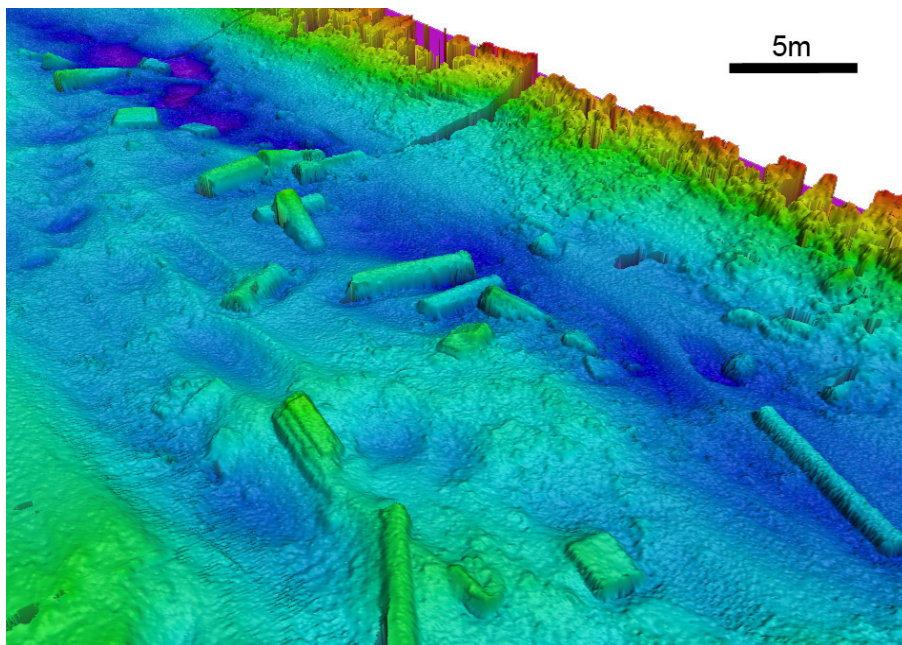


Figura 4 – Colonne e blocchi individuati sul fondo fiume Tevere all'altezza dell'Isola Sacra. La colonna ubicata in basso a destra ha un'estensione di circa 7 m (DEM ottenuto a 5 cm di risoluzione con copertura ottenuta da tre strisciate).

Recenti indagini geofisiche realizzate nell'ambito di due progetti di studio nell'alveo Tiberino (2006 - 2011), hanno permesso di ricostruire per la prima volta in continuità l'assetto batimorfologico del fiume Tevere dalla foce (Fiumara Grande e Fiumicino) sino a Ponte del Grillo per una distanza complessiva di circa 80 km (Bernabini et al. 2006, 2007, 2008).

I dati batimetrici sono stati raccolti utilizzando due sensori ecometri ad alta risoluzione Reson SeaBat 8125 e 7125 (455 - 400 kHz), utilizzando il trasduttore sia in modalità standard (illuminazione verso il basso) sia in modalità a testa girata (rotazione a dritta di 30°), in modo da insonificare i fondali sino ad una profondità di pochi centimetri.

La generazione di DEM, a risoluzioni compresa tra 5 e 20 cm, ha rivelato per la prima volta strutture archeologiche nel braccio del Tevere a NE dell'Isola Sacra attribuibili a colonne di epoca romana giacenti sul fondo ad una profondità di 5-7 m, in alcuni casi sovrapposte l'una all'altra (Fig. 4). Le colonne presentano lunghezze variabili da 3 a 7 m e diametri pari a circa 1 m, ed interrompono la regolare forma dell'alveo tiberino.

Nello stesso settore d'indagine, in prossimità del porto di Traiano (Fig. 5) in riva destra, sono state individuate per un tratto di circa 200 m dei depositi di blocchi rilevati di circa 7 m, equidistanziati di circa 20 m. L'integrazione con i risultati ottenuti da campagne d'indagine di magnetometria a terra (Keay S. et al., 2005), ha permesso di attribuire tali strutture ad un approdo di imbarcazioni direttamente collegate a dei magazzini di epoca romana.

Altre importanti strutture antropiche individuate attraverso i rilievi batimetrici eseguiti sono: a) strutture di fondazioni facenti parte della chiusura meridionale delle Mura Aureliane nei pressi del quartiere Testaccio di Roma ed in prossimità del Ponte Sisto, b) la presenza di strutture attribuibili a edifici termali realizzati durante l'Impero di Adriano nel tratto di Lungotevere di Pietra Papa.

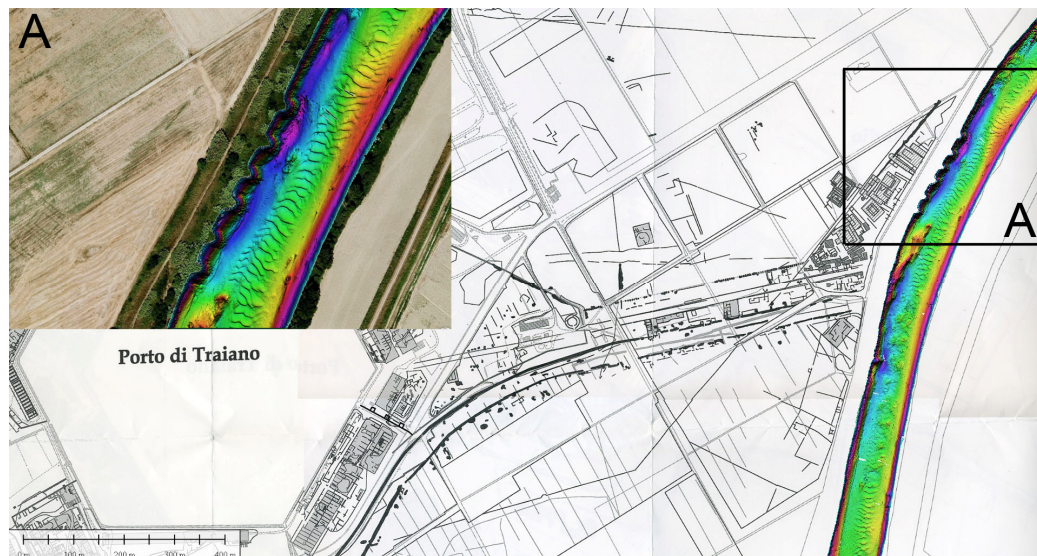


Figura 5 – Integrazione dei dati batimetrici multibeam e carta interpretativa dei rilievi magnetometrici di Keay S. (2005). In riva destra si osservano dei depositi di blocchi equidistanziati 20 m per una lunghezza di circa 200 m, attribuibili a strutture di approdo di epoca Romana.

Geologia Marina e geo-rischi marini

Nell'ambito delle attività di Geologia Marina la tecnologia *multibeam* ha avuto un ruolo predominante in questi ultimi anni, abbracciando numerosi campi di ricerca e applicazioni che comprendono la mappatura estensiva di aree ancora non note, l'individuazione dei geo-rischi marini, sino al monitoraggio ambientale in particolari zone ritenute critiche in termini di pericolosità.

Numerosi studi sono stati condotti per la mappatura estensiva dalle aree di piattaforma alle scarpate continentali, evidenziando la presenza di diffusi e attivi processi morfo-sedimentari che possono comportare rilevanti rischi per le infrastrutture e le popolazioni che vivono lungo la fascia costiera. Fenomeni d'instabilità gravitativa a piccola media e grande scala (Twichell et al., 2009; Chiocci et al., 2011; Casalbore et al., 2011^a), evoluzione retrogressiva delle testate di canyon lungo costa (Casalbore et al., 2011^b), migrazione di forme di fondo all'interno di canyon (Smith et al., 2007), fagliazioni che arrivano in superficie (Gökasan et al., 2001), costituiscono solo alcuni esempi degli elementi di pericolosità presenti sui fondali (Fig. 6). In particolare l'utilizzo della batimetria ad alta risoluzione si è rivelata particolarmente idonea ed efficace per lo studio di apparati vulcanici insulari e non, ove le tradizionali tecniche di sismica monocale hanno scarso successo o risultano totalmente inefficaci a causa delle elevate pendenze (20-40°) ed elevata impedenza acustica dei fondali dovuta alla presenza di substrato vulcanico e/o materiale grossolano (Bosman et al., 2009; Casalbore et al., 2010). È inoltre importante sottolineare come, rilievi multitemporali in aree estremamente attive, come ad esempio i vulcani insulari italiani (Stromboli, Vulcano ed Etna) o il margine continentale calabro, risultino particolarmente efficaci nell'identificare e monitorare l'evoluzione morfologica dei versanti sommersi e delle morfologie ivi presenti. Un esempio recente di tali studi è rappresentato dall'evento di frana-maremoto avvenuto nel dicembre del 2002 in corrispondenza della porzione sommersa della Sciara del Fuoco presso l'isola di Stromboli (Chiocci

et al., 2008^a). In questo caso, la possibilità di avere un rilievo batimetrico acquisito circa 1 anno prima di tale evento, ha permesso di quantificare i volumi della frana e di comprenderne i principali meccanismi di innesco e sviluppo attraverso la comparazione con i dati ecometrici acquisiti successivamente all'evento. L'esecuzione di rilievi ripetuti nel tempo ha permesso inoltre di monitorare l'evoluzione della nicchia sottomarina generata dalla frana al fine di ottenere importanti indicazioni sulla pericolosità associata a tali eventi (Chiocci et al., 2008^b, Baldi et al., 2008). Studi analoghi sono stati condotti anche per una frana sottomarina che ha interessato recentemente i piloni di attracco di uno stabilimento chimico (fig. 6a) ubicato nei pressi di Punta Alice nella Calabria Ionica (Casalbore et al., 2011^c).

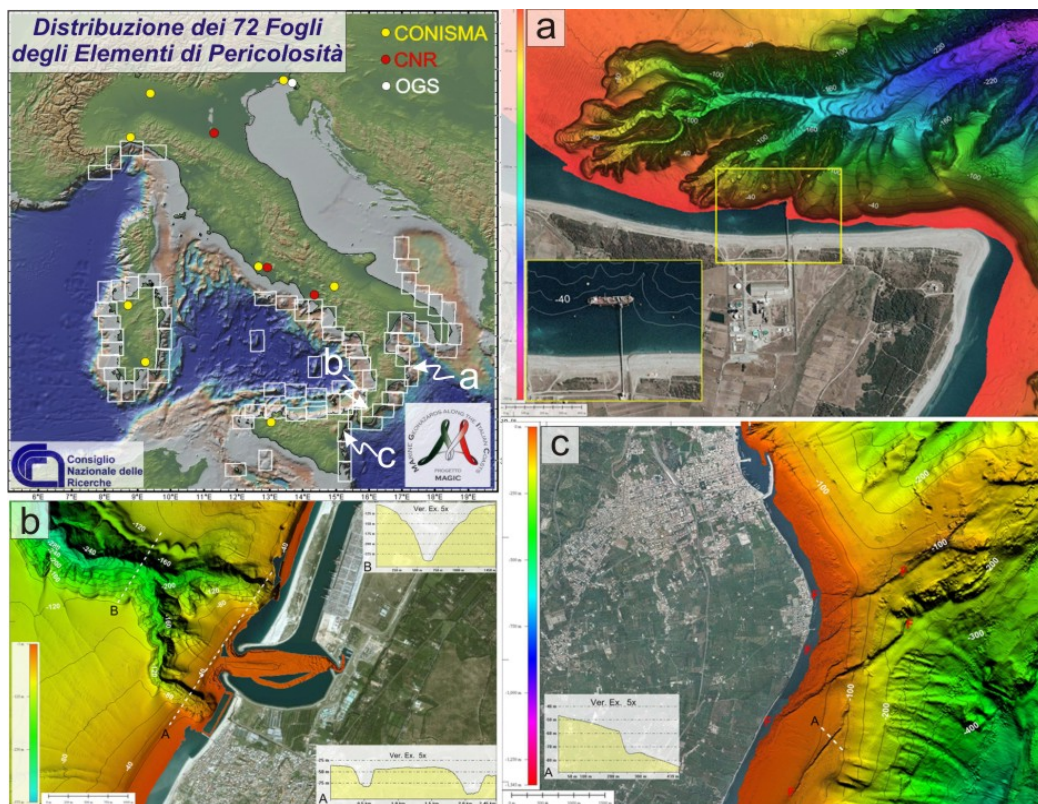


Figura 6 – Ubicazione dei 72 Fogli degli elementi di pericolosità dei mari italiani in fase di completamento; a) Testata del canyon di Madonna di Mare presso Pta Alice in arretramento sulla linea di riva; b) biforcazione della testata del canyon di Gioia Tauro in prossimità del porto omonimo; c) faglie attive lungo la dorsale Riposto che ribassano i versanti emersi e sommersi di decine di metri lungo il fianco nord-orientale dell'Etna.

L'efficacia di tale metodologia per lo studio di eventi di instabilità sottomarina ha portato ad una attiva collaborazione tra il Dipartimento della Protezione Civile e la quasi totalità della comunità scientifica dei Geologi Marini per la realizzazione di un progetto a scala nazionale coordinata dal Prof. F.L. Chiocci per la prima mappatura morfobatimetrica dei mari italiani (MAGIC: *Marine Geohazard along the Italian Coasts*).

Numerose istituzioni afferenti al Consiglio Nazionale delle Ricerche (IGAG, ISMAR e IAMC), a nove Dipartimenti Universitari (Univ. di Roma Spienza, Univ. di Palermo, Univ. Di Cagliari, Univ.

di Sassari, Univ. Di Milano Bicocca, Univ. del Sannio, Univ. di Trieste, Univ. di Genova), consorziati all'interno del CoNISMa (Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Scienze del Mare) e all'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale di Trieste, sono attivamente coinvolte nell'acquisizione elaborazione ed interpretazione di dati batimetrici ad alta risoluzione per la produzione della prima Mappa degli Elementi di Pericolosità dei Fondali Marini Italiani, costituita da 72 Fogli in scala 1:50.000 (Fig. 6), che includono diverse tipologie di carte tematiche, in modo da comprendere i diversi aspetti connessi alla pericolosità geologica e le differenti scale a cui essa può essere investigata e rappresentata. Questo imponente dataset batimetrico esteso in aree non note, oltre ad ampliare le conoscenze sui processi geologici presenti nei nostri mari, rappresenterà una base di riferimento sia per la pianificazione di indagini più approfondite, sia per la gestione di situazioni di emergenza in mare.

Conclusioni

La mappatura batimetrica multibeam ad alta risoluzione rappresenta oggi uno metodi più efficaci nelle prospezioni geofisiche marine, con numerosi campi d'applicazione nelle scienze naturali, dalla geologia alla biologia, oltre che nei settori dell'ingegneria (infrastrutture marittime, reperimento di inerti e dragaggi), dell'archeologia (individuazione di siti) e della geodesia (analisi di deformazioni). Essa rappresenta quindi una base imprescindibile per qualsiasi operazione di approfondimento conoscitivo delle zone costiere e profonde e delle acque interne, per l'individuazione dei geo-rischi marini naturali e antropici e per la gestione di situazioni di emergenza.

Bibliografia

Baldi P, Bosman A, Chiocci FL, Marsella M, Romagnoli C, Sonnessa A, (2008), Integrated subaerial-submarine morphological evolution of the Sciara del Fuoco after the 2002 landslide. In: *The Stromboli Volcano: An Integrated Study of the 2002-2003 Eruption*, AGU Geophysical Monograph Series, Vol 182 (S. Calvari, S. Inguaggiato, G. Puglisi, M. Ripepe, M. Rosi, Eds.), pp. 171-182. ISBN 978-0-87590-447-4.

Bernabini M, Bosman A, Chiocci FL, Macelloni L, Orlando L, (2006), First MultiBeam and High Resolution Reflection Seismics Survey on the Tiber River Lower Course. *European Association of Geoscientists & Engineers Near Surface 2006, 12th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. 4-6 September 2006, Helsinki, Finland.

Bernabini M, Bosman A, Chiocci FL, Macelloni L, Mazzoni A, Orlando L, Geoitalia (2007), Multibeam and High-resolution seismic reflection on the Tiber River. *Sesto Forum Italiano di Scienze della Terra*. Rimini, 12-14 settembre 2007. Vol 2, 2007 ISSN 1972-1552 pp.

Bernabini M, Bosman A, Orlando L, (2008), Indagini in acqua. *Geofisica per l'archeologia possibilità e limiti*. Atti del convegno Roma, 10 dicembre 2008, Palazzo Massimo, pp. 57-66.

Bosman A, Chiocci FL, Romagnoli C, (2009), Morpho-structural setting of Stromboli volcano revealed by high resolution bathymetry and backscatter data of its submarine portions. *Bulletin of Volcanology*. 71, pp. 1007 – 1019.

Casalbore D, Romagnoli C, Bosman A, Chiocci FL (2011^a), Potential tsunamigenic landslides at Stromboli Volcano (Italy): Insight from marine DEM analysis. *Geomorphology*, Volume 126, Issues 1-2, 1 March 2011, Pages 42-50.

Casalbore D, Chiocci FL, Scarascia Mugnozza G, Tommasi P, Sposato A. (2011^b) Flash-flood hyperpycnal flows generating shallow-water landslides at Fiumara mouths in Western Messina Strait (Italy). *Marine Geophysical Researches* Volume 32, Pages 257–271

Casalbore D, Bosman A, Chiocci FL (2011^c), Study of recent small-scale landslides in geologically active marine areas through repeated multi-beam surveys: examples from the Southern Italy, in *Submarine Mass Movements and Their Consequences, "Advances in Natural and Technological Hazards Research" Series*, Vol. 34 (ISBN 978-94-007-2161-6).

Chiocci FL, Coltelli M, Bosman A, Cavallaro D, (2011), Continental Margin Large-Scale Instability Controlling the Flank Sliding of Etna Volcano. *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 305, Issues 1-2, 1 May 2011, Pages 57-64.

Chiocci FL, Romagnoli C, Bosman A, (2008^a), Morphologic resilience and depositional processes due to the rapid evolution of the submerged Sciara del Fuoco (Stromboli Island) after the December 2002 submarine slide and tsunami. *Geomorphology* 100, 356-365. doi:10.1016/j.geomorph.2008.01.008.

Chiocci FL, Romagnoli C, Tommasi P, Bosman A, (2008^b), The Stromboli 2002 tsunamigenic submarine slide: characteristics and possible failure mechanisms. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 113, B10102, doi:10.1029/2007JB005172.

Gökasan A, Alpar B, Gazioglu C, Yasar Yücel Z, Tok B, Dogan E, Güneysu C, (2001), Active tectonics of the Izmit Gulf (NE Marmara Sea): from high resolution seismic and multi-beam bathymetry data. *Marine Geology*, 175, 273-288, doi: 10.1016/S0025-3227(01)00133-5.

Keay S, Millett M, Paroli L, Strutt K, (2005), Portus. *Archaeological monographs of the British School at Rome*. Direzione Generale per i Beni Archeologici.

Smith DP, Kvitek R, Iampietro PJ, Wong K, (2007), Twenty-nine months of geomorphic change in upper Monterey Canyon (2002-2005). *Marine Geology*, Volume 236, Pages 79-94.

Twichell DC, Chaytor JD, Ten Brink US, Buczkowski B, (2009), Morphology of late Quaternary submarine landslides along the U.S. Atlantic continental margin. *Marine Geology*, Volume 264, Pages 4-15.

Struttura del progetto CLAM-PHYM per lo studio delle acque costiere e interne italiane tramite il sensore PRISMA

Braga Federica (*), Giardino Claudia (**), Cavalli Rosa Maria (***), Bresciani Mariano (**),
Bassani Cristiana (***), Alberotanza Luigi (*)

(*) Istituto di Scienze Marine, CNR-ISMAR, Venezia, e-mail: federica.braga; luigi.alberotanza @ismar.cnr.it

(**) Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, CNR-IREA, Milano
e-mail: bresciani.m; giardino.c@irea.cnr.it

(***) Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, CNR-IIA, Roma, rosa.cavalli; cristiana.bassani@lara.rm.cnr.it>

Riassunto

Il progetto CLAM-PHYM (*Coasts and Lake Assessment and Monitoring by PRISMA HYperspectral Mission*), finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana, si pone l'obiettivo di verificare le potenzialità del sensore iperspettrale PRISMA, in termini di risoluzione spaziale, temporale e spettrale, per la gestione e il monitoraggio dell'ambiente acquatico costiero e lacustre. Il progetto è focalizzato sulle metodologie per il miglioramento dei prodotti standard e per lo sviluppo di prodotti a valore aggiunto basati su algoritmi bio-ottici calibrati e validati nei siti test.

Abstract

The CLAM-PHYM (Coasts and Lake Assessment and Monitoring by PRISMA HYperspectral Mission) project, funded by Italian Space Agency, aims to verify the capability of PRISMA hyperspectral sensor (in terms of spatial, temporal and spectral resolution) for management and monitoring of coastal and lake ecosystems. The project is focused on the methodologies for improving standard products and developing added value products, that are based on bio-optical algorithms, calibrated and validated for the test site areas.

Razionale scientifico

Le acque costiere e interne sono ecosistemi caratterizzati da dinamiche e processi estremamente complessi. Gli studi ecologici di questi ambienti necessitano di scale spaziali e temporali difficilmente indagabili mediante gli approcci tradizionali (Lindell et al., 1999). Il telerilevamento è divenuto una tecnologia integrativa utile per lo studio degli ecosistemi acquatici, poiché permette di ottenere mappe quantitative di qualità delle acque con accuratezza e tempistiche adeguate (Bresciani et al., 2011), e rappresenta uno strumento fondamentale per consentire un monitoraggio multitemporale e spazializzato utile ai fini gestionali (Chen et al., 2004). Data la complessità ottica delle acque costiere ed interne, solo i dati iperspettrali, tramite il riconoscimento delle *features* spettrali della *water reflectance*, permettono il loro studio (Brando and Dekker, 2003).

Il progetto CLAM-PHYM, finanziato da ASI, si pone l'obiettivo di verificare le potenzialità del sensore iperspettrale PRISMA per lo sviluppo di prodotti a valore aggiunto per la gestione e il monitoraggio dell'ambiente acquatico attraverso algoritmi iperspettrali e loro validazione. Grazie alle esperienze scientifiche e metodologiche sviluppate, il team di progetto (CNR-ISMAR-IIA-IREA) vuole individuare gli aspetti innovativi e i benefit attesi dalle caratteristiche tecniche previste di PRISMA, in termini di risoluzione spaziale, temporale e spettrale, per la realizzazione di prodotti applicativi e operativi che soddisfino i requisiti degli stakeholder interessati.

Obiettivi del progetto

Il progetto si propone di affrontare la complessità e variabilità ottica delle acque costiere e interne e le loro problematiche con un approccio fisicamente basato al fine di migliorare la qualità del

prodotto di *Earth Observation*. Tale approccio richiede la disponibilità di dati per la calibrazione e validazione dei prodotti: per questo motivo sono previste campagne in situ, con la definizione di protocolli di acquisizione specifici per PRISMA, per la misura delle proprietà ottiche apparenti (AOP) e inerenti (IOP) di acque con un differente grado di trofia, trasparenza e complessità di tipologia di substrato/vegetazione. I dati raccolti e integrati con quelli già a disposizione permetteranno di sviluppare algoritmi e modelli bio-ottici per il monitoraggio della qualità delle acque. Inoltre, il progetto prevede una serie di studi sui processi di correzione atmosferica, correzione per gli effetti di adiacenza e per gli effetti causati dal *sun-glint*.

Attività del progetto

Il progetto CLAM-PHYM, iniziato in aprile 2011 ha durata quadriennale e prevede un duplice sviluppo: i) approfondire le tematiche di ricerca applicata legate agli obiettivi della missione PRISMA, tra i quali vi è il monitoraggio della qualità delle acque interne e delle aree costiere; ii) supportare ASI per gli aspetti di carattere scientifico attinenti alla progettazione e sviluppo della missione. Il perfezionamento e consolidamento degli algoritmi prevederà una 1° fase inerente lo stato dell'arte delle tecniche di misura (protocolli, strumentazione, pianificazione) e delle metodologie di processamento dei dati che porterà allo sviluppo di una versione preliminare di algoritmi e prodotti; una 2° fase in cui i prodotti e gli algoritmi preliminari verranno verificati e validati per ottenere algoritmi in versione avanzata. Questo permetterà la realizzazione di prodotti a valore aggiunto per la valutazione ambientale ed ecologica dello stato di qualità dei siti test. I primi risultati ottenuti sono l'analisi critica dello stato dell'arte relativa alla correzione atmosferica e alla rimozione degli effetti di adiacenza e *sun-glint* e sono state effettuate campagne di misura delle AOP e IOP in siti costieri e lacustri, in sinergia con altri europei, per la parametrizzazione della modellistica bio-ottica e la definizione degli algoritmi di correzione atmosferica.

Risultati attesi

I risultati delle attività consentiranno di simulare, calibrare e validare i dati iperspettrali PRISMA su laghi, ambienti di transizione e acque costiere che permetteranno di mappare i parametri otticamente attivi delle acque (clorofilla-a, sostanze gialle, solidi sospesi totali), di ottenere importanti informazioni sulle fioriture potenzialmente tossiche dei cianobatteri e di caratterizzare le praterie di fanerogame marine e macrofite lacustri. Partendo dai prodotti previsti si effettueranno elaborazioni e valutazioni ecologiche e ambientali per la generazione di prodotti a valore aggiunto. Le mappe delle concentrazioni di solidi sospesi e sostanze gialle, ad esempio, saranno utilizzate per verificare la tracciabilità della distribuzione della *plume* dei fiumi e quindi per calibrare e validare modelli di circolazione e di trasporto dei sedimenti. La possibilità di distinguere diverse tipologie di fitoplancton può essere sfruttata per identificare le fioriture dei cianobatteri nelle acque a maggiore grado di trofia (es. Lago Trasimeno). Le variazioni nella distribuzione, natura ed estensione delle fanerogame marine sommerse nei sistemi con batimetrie basse (es. Laguna di Venezia), saranno utilizzate come indicatori dello stato di salute dell'ecosistema marino.

Riferimenti bibliografici

- Brando VE, Dekker AG. (2003), Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality. *Trans. on Geosc. and Rem. Sens.*, 41, 1378-1387.
- Bresciani M, Stroppiana D, Odermatt D, Morabito G, Giardino C. (2011), Assessing remotely sensed chlorophyll-a for the implementation of the Water Framework Directive in European perialpine lakes. *Science of the Total Environment*, 409 (17), 3038-3091.
- Chen Q, Zhang Y, Ekroos A, Hallikainen M. (2004), The role of remote sensing technology in the EU water framework directive (WFD), *Environmental Science and Policy*, 7(4), 267-276.
- Lindell T, Pierson D, Premazzi G, Zilioli E, (1999), *Manual for monitoring european lakes using remote sensing techniques*. EUR 18665 EN, Official Publications of the European Communities, Luxembourg, p. 161.

Il contributo del telerilevamento all'interno del Progetto EULAKES

Mariano Bresciani, Claudia Giardino, Erica Matta

CNR-IREA, via Bassini 15 Milano, Tel. 02 23699298, Fax 02 236999300
e-mail: bresciani.m; giardino.c@irea.cnr.it; erica.matta@gmail.com

Sommario

Il progetto EULAKES (European Lakes Under Environmental Stressors) finanziato dal Central Europe Programme 2010-2013, prevede lo studio di quattro laghi europei: Garda (Italia), Charzykowskie (Polonia), Neusiedl (Austria) e Balaton (Ungheria). Obiettivo del progetto è studiare la vulnerabilità di alcuni laghi a diversi tipi di rischio per offrire strumenti atti a migliorare la pianificazione e gestione delle risorse. Si punta a creare un Sistema informatico per il supporto alle decisioni che offrirà un repertorio delle possibili misure che possono essere intraprese a tutela della qualità delle acque.

All'interno del progetto si sono valutate le caratteristiche di qualità delle acque dei quattro laghi con il contributo delle tecniche di telerilevamento. Il contributo ha previsto l'analisi della distribuzione spaziale dei pigmenti fotosintetici dei cianobatteri nel lago Charzykowskie; la mappatura delle macrofite del Garda tramite l'utilizzo d'immagini MIVIS e la *change detection*, tramite immagini Landsat, dei canneti del lago Neusiedl.

Al fine di valutare l'andamento della temperatura superficiale delle acque, dati di input per scenari previsionali futuri di global change, sono stati acquisiti circa 4800 prodotti MODIS 11A dal 2004 al 2010. L'analisi delle temperature ha permesso di valutare le differenze tra i laghi, i trend temporali e le differenze spaziali all'interno di ogni lago.

La valutazione delle caratteristiche dei parametri otticamente attivi (Clorofilla-a, Solidi sospesi totali, Sostanze gialle) e della trasparenza delle acque sono state ricavate dal processamento di oltre 250 immagini MERIS. Le immagini, acquisite seguendo le regole di monitoraggio della Water Frame Directive, sono state corrette per gli effetti di adiacenza (*tool* ICOL del *software* Beam-Visat dell'ESA) e per gli effetti atmosferici tramite l'applicazione di differenti software (codice 6S e Rete Neurale Beam). Ai dati in riflettanza, validati da misure spettroradiometriche di campo, sono stati applicati differenti algoritmi per la stima dei parametri di qualità delle acque. Per il lago di Garda è stato utilizzato l'algoritmo dell'ESA (*Case 2 Regional*), per i laghi Balaton e Neusiedl un algoritmo appositamente creato dalla media tra il *Case 2 Regional* e l'*Eutrophic* mentre per il lago Charzykowskie è stato utilizzato l'algoritmo *Eutrophic*.

I risultati ottenuti, validati tramite dati limnologici, hanno evidenziato le caratteristiche oligotrofiche del lago di Garda, meso-eutrofiche degli altri laghi, con il lago Neusiedl caratterizzato da elevata torbidità e presenza di sostanze organiche disciolte e il lago Charzykowskie caratterizzato da elevate fioriture di cianobatteri.

Abstract

EULAKES Project (European Lakes Under Environmental Stressors), funded by Central Europe Programme 2010-2013, includes four European lakes study: Garda Lake (Italy), Charzykowskie Lake (Poland), Neusiedl Lake (Austria) and Balaton Lake (Hungary). Aim of the Project is to evaluate lakes exposure to different type of risks in order to provide some useful tools to improve natural resources planning and management. The goal is to build an informatics system to support decision makers' purposes, which also provides a list of possible measures to be undertaken for water quality protection. Thanks to remote sensing techniques water quality characteristics have

been assessed. Our activity provided photosynthetic cyanobacteria specific pigments spatial distribution in Charzykowskie Lake, macrophyte mapping in Garda Lake using MIVIS images, and common reeds change detection in Neusiedl Lake through Landsat satellite images analysis. 4800 MODIS 11A products, from 2004 to 2010, have been acquired to evaluate surface water temperature trends, significant input data for future global change scenarios. Temperature analysis allowed the evaluation of lakes different characteristics, temperature temporal trends and temperature spatial variability inside each lake. Optical active parameters (Chlorophyll-a, Total Suspended Matter, Colored Dissolved Organic Matter), as well as water transparency, have been estimated from 250 MERIS images processing. Satellite images, acquired following Water Frame Directive monitoring rules, have been corrected for adjacent effects using ESA Beam-Visat software (ICOL tool). Atmospheric correction has been performed applying different softwares: 6S radiative transfer code and Beam Neural-Network. Different algorithms for the water quality parameters estimation have been applied to reflectance values, after their validation with spectroradiometric field measures. Garda Lake has been analysed with ESA Case 2 Regional algorithm, while for Balaton and Neusiedl lakes a new dedicated algorithm from Case 2 Regional and Eutrophic algorithms integration have been purposely created. Eutrophic algorithm has been used for Charzykowskie Lake. Results, validated through limnological data, highlighted Garda Lake's oligotrophic characteristics and other lakes' meso-eutrophic properties. Neusiedl Lake came out as highly turbid and colored organic dissolved matter rich lake, while Charzykowskie Lake is characterised by frequent cyanobacteria blooms.

Introduzione

Le tecniche di telerilevamento sono ampiamente utilizzate per la determinazione dei parametri di qualità delle acque dei laghi, sia a livello mondiale sia a livello europeo.

L'applicazione di queste tecniche in ambito europeo comprende differenti esempi, applicati sia allo studio dei laghi, sia alle riserve e sia agli ecosistemi lagunari.

Gli esempi più recenti di applicazione allo studio della qualità delle acque dei laghi riguarda lo studio dei laghi boreali (Strömbeck e Pierson 2001; Kutser et al., 2005; Voutilainen et al., 2007; Paavel et al., 2007); dei laghi perialpini (Keller 2001; Giardino et al., 2005; Albert and Peter 2006; Odermatt et al., 2008; Guanter et al., 2010; Bresciani et al., 2011a); dei laghi italiani (Giardino et al., 2007a; Bresciani et al., 2009; Giardino et al., 2010a); di piccoli laghi inglesi (George e Malthus 2001; Hunter et al., 2010a) e piccoli laghi e riserve in Belgio e Olanda (Dekker et al., 2001; Van Mol and Ruddick 2005).

Tra lo studio delle riserve d'acqua destinata all'uso umano sono da citare i lavori sulle riserve spagnole (Simis et al., 2007) e olandesi (Dekker et al., 2002); esempi di studi sugli ecosistemi lagunari sono sulla laguna della Curonia tra Lituania e Russia (Giardino et al., 2010b) e la laguna di Venezia in Italia (Alberotanza et al., 2006).

Le tecniche di telerilevamento sono attualmente capaci di produrre differenti tipologie di risultati utilizzabili per lo studio e la gestione degli ambienti acquatici, tra queste si possono citare: (1) dati per la Water Frame Directive (WFD) per il monitoraggio della qualità delle acque (Bresciani et al., 2011a) e dati relativi alla distribuzione spaziale delle macrofite acquatiche e le loro variazioni nel tempo (Giardino et al., 2007b; Hunter et al. 2010b); (2) dati in supporto alla definizione della scelta geografica delle stazioni di monitoraggio e le cadenze temporali di campionamento (Giardino et al., 2010a); (3) informazioni sulla comparsa e fine dei fenomeni di fioritura dei cianobatteri per la stima del rischio, derivante da questi fenomeni, nei confronti degli esseri umani (Hunter et al., 2009; Bresciani et al., 2011b); (4) classificazione dei laghi in accordo con le principali regole di classificazione delle acque (Koponen et al., 2004); (5) monitoraggio della temperatura superficiale delle acque e sua influenza nel determinare le caratteristiche trofiche delle acque, in collegamento anche alle condizioni meteo-climatiche (Reinart e Reinhold 2008; Bresciani et al., 2011c); (6) informazioni utili ai turisti relative ad immediati parametri di qualità delle acque come la trasparenza e la temperatura superficiale (Lella et al., 2011). Grazie al fatto che le immagini dei

sensori MERIS e MODIS sono disponibili in quasi real-time, le opportunità per i servizi d'informazione si estendono anche nel campo applicativo di preallarme per le calamità naturali.

I vantaggi della visione sinottica a multitemporale delle tecniche di telerilevamento, associate ad una buona accuratezza dei risultati, ha determinato un sempre maggior utilizzo delle immagini satellitari per lo studio, il monitoraggio e la gestione degli ecosistemi lacustri.

All'interno del progetto EULAKES il principale obiettivo dell'utilizzo delle immagini satellitari è stato quello di poter valutare lo stato di qualità delle acque dei laghi di Garda (Italia), Balaton (Ungheria), Neusiedl (Austria), Charzykowskie (Polonia) e di fornire dati di input per la creazione di scenari capaci di valutare come i cambiamenti climatici e globali possano condizionare lo stato di qualità delle acque e come la gestione della risorsa acqua debba essere effettuata per garantire la sua salvaguardia.

Per tutti e quattro i laghi sono stati ricavati i prodotti relativi alla concentrazione di clorofilla-a (chl-a) e solidi sospesi totali (TSM, in inglese *Total Suspended Matter*), all'assorbimento delle sostanze gialle (CDOM, in inglese *Colored Dissolved Organic Matter*), alla trasparenza (z90, strato eufotico rappresentante la penetrazione del 90% della luce incidente) e alla temperatura superficiale delle acque per il periodo compreso tra il 2004 e il 2010.

Area di Studio

I laghi inclusi nel Progetto EULAKES riguardano la zona centro-est europea (Figura 1) e comprendono laghi con caratteristiche morfologiche molto diversificate (Figura 2) ma con in comune strategie condivise di problematiche e gestione.

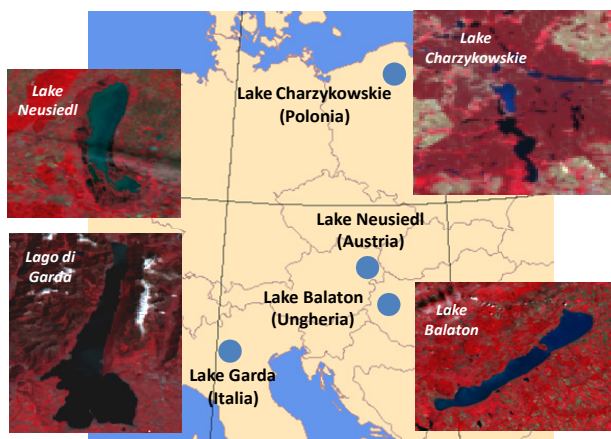


Figura 1 – Immagini LANDSAT TM in False Color (432) dei laghi studiati dal Progetto EULAKES.

	Garda	Neusiedl	Balaton	Charzykowskie
Latitudine N	45°42'	47°38'	46°50'	53°46'
Longitudine E	10°43'	16°41'	17°44'	17°30'
Altitudine lago (m s.l.m.)	65	116	105	120
Area del bacino (km²)	2290	1120	5182	30.36
Area del lago (km²)	368	315	593	13
Profondità media (m)	133	1.2	3.1	9.8
Profondità massima (m)	350	1.8	12.2	30.5
Volume (km³)	49	0.37	1.90	0.13

Figura 2 – Caratteristiche morfologiche dei laghi investigati.

Materiali e Metodi

I dati telerilevati consistono in 7500 immagini satellitari dei quattro laghi inclusi nel Progetto EULAKES, che spaziano dal 2004 al 2010. Le suddette immagini sono state acquisite dal sensore MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) a bordo della piattaforma satellitare Envisat, e dal sensore MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dei satelliti Aqua e Terra. 4800 scene MODIS (MOD11A) con dati di temperatura superficiale, a risoluzione spaziale di 1 km, sono state fornite dalla NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) *Land Processes Distributed Active Archive Center*. Sono state utilizzate tutte le immagini MODIS-Terra prive di copertura nuvolosa. Le immagini MOD11A sono state utilizzate per valutare le temperature superficiali dei quattro laghi, dopo essere state ritagliate e ricampionate con una griglia regolare di 1-km di lato e georeferenziate nel sistema di proiezione nazionale Gauss Boaga. L'Agenzia Spaziale Europea (ESA) ha, inoltre, fornito 273 immagini MERIS level-1B, con dati TOA (*Top Of Atmosphere Radiances*) a risoluzione spaziale di 300m.

A tutte le immagini MERIS FR (*Full Resolution*), preventivamente georeferite, è stata applicata una *SMILE-correction*, che permette di correggere la distorsione del valore registrato dal sensore dovuto allo spostamento di lunghezza d'onda a seconda della posizione del pixel (Fomferra e Brockmann, 2006). In seguito, è stato applicato il *tool* ICOL (*Improved Contrast between Ocean and Land*) per correggere gli effetti di adiacenza che possono influenzare la determinazione della riflettanza dell'acqua nei pixel vicino alla costa (Santer et al., 2007). Queste due correzioni sono state effettuate utilizzando il software BEAM (Basic Envisat e ERS (A) ATSR e MERIS) (Fomferra e Brockmann, 2006), attraverso il quale è stata effettuata anche la correzione atmosferica tramite rete neurale (Doerffer e Schiller, 2008). Tale software è particolarmente adatto per il calcolo automatico delle componenti otticamente attive delle acque lacustri caratterizzate da un'ampia variabilità trofica (es. Odermatt et al., 2010 e Giardino et al., 2010a).

La correzione atmosferica delle immagini è stata validata da misure di campo effettuate in tutti e quattro i laghi tramite misure spettroradiometriche (con lo spettroradiometro *Fieldspec Full Range Pro ASD Inc*) e tramite confronto con la correzione atmosferica effettuata con il codice *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)* (Vermote et al., 1997).

Per la stima delle concentrazioni di chl-a, TSM, CDOM e Z90 è stato utilizzato il software BEAM-VISAT v.4.2 dell'ESA in cui i differenti algoritmi utilizzabili (Figura 3) sono stati adattati ai diversi laghi in funzione delle loro caratteristiche trofiche. Per il lago di Garda è stato utilizzato l'algoritmo *Case2Regional* (C2R), per i laghi Neusiedl e Balaton è stato utilizzato un algoritmo dato dalla media di quello C2R e quello *Eutrophic* e per il lago Charzykowskie è stato utilizzato l'algoritmo *Eutrophic*.

	Boreal	Eutrophic	Case2Regional
Chl-a [mg/m ³]	0.5-50	1-120	0.003-50
TSM [g/m ³]	0.1-20	0.25-30	0.03-50
CDOM [m ⁻¹]	0.25-10	0.1-3	0.002-2

Figura 3 – Range di utilizzo dei differenti algoritmi BEAM.

Risultati

Le campagne di misura hanno permesso di valutare le differenti risposte spettrali delle acque dei laghi del Progetto (Figura 4) e le loro differenti caratteristiche trofiche (Figura 5).

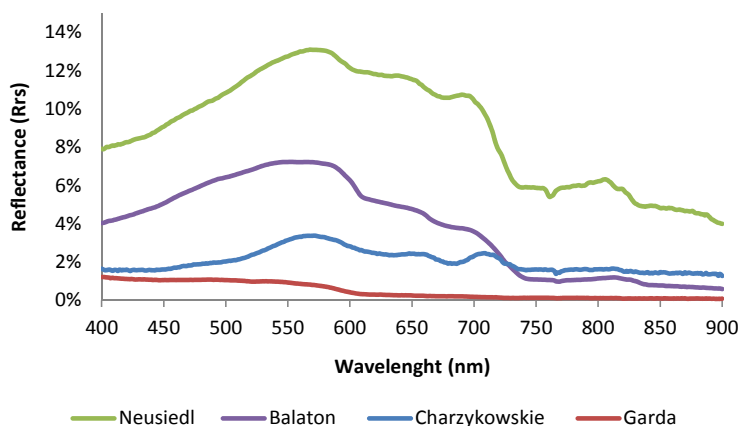


Figura 4 – Valori di Remote Sensing Reflectance (Rrs) medi acquisiti con lo spettroradiometro Fieldspec Full Range Pro ASD Inc acquisiti durante le campagne di misura.

	Data	Chl-a (mg/m ³)	TSM (g/m ³)	CDOM (m ⁻¹)	z90 (m)
Garda	27-28 Giugno	1.17 (1.1)	1.4 (0.7)	0.03 (0.02)	8.5 (2.8)
Balaton	17-18 Maggio	2.4 (1.3)	30.5 (4.5)	0.61 (0.14)	0.58 (0.13)
Neusiedl	11-12 Luglio	8.9 (3.5)	46.8 (10.5)	0.5 (0.1)	0.3 (0.03)
Charzykowskie	8-9 Agosto	19.20 (3.33)	9.10 (1.16)	0.39 (0.12)	0.88 (0.1)

Figura 5 – Valori limnologici medi delle differenti stazioni campionate nelle campagne di misura del 2011, tra parentesi i valori di deviazione standard.

La figura 4 evidenzia le diversità delle proprietà ottiche apparenti dei quattro laghi. In particolare emerge come il lago di Garda abbia acque molto trasparenti, tipiche di laghi oligotrofici. Questo dato è confermato anche dai valori di z90 e chl-a della figura 5. Il lago Neusiedl è caratterizzato da valori di riflettanza molto elevati in magnitudo, dovuti all'elevata concentrazione di TSM. Una situazione simile, ma meno marcata, caratterizza il lago Balaton. Il lago Charzykowskie risulta, invece, quello con una risposta spettrale maggiormente caratterizzata dalla componente fitoplanctonica, in particolare dai cianobatteri.

La correzione atmosferica applicata alle immagini MERIS, acquisite in sincrono alle misure radiometriche e limnologiche, hanno evidenziato una buona accuratezza e i differenti algoritmi applicati alle immagini hanno restituito una buona stima dei parametri di qualità delle acque. La validazione per il lago di Garda è riportata in Odermatt et al., (2010) e Bresciani et al., (2011a); per gli altri laghi le stime di TSM, z90 e CDOM hanno fatto registrare valori di RMSE minori del 10%. Per quanto riguarda la stima delle concentrazioni di chl-a, i valori di RMSE sono risultati compresi tra il 10% e il 20%; per il lago Balaton e il lago Charzykowskie la correlazione tra i valori di campo e quelli ottenuti dalle immagini MERIS è risultata avere un r^2 di 0.7, per il lago Neusiedl è risultata di 0.8, tutti valori statisticamente significativi.

Gli algoritmi applicati alla serie storica 2004-2010 hanno permesso di evidenziare le diversità tra i quattro laghi e l'andamento nel tempo dei parametri. In figura 6 si riportano i valori medi della serie storica dei quattro parametri analizzati nei quattro laghi. Il lago di Garda conferma le sue caratteristiche oligotrofiche, il lago Neusiedl meso-eutrofiche, il lago Charzykowskie eutrofiche, mentre il lago Balaton risulta estremamente diversificato tra la zona ad ovest, che si presenta con caratteristiche eutrofiche, e la zona est che risulta, invece, mesotrofica.

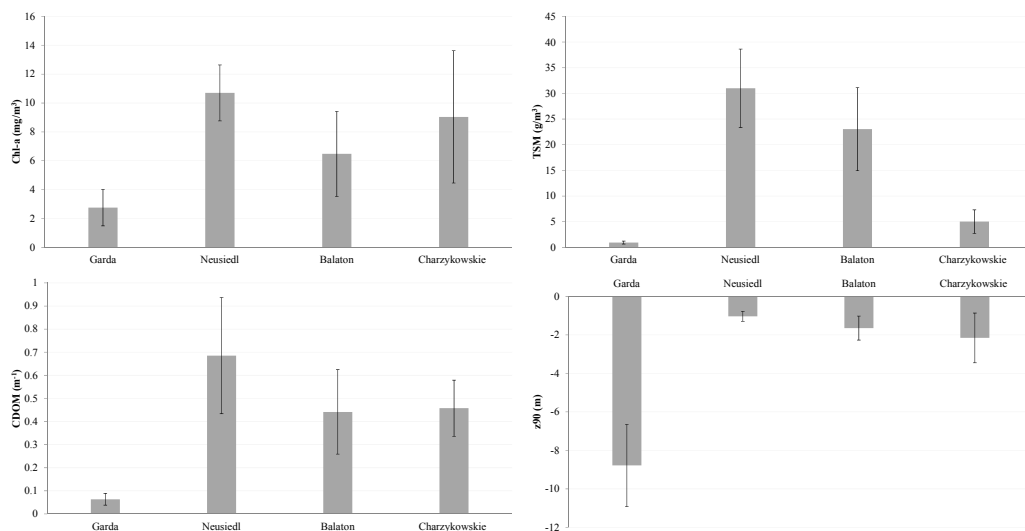


Figura 6 – Confronto dei valori medi di chl-a, TSM, CDOM e z90 per il periodo 2004-2010.

L'analisi spaziale dei dati ha evidenziato come il lago di Garda e il lago Neusiedl presentino piccole differenze tra le differenti zone del lago, mentre il lago Balaton presenta grande diversità nelle concentrazioni di chl-a e TSM tra la porzione est e ovest del lago (Figura 7a). Il lago Charzykowskie presenta elevate differenze tra la porzione a nord e quella a sud del lago (Figura 7b).

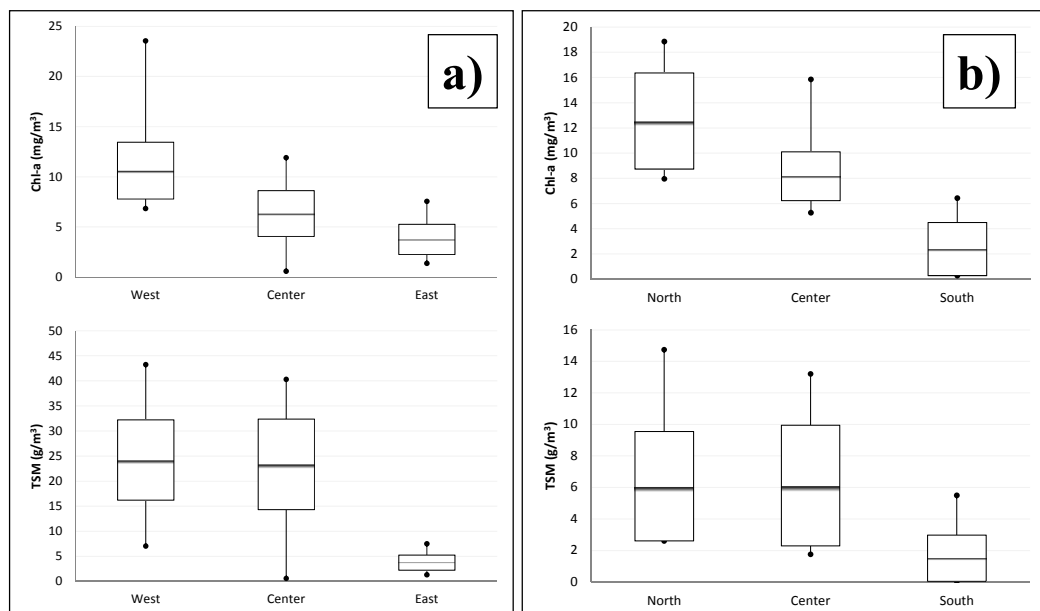


Figura 7 – Confronto tra i valori di concentrazione di chl-a e TSM in differenti regioni di dimensioni di 3x3 pixel, il valore medio è inserito nel box plot della deviazione standard, con indicati i valori di massimo e minimo. In a i dati relativi al lago Balaton, in b) quelli relativi al lago Charzykowskie.

In figura 8 si mostrano i valori della temperatura superficiale delle acque. Il lago di Garda si è rivelato come il lago con le fluttuazioni della temperatura superficiale meno marcata e con valori medi stabili lungo l'intervallo di tempo 2004-2007. Il lago Charzykowski è risultato il lago con il range di temperatura più elevato, con valori massimi giornalieri che raggiungono i 30 ° C (21 luglio 2010), mentre i valori medi annui e totali risultato inferiori rispetto ai laghi Neusiedl e Balaton (con caratteristiche batimetriche paragonabili), a causa della stagione invernale durante la quale il lago ghiaccia completamente.

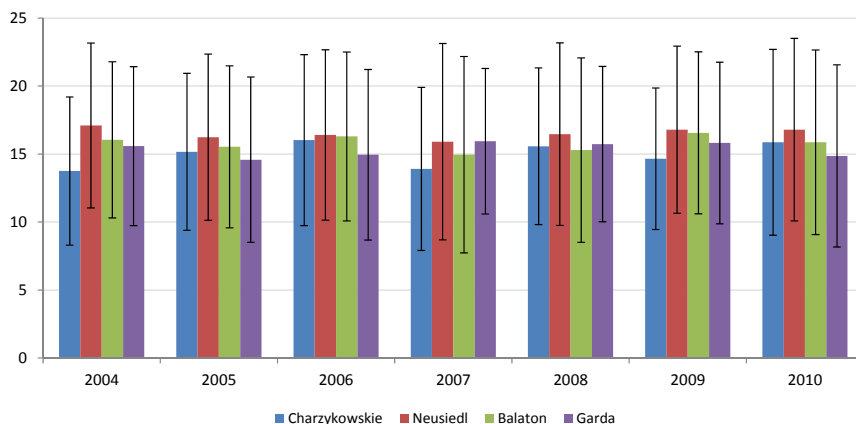


Figura 8 – Temperature medie annuali delle stazioni di centro lago nei quattro laghi del progetto EULAKES.

Conclusioni

I risultati ottenuti hanno evidenziato come il sensore MERIS sia idoneo per il monitoraggio della qualità delle acque dei laghi. Le attività svolte hanno evidenziato l'importanza di effettuare campagne di misure radiometriche e limnologiche per calibrare gli algoritmi da applicare alle immagini e validare i prodotti ottenuti sia a livello di correzione atmosferica sia di stima dei parametri di qualità. I risultati ottenuti hanno evidenziato una certa stabilità delle caratteristiche dei quattro laghi nel tempo, dalla quale si può dedurre come i cambiamenti climatici non abbiano provocato macroscopiche variazioni nella qualità delle acque.

Bisogna comunque precisare che la serie storica è troppo breve per poter comprendere effettivamente se sono in corso dei cambiamenti nella qualità delle acque dei laghi.

Il lago Balaton presenta problematiche di eutrofizzazione nella porzione ad ovest del lago e anche il lago Charzykowski risente di problemi legati alle fioriture di cianobatteri. Il lago Neusiedl, invece, presenta acque molto torbide con elevate concentrazioni di sostanze organiche disciolte.

Le attività condotte nell'ambito del Progetto EULAKES hanno, comunque, rivelato alcune problematiche. La correzione atmosferica in alcune situazioni risulta un'operazione ancora complessa a cui si associano anche problemi dovuti agli effetti di adiacenza.

Infine, l'utilizzo del sensore MERIS per il monitoraggio della qualità delle acque interne del nord Europa (lago Charzykowski) è risultata ostacolata dalla copertura nuvolosa che non ha permesso di coprire in modo adeguato tutte le differenti stagionalità.

Ringraziamenti

Grazie al FESR per la sponsorizzazione a livello europeo del Progetto EULAKES Ref. Nr. 2CE243P3.

Un grande ringraziamento a tutti i partner del Progetto EULAKES in particolare a N. Gallinaro e F. Sacchini della Comunità del Garda, B. Zennaro dell'APPA Trento per le attività organizzative e G.

Soja dell'Austrian Institute of Technology e T. Zechmeister dell'Austrian League of Nature Conservation Burgenland, A. Lenhoffer del Lake Balaton Development Coordination Agency, B. Nowicka, M. Glińska e A. Nadolna dell'Institute of Meteorology and Water Management National Research Institute per il supporto nelle attività di campagna.

Un grande ringraziamento all'EOHelpdesk dell'ESA per il supporto. Per la campagna di misura in Polonia si ringrazia F. Nutini del CNR-IREA. Un particolare ringraziamento a D. Odermatt dell'Università di Zürich per la collaborazione nello studio dei laghi sub-alpini e C. Defrancesco dell'APPA-Trento, M. Bartoli e E. Soana dell'Università di Parma per le attività di laboratorio e i consigli limnologici.

Riferimenti bibliografici

- Alberotanza L, Barbaro J, Braga F, Pignatti S, Salviato S, Santini F. (2006), "Classificazione della vegetazione sommersa della Laguna di Venezia usando dati iperspettrali da aereo e da satellite", Atti convegno Il Monitoraggio Costiero Mediterraneo, Sassari.
- Albert A, Peter G. (2006), "Inversion of irradiance and remote sensing reflectance in shallow water between 400 and 800 nm for calculations of water and bottom properties", *Applied Optics*, 45: 2331-2343.
- Bresciani M, Giardino C, Longhi D, Pinardi M, Bartoli M, Vascellari M. (2009), "Imaging spectrometry of productive inland waters. Application to the lakes of Mantua", *Italian Journal of Remote Sensing*, 41: 147-156.
- Bresciani M, Stroppiana D, Odermatt D, Morabito G, Giardino C. (2011a), "Assessing remotely sensed chlorophyll-a for the implementation of the Water Framework Directive in European perialpine lakes", *Science of the Total Environment*, 409: 3083-3091.
- Bresciani M, Giardino C, Bartoli M, Tavernini S, Bolpagni R, Nizzoli D. (2011b), "Recognising harmful algal bloom based on remote sensing reflectance band ratio", *Journal of Applied Remote Sensing*, 5 [DOI: 10.1117/1.3630218].
- Bresciani M, Giardino C, Boschetti L. (2011c), "Multi-temporal assessment of bio-physical parameters in lakes Garda and Trasimeno from MODIS and MERIS", *Italian Journal of Remote Sensing*, 43 (3): In press.
- Dekker AG, Vos RJ, Peters SWM. (2001), "Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes", *Science of the Total Environment*, 268: 197-214.
- Dekker AG, Vos RJ, Peters SWM. (2002), "Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data", *International Journal of Remote Sensing*, 23: 15-35.
- Doerffer R, Schiller H. (2008), "MERIS LakeWater Algorithm for BEAM ATBD, vol. 1.0", May 2008.
- Fomferra N, Brockmann C. (2006), "The BEAM project web page [Internet]. Carsten Brockmann Consult, Hamburg, Germany", Available from: <http://www.brockmann-consult.de/beam/>.
- George DG, Malthus TJ. (2001), "Using a compact airborne spectrographic imager to monitor phytoplankton biomass in a series of lakes in north Wales", *Science of the Total Environment*, 268: 215-226.
- Giardino C, Candiani G, Zilioli E. (2005), "Detecting chlorophyll-a in Lake Garda (Italy) using TOA MERIS radiances", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71: 1045-1052.
- Giardino C, Brando VE, Dekker AG, Strömbeck N, Candiani G. (2007a), "Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion", *Remote Sensing of Environment*, 109 (2): 183-195.
- Giardino C, Bartoli M, Candiani G, Bresciani M, Pellegrini L. (2007b), "Recent changes in macrophyte colonisation patterns: an imaging spectrometry-based evaluation of southern Lake Garda (northern Italy)", *Journal of Applied Remote Sensing*, 1: 011509.
- Giardino C, Bresciani M, Villa P, Martinelli A. (2010a), "Application of remote sensing in water resource management: the case study of Lake Trasimeno, Italy", *Water Resource Management*, 24: 3885-3899.

- Giardino C, Bresciani M, Pilkaityte R, Bartoli M, Razinkovas A. (2010b), "In situ measurements and satellite remote sensing of case 2 waters: first results from the Curonian Lagoon" *Oceanologia*, 52(2), pp. 197-210
- Guanter L, Ruiz-Verdú A, Odermatt D, Giardino C, Simis S, Estellès V, Heege T, Dominguez-Gómez JA, Moreno J. (2010), "Atmospheric correction of ENVISAT/MERIS data over inland waters: Validation for European lakes", *Remote Sensing of Environment*, 114 (3): 467-480.
- Hunter PD, Tyler AN, Gilvear DJ, Willby NJ. (2009), "Using remote sensing to aid the assessment of human health risks from blooms of potentially-toxic cyanobacteria", *Environmental Science and Technology*, 43: 2627-2633.
- Hunter PD, Tyler AN, Carvalho L, Codd GA, Maberly SC. (2010a), "Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes", *Remote Sensing of Environment*, 114: 2705-2718.
- Hunter PD, Willby NJ, Tyler AN, Gilvear DJ, Kelly A, (2010b), "Mapping macrophytic vegetation in shallow lakes using the Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI)", *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 20: 717-727.
- Keller PA. (2001), "Comparison of two inversion techniques of a semi-analytical model for the determination of lake water constituents using imaging spectrometry data", *Science of the Total Environment*, 268: 189-196.
- Koponen S, Kallio K, Pulliainen J, Vepsäläinen J, Pyhälähti T, Hallikainen M. (2004), "Water Quality Classification of Lakes Using 250-m MODIS Data", *IEEE Geoscience and remote sensing letters* 1: 287-291
- Kutser T, Pierson D, Tranvik L, Reinart A, Sobek S, Kallio K. (2005), "Estimating the colored dissolved organic matter absorption coefficient in lakes using satellite remote sensing", *Ecosystems* 8: 709-720.
- Lella S, Bresciani M, Giardino C, L'Astorina A. (2011), "A Web Service-Based Tool to Disseminate Satellite-derived Water Quality Maps of Lake Garda". Proceedings of the International Conference: Data flow from Space to Earth: applications and interoperability, Venezia, Italy, 21-23 March 2011 (ISBN 9788889405154).
- Odermatt D, Heege T, Nieke J, Kneubuhler M, Itten K. (2008), "Water quality monitoring for lake Constance with a physically based algorithm for MERIS data", *Sensors*, 8: 4582-4599.
- Odermatt D, Giardino C, Heege T. (2010), "Chlorophyll retrieval with MERIS Case-2-Regional in perialpine lakes", *Remote Sensing of Environment*, 114, N. 3, 607-617.
- Paavel B, Arst H, Herlevi A. (2007), "Dependence of spectral distribution of inherent optical properties of lake waters on the concentrations of different water constituents", *Nordic Hydrology*, 38: 265-285.
- Reinart A, Reinhold M. (2008), "Mapping surface temperature in large lakes with MODIS data", *Remote Sensing of Environment*. 112: 603-611.
- Simis SGH, Ruiz-Verdú A, Domínguez-Gómez JA, Peña-Martínez R, Peters SWM, Gons HJ. (2007), "Influence of phytoplankton pigment composition on remote sensing of cyanobacterial biomass", *Remote Sensing of Environment*, 106: 414-427.
- Strömbeck N, Pierson E. (2001), "The effects of variability in the inherent optical properties on estimations of chlorophyll a by remote sensing in Swedish freshwater", *Science of the Total Environment*, 268, 123-137.
- Van Mol B, Ruddick K. (2005), "Total Suspended Matter maps from CHRIS imagery of a small inland water body in Oostende (Belgium)", Proceedings of the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop, 21-23 March, ESRIN, Frascati, Italy, (ESA SP-593, June 2005).
- Vermote EF, Tanrè D, Deizè JL, Herman M, Morcrette JJ. (1997), "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview", *Trans. on Geo. and Remote Sens.*, 35: 675-686.
- Voutilainen A, Pyhälähti T, Kallio KY, Pulliainen J, Kaipio JP. (2007), "A Filtering Approach for Estimating Lake Water Quality from Remote Sensing data", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9: 50-64.

Tecniche LIDAR per il rilevamento tridimensionale e la calibrazione di rilievi storici di un edificio monumentale

Raffaella Brigante, Fabio Radicioni, Aurelio Stoppini

DICA, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti 93
06125 Perugia, Tel. 075 5853765, Fax 075 5853756, e-mail topos@unipg.it

Riassunto

Il rilievo di un edificio monumentale di notevole interesse storico e architettonico ha fornito l'occasione per effettuare test sperimentali su strumenti LIDAR terrestri aventi diverse caratteristiche. Oggetto della sperimentazione è il Tempio della Consolazione a Todi (PG), maestoso edificio di culto a pianta centrale costruito a partire dal 1508 su progetto attribuito a Donato Bramante. Gli strumenti utilizzati sono un laser scanner a misura di fase (Leica HDS6000) e un secondo apparato a tempo di volo (Leica C10). Le nuvole di punti acquisite con i due strumenti sono state orientate su target determinati preliminarmente con un rilievo topografico tridimensionale e riunite a formare un modello unico comprendente l'interno e l'esterno del grande edificio. Con lo scanner C10 è stata testata una procedura di orientamento relativo delle scansioni basata sui soli dati delle scansioni stesse. Contestualmente alle scansioni sono state acquisite immagini fotografiche digitali ad alta risoluzione dell'esterno e dell'interno dell'edificio in prospettiva sferica, con punto nodale dell'ottica coincidente con il centro di presa delle scansioni. Le elaborazioni sono state eseguite con il software Cyclone. Le nuvole di punti ottenute con i due diversi strumenti sono state poste a confronto e riunite in un unico modello dal quale sono stati ricavati elaborati con un notevole livello di dettaglio, che forniscono un'accurata documentazione dello stato di fatto del monumento. Il modello di elevata accuratezza derivante dalle scansioni laser è stato utilizzato per la calibrazione di rilievi storici del monumento, alcuni dei quali dimensionati con unità di misura antiche.

Abstract

The survey of a monumental building of a great historical and architectural interest has provided an opportunity to perform experimental tests of terrestrial LIDAR instruments with different characteristics. The object of the experimentation is the Temple of Consolation in Todi (central Italy), a majestic cross shaped church with a central dome, built starting from 1508 on a design attributed to Donato Bramante. The instruments used are a phase measure laser scanner (Leica HDS6000) and a time of flight one (Leica M10). The point clouds acquired with the two scanners have been oriented by means of optical targets determined by a three-dimensional topographic survey. Then the clouds have been combined to form a single model including the interior and exterior of the large building. With the C10 scanner has been tested a procedure based on the relative orientation of the scans using only the scan data. In parallel with the scans were acquired high-resolution digital photographs of the exterior and interior of the building in spherical perspective, with the focal point of the camera lens coinciding with the center of each scan. The processing has been made using the Cyclone software. The clouds of points obtained by the two different instruments have been compared and combined into a single model from which have been obtained drawings with a high level of detail, providing a thorough documentation of the actual state of the monument. The high accuracy model derived from laser scanning has been used for the verification and calibration of historical surveys of the monument, some of which referring to old measure units.

1. Descrizione, cenni storici e documentazione

Il Tempio di Santa Maria della Consolazione sorge nel luogo dove si venerava un'immagine della Vergine col Bambino e Santa Caterina, ritenuta miracolosa dalla popolazione di Todi.

L'immagine, trecentesca, fu riscoperta durante dei lavori eseguiti su un muro. La leggenda narra che il dipinto era dimenticato e coperto da rovi finché un muratore cieco ad un occhio, mentre cercava tra le spine alcune pietre per i lavori, ritrovò l'edicola e la pulì con un fazzoletto che poi si passò sulla fronte per asciugare il sudore, recuperando miracolosamente la vista. La notizia si diffuse e venne eretta una piccola cappella a protezione dell'immagine. Nel 1508 iniziarono i lavori per la costruzione del Tempio.

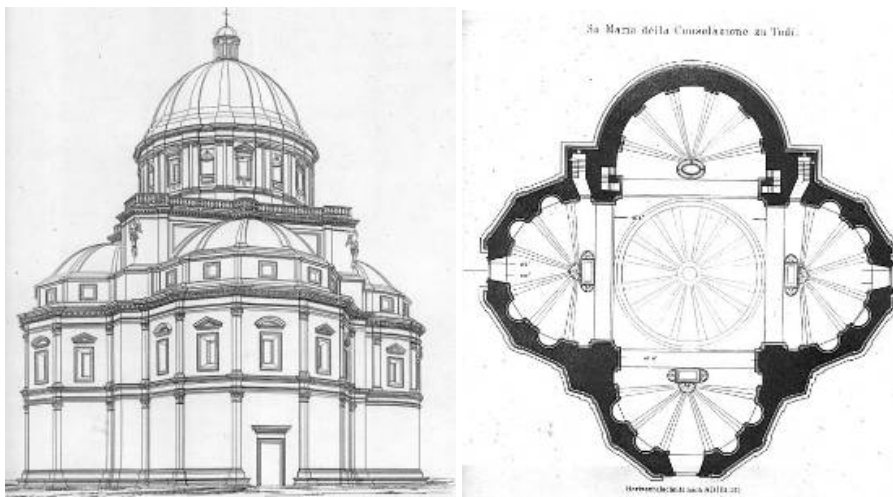


Figura 1 – Paul Laspeyres, *Vista prospettica e pianta di Santa Maria della Consolazione*, 1869.

L'imponente edificio è a croce greca e si imposta su quattro grandi pilastri posti ai vertici di un quadrato sui lati del quale appoggiano le absidi. Delle quattro absidi, tre sono poligonali (ciascuna composta da cinque lati di un dodecagono), mentre quella dell'altare principale, a nord, è semicircolare. Sopra il corpo quadrato si estende una terrazza, sopra la quale è costruito il tamburo e la cupola che si chiude con una lanterna. Le absidi sono coperte da quattro semicupole finestate nella parte inferiore. Il tempio è costruito con pietra calcarea proveniente da cave locali e dai resti della demolita rocca medioevale.

Il disegno fu già dal '500 attribuito al Bramante, anche se non ci sono documenti contemporanei in cui se ne parli, mentre è considerata certa la partecipazione di altri celebri architetti nelle diverse fasi del lungo periodo di costruzione. Tra questi citiamo: Cola da Caprarola (1508-12); Baldassarre Peruzzi (1518); Antonio da Sangallo il Giovane (1531-32); Jacopo Barozzi detto il Vignola (1565); Galeazzo Alessi (1567); Ippolito Scalza (1584-97).

È comunque evidente la relazione tra i disegni lasciati da Bramante per la Basilica di San Pietro a Roma e il Tempio umbro. L'ipotesi più accreditata è quella che l'artista abbia lasciato disegni o schizzi che poi furono utilizzati e in parte modificati dagli altri architetti che contribuirono alla realizzazione dell'opera.

L'opera fu condotta al termine, con la collocazione della croce sulla lanterna, il 16 aprile 1607.

Le grandi statue raffiguranti gli apostoli, collocate all'interno della chiesa nelle nicchie delle tre absidi poligonali, sono attribuite alla scuola dello Scalza. Vicino al pilastro sud-est è collocata la statua lignea di Papa Martino I, posta dopo la pestilenza del 1630 dai cittadini sfuggiti al contagio.

L'altare maggiore, con quattro colonne di marmo nero-ceruleo, fu costruito nel 1693 su disegno di Andrea Polinori di Todi: in esso è custodito l'affresco che dette origine al tempio. Negli altari barocchi delle nicchie sono inglobati quelli più antichi costituiti da mense su quattro pilastrini.

Nel museo civico di Todi è esposto un modello ligneo del tempio, cinquecentesco ma di datazione e attribuzione non certa.



Figura 2 – Modello ligneo del Tempio. Todi, Museo Civico.

Nel corso della presente ricerca sono stati reperiti vari elaborati storici, tra cui particolarmente significativo è un rilievo della fine del 1700 effettuato da Seroux D'Agincourt. I disegni, eseguiti alla scala di 1:200, sono dimensionati in palmi (1 palmo = 22.34 cm).

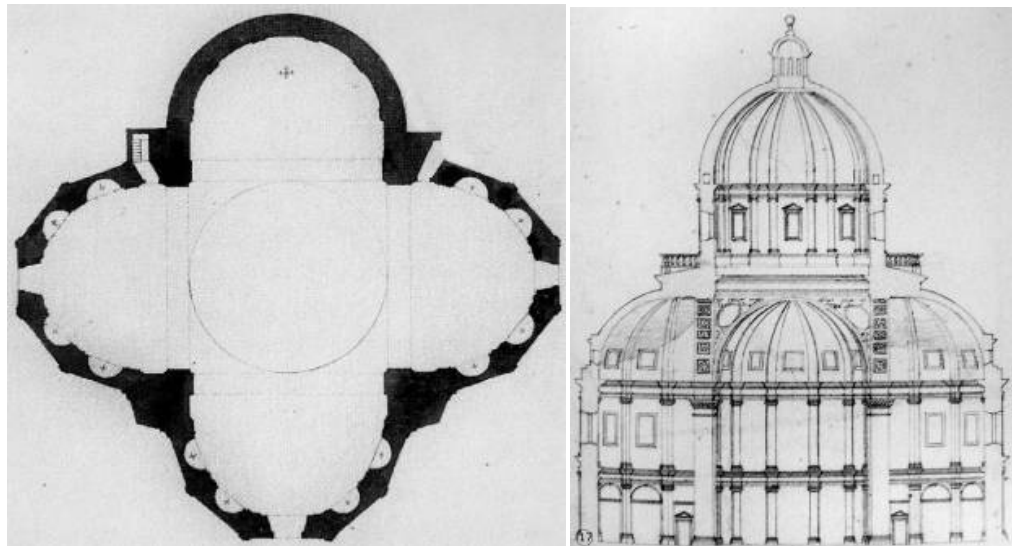


Figura 3 – Rilievi di Seroux D'Agincourt (fine XVIII sec.).

2. Rilievo con strumenti LIDAR terrestri

Per il rilievo laser scanning del Tempio della Consolazione sono stati utilizzati due diversi strumenti:

- Leica HDS 6000 per le scansioni dell'interno (Fig. 4, sin.);
- Leica C10 per le scansioni esterne, più una interna per effettuare l'allineamento della nuvola di punti complessiva (Fig. 4, ds.).

Le caratteristiche dei due scanner sono riportate nelle tabelle 1 e 2.



Figura 4 – Leica HDS 6000 (a sinistra); Leica C10 (a destra).

Lo scanner HDS6000 è uno strumento a misura di fase, molto preciso (accuratezza nel posizionamento ± 6 mm fino a 25 m di distanza, ± 10 mm fino a 50 m di distanza), ma ha una portata limitata (non molto superiore ai 50 m). Lo scanner C10 è uno strumento a tempo di volo, con precisioni paragonabili a quelle del precedente ma con portate superiori (circa 300 m).

Per allineare le singole scansioni in una nuvola di punti totale sono stati posizionati, in vari punti della chiesa, 13 target “black and white” (Fig. 5, sin.) riconosciuti automaticamente dallo scanner C10 e individuati manualmente sulle scansioni effettuate con lo scanner HDS 6000. Tali target sono stati rilevati tridimensionalmente con una stazione totale (Fig. 5, ds.) in modo da creare un sistema di riferimento locale univoco per tutte le scansioni.

In totale sono state eseguite 4 scansioni interne, di cui 3 con l'HDS 6000 (L1, L2, L3) e una con il C10 (100), e 5 scansioni esterne (200, 300, 400, 500, 600) da stazioni intervisibili, di cui una collegata alla stazione interna 100 (Fig. 6). La risoluzione di scansione è stata fissata in 1 punto/6 mm a 10 m di distanza.

Le scansioni esterne sono state realizzate in modo tale che da ognuna fosse visibile la precedente e la successiva in modo da formare una poligonale. In questo modo l'allineamento delle scansioni viene eseguito automaticamente dal software di elaborazione della nuvola di punti laser (Cyclone

v.7.1). L'allineamento (o registrazione) delle scansioni consiste in una rototraslazione spaziale delle singole nuvole di punti acquisite in modo tale da riportarle in un unico sistema di riferimento. Per effettuare tale operazione è necessario avere un certo numero di punti comuni tra le scansioni.

Tabella 1 – Caratteristiche dello scanner HDS 6000 (documentazione Leica).

Principali dati tecnici prestazionali del Leica HDS6000	
Tipo di strumento	Scanner laser compatto, phase-based, rilevamento a doppio asse, velocità ultralevata con precisione per il rilievo di pendenze e campo visivo completo
Interfaccia utente	Touch panel onboard, notebook esterno, tablet PC o PDA
Memorizzazione dati	Disco fisso integrato
Precisione delle misure singole	Posizione 6 mm con una portata da 1 m a 25 m; 10 mm con una portata di 50 m Distanza ≤4 mm con albedo 90% fino a 25 m; ≤5 mm con albedo 18% fino a 25 m ≤5 mm con albedo 90% fino a 50 m; ≤6 mm con albedo 18% fino a 50 m Angolo (oriz./vert.) 125 µrad/125 µrad (7,9 mgon/7,9 mgon) Sigma uno
Dimensione spot	3 mm in uscita (secondo la definizione di Gauss) + divergenza di 0,22 mrad; 8 mm a 25 m; 14 mm a 50 m;
Precisione della superficie modellata**/rumore	2 mm a 25 m; 4 mm a 50 m, con albedo 90%; Sigma uno 3 mm a 25 m; 7 mm a 50 m, con albedo 18%; Sigma uno
Acquisizione del target***	Deviazione standard di 2 mm
Sensore a doppio asse	Selezionabile on/off; risoluzione di 3,6"
Sistema di scansione laser	Portata Intervallo di ambiguità di 79 m 79 m con albedo 90%; 50 m con albedo 18% Velocità di scansione max. 500.000 punti/sec., velocità istantanea massima Densità di scansione a 10 m a 50 m "Anteprima" 50,6 x 50,6 mm 250 x 250 mm Media (4 volte) 12,6 x 12,6 mm 62 x 62 mm Alta (8 volte) 6,3 x 6,3 mm 31,4 x 31,4 mm Molto alta (16 volte) 3,1 x 3,1 mm 15,8 x 15,8 mm Altissima (32 volte) 1,6 x 1,6 mm 7,9 x 7,9 mm
Classe laser	3R (IEC 60825-1)
Luce	Funzionamento garantito da pieno sole a buio completo
Alimentazione	24V DC; batteria Li-ion integrata (1,5 h) e/o alimentazione opzionale DC esterna (4 h) o AC
Assorbimento di potenza	50W
Temperatura	Di esercizio: da 0 °C a +40 °C; di immagazzinaggio: da -20 °C a +50 °C

Tabella 2 – Caratteristiche dello scanner C10 (documentazione Leica).

Caratteristiche generali		Sistema di scansione laser	
Tipo di strumento	Laser scanner ad altissima velocità compatto, a impulsi, con compensatore biassiale, precisione per il rilievo di pendenze, lunga portata e campo visivo completo; fotocamera integrata e piombo laser	Tipo	A impulsi; microchip proprietario
Interfaccia utente	Controllo onboard, notebook o tablet PC	Colore	Verde, lunghezza d'onda = 532 nm
Memoria dati	Disco fisso integrato o PC esterno	Classe laser	3R (IEC 60825-1)
Fotocamera	Fotocamera digitale ad alta risoluzione integrata, autoregolante con zoom per riprese video	Portata	300 m con albedo del 90%; 134 m con albedo del 18% (portata minima 0,1 m)
Prestazioni		Velocità di scansione	Massima istantanea: fino a 50.000 punti/s
Precisione delle singole misure		Risoluzione di scansione	
Posizione*	6 mm	Dimensioni punto	Da 0 a 50 m; 4,5 mm (su base FWHH); 7 mm (su base gaussiana)
Distanza*	4 mm	Dimensione griglia	Completamente selezionabile in senso orizzontale e verticale; distanza minima < 1 mm, per tutta la portata; capacità di puntamento sul punto singolo
Angolo (orizzontale/verticale)	60 µrad / 60 µrad (12" / 12")	Campo visivo	
Precisione della superficie modellata**/rumore	2 mm	Orizzontale	360° (massimo)
Acquisizione del target***	2 mm Std deviation	Verticale	270° (massimo)
Compensatore biassiale	Selezionabile on/off, risoluzione 1", range dinamico +/- 5", precisione 1,5"	Puntamento/visualizzazione	Senza parallasse, zoom per riprese video integrato
		Ottiche di scansione	Specchio con rotazione verticale su base rotante orizzontale; Smart X-Mirror™ ruota o oscilla automaticamente riducendo al minimo i tempi di scansione
		Capacità di memoria dati	80 GB (disco rigido onboard)
		Comunicazioni	Dynamic Internet Protocol (IP) Address, Ethernet
		Fotocamera digitale a	Immagine singola 17° x 17°: 1920 x 1920 pixel

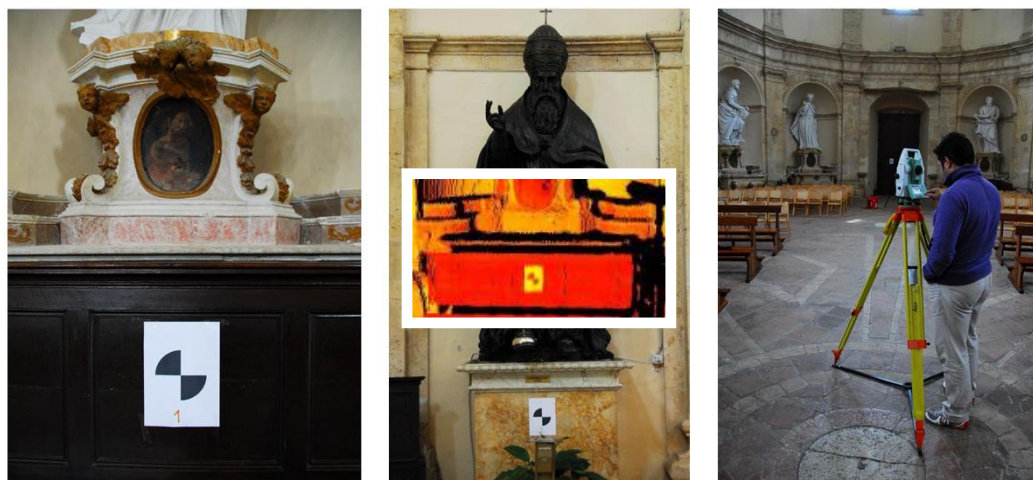


Figura 5 – Target (a sinistra e al centro); Rilievo dei target (a destra). L'immagine al centro mostra come il target venga visto nel software di elaborazione.

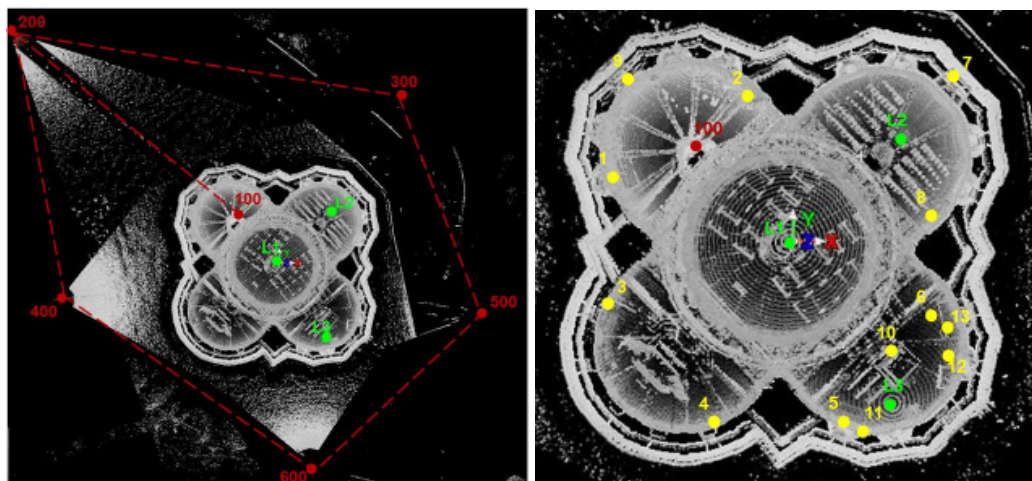


Figura 6 – Vista planimetrica della nuvola di punti complessiva con ubicazione delle stazioni di scansione(sin.) e disposizione dei target (ds.)

Le figure alla pagina seguente riportano alcune viste delle singole nuvole di punti interne (fig. 7) ed esterne (fig. 8).

Le scansioni interne L1, L2, L3 e 100 sono state allineate tramite i target, la cui posizione è riportata a destra in fig. 6. I target sono stati individuati e selezionati manualmente sulla nuvola di punti acquisita (v. fig. 5, al centro).

Le scansioni esterne sono state allineate tra loro con le misure topografiche della rete delle stazioni e collegate a quelle interne tramite i target comuni. In fig. 9 sono mostrate due viste rispettivamente interna ed esterna della nuvola di punti allineata.

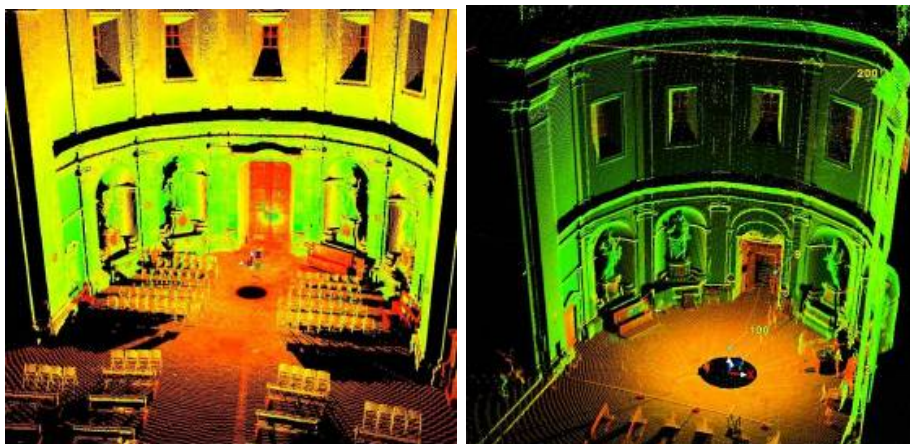


Figura 7 – Esempi di scansioni interne.

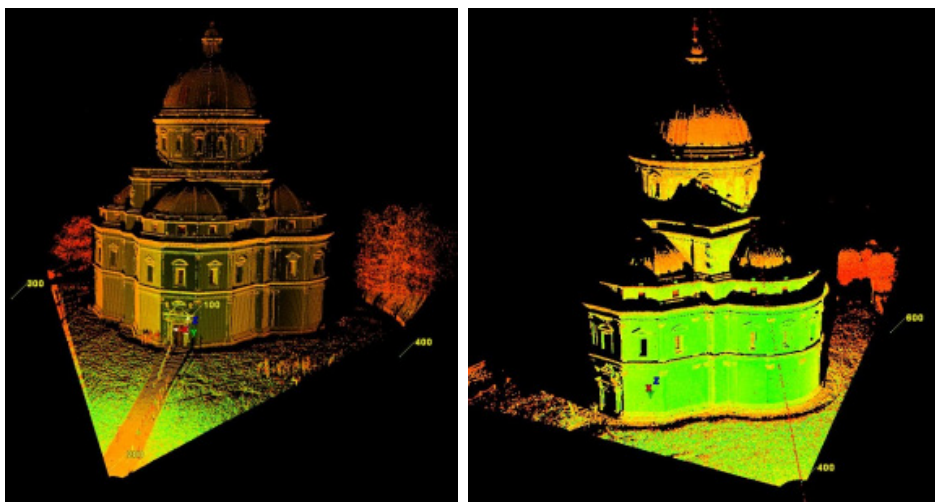


Figura 8 – Esempi di scansioni interne.

Su tutte le stazioni esterne e sulla stazione 100, per effettuare il collegamento topografico, sono stati posizionati dei target Leica HDS Twin Target Pole, automaticamente riconosciuti dallo scanner laser C10 (fig. 10).

La fase di allineamento di tutte le scansioni, interne ed esterne, al fine di ottenere un'unica nuvola di punti ha comportato residui sulle coordinate dei target con un valore massimo di 6 mm (tab. 3).

Vestizione della nuvola di punti

Per ogni stazione laser sia interna che esterna sono state riprese 7 foto della chiesa (6 scattate ogni 60° per completare un giro d'orizzonte e 1 verso l'alto), utilizzando una fotocamera Nikon D90 con obiettivo fisheye montata su testa sferica eccentrica e regolabile (Fig. 11) in modo tale da far coincidere il centro di presa della camera con il centro di acquisizione dello strumento laser. In questo modo le immagini sono già orientate nello stesso sistema di riferimento dell'acquisizione, operazione utile in quanto consente di ridurre i tempi di elaborazione durante la fase di applicazione delle immagini sulla nuvola di punti.

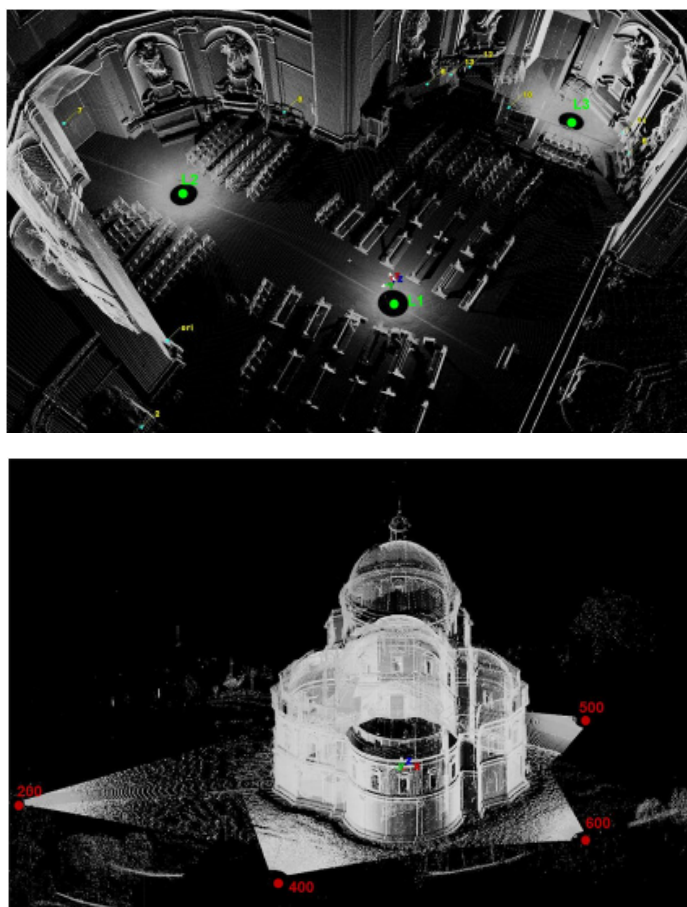


Figura 9 – Vista interna ed esterna della nuvola di punti complessiva.



Figura 10 – Target Leica HDS Twin Target Pole utilizzato per il collegamento tra stazioni del C10.

Tabella 3 – Residui dell'allineamento sulle coordinate dei target.

ConstraintID	ScanWorld	Status	Type	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 2	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	(-0.001; -0.001; -0.003) m
TargetID: 3	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	(-0.002; -0.001; -0.001) m
TargetID: 4	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.006 m	(-0.005; -0.003; -0.001) m
TargetID: 5	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.001m	(0.000; -0.001; 0.001) m
TargetID: 5	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.000 m	(0.000; 0.000; 0.000) m
TargetID: 5	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.000 m	(0.000; 0.000; 0.000) m
TargetID: 5	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.001 m	(0.000; 0.001; -0.001) m
TargetID: 5	aa4478.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.001 m	(0.000; 0.001; -0.001) m
TargetID: 5	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.000 m	(0.000; 0.000; 0.000) m
TargetID: 6	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	(0.002; -0.002; 0.001) m
TargetID: 7	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	(0.002; 0.000; 0.001) m
TargetID: 8	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	(0.003; 0.001; 0.001) m
TargetID: 8	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	(0.002; 0.002; 0.000) m
TargetID: 8	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.001 m	(-0.001; 0.001; -0.001) m
TargetID: 9	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.004 m	(-0.002; 0.003; 0.002) m
TargetID: 10	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	(0.002; 0.001; 0.000) m
TargetID: 10	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	(0.000; 0.001; -0.002) m
TargetID: 10	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	(0.002; -0.001; 0.000) m
TargetID: 11	aa4478.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	(0.000; 0.000; -0.002) m
TargetID: 12	aa4478.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	(0.000; -0.001; 0.002) m
TargetID: 13	aa4478.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	(0.001; 0.001; -0.002) m

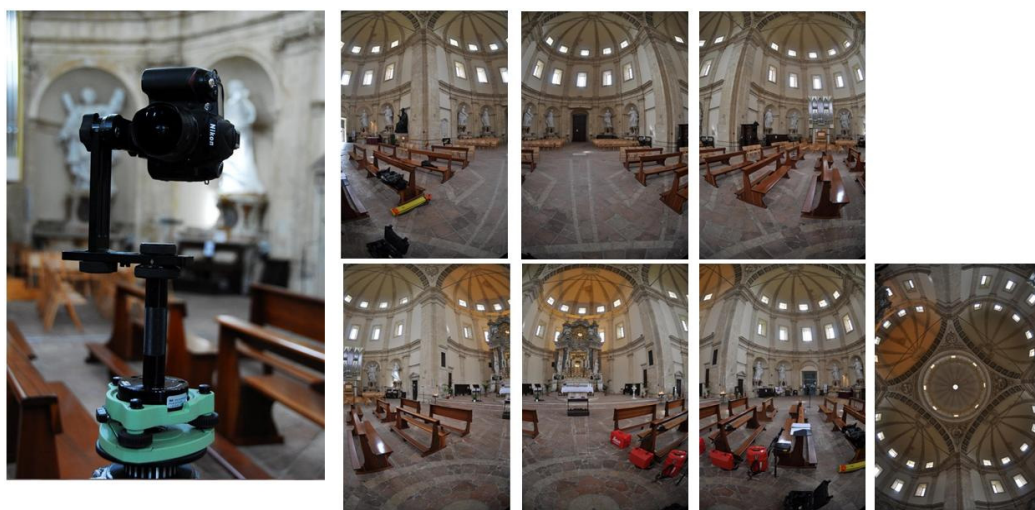


Figura 11 – Fotocamera montata su testa sferica eccentrica e immagini riprese dalla stazione 100.

Le foto prese da ciascuna stazione sono state utilizzate per creare una immagine panoramica sferica tramite il software PTGui (Fig. 12). Dalla panoramica, tramite il software Pano 2QTVR è stata ottenuta un'immagine cubica ovvero 6 immagini che si sviluppano sulle sei facce di un cubo virtuale (Fig. 13) applicabili alla nuvola di punti mediante l'individuazione di alcuni punti omologhi.

L'associazione della radiometria, contenuta nelle immagini fotografiche, ai punti laser ha consentito di "colorare" la nuvola di punti ottenendo una visualizzazione foto realistica (Fig. 14).

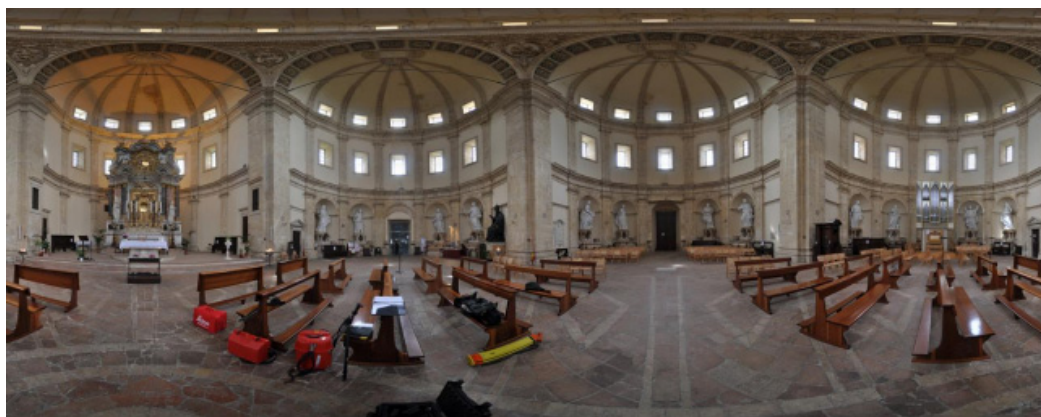


Figura 12 – Immagine panoramica sferica ottenuta dalle immagini di fig. 11.

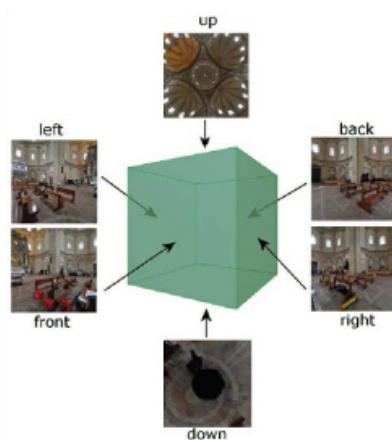


Figura 13 – Immagine cubica riferita alle prese precedenti.

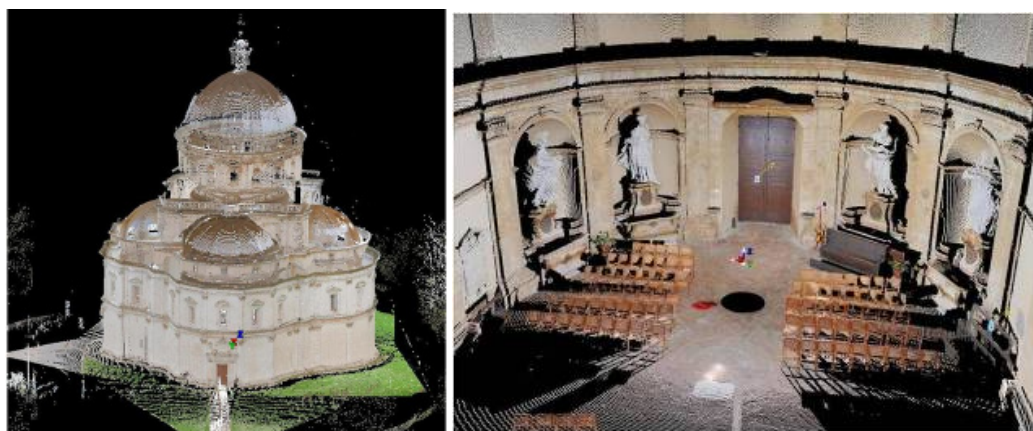


Figura 14 – Nuvola di punti “colorata” con le immagini calibrate su di essa.

3. Restituzione grafica e confronto con rilievi storici

L'ultima fase del lavoro è consistita nella restituzione grafica a partire dalle scansioni laser, ovvero nel disegno di elaborati grafici quali piante, prospetti e sezioni mediante una vettorializzazione della nuvola di punti in ambiente CAD. Questa operazione è avvenuta sempre all'interno del software Cyclone, che, oltre a gestire la nuvola di punti 3D fornendo diverse informazioni (planimetriche, altimetriche, distanze), consente di creare delle "ortoimmagini" orientate secondo un determinato piano (XY per le piante, XZ o YZ per le sezioni) che taglia la nuvola. Tali ortoimmagini sono fornite con i parametri di rototraslazione (file txt) per essere importate in ambiente CAD in scala 1:1, ovvero su di esse è possibile effettuare misure direttamente in metri reali. Vengono inoltre posizionate nel sistema di riferimento esterno della nuvola di punti totale.

Gli elaborati grafici ottenuti sono stati sovrapposti per confronto ai rilievi settecenteschi di Seroux D'Agincourt, dopo averli riportati alla medesima scala tenendo conto dell'unità di misura antica in essi adottata (fig. 15 e 16). Le sovrapposizioni mostrano una buona coincidenza nelle dimensioni generali dell'edificio, ma per alcuni particolari (soprattutto le semicupole laterali) sono emerse alcune discrepanze che si prevede di analizzare meglio con un affinamento delle scansioni da eseguire in futuro mediante ulteriori stazioni sulla terrazza del monumento.

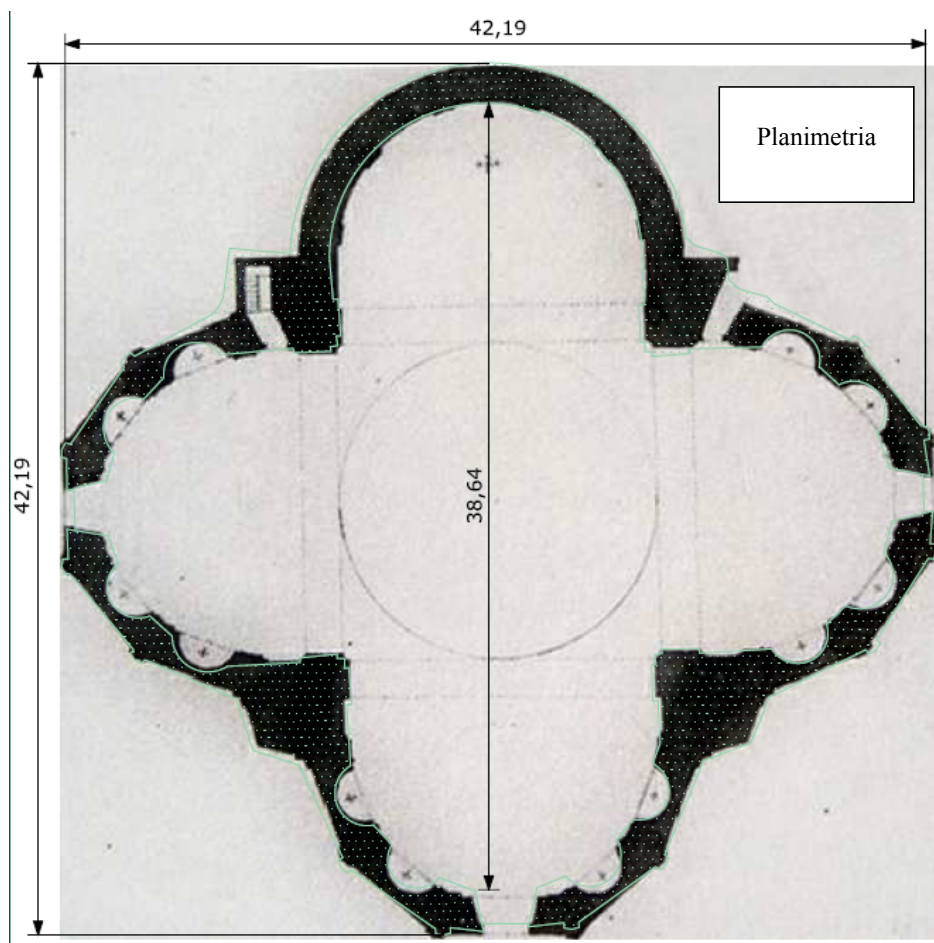


Figura 15 – Sovrapposizione tra il rilievo ottenuto da LIDAR (in verde) e quello settecentesco.

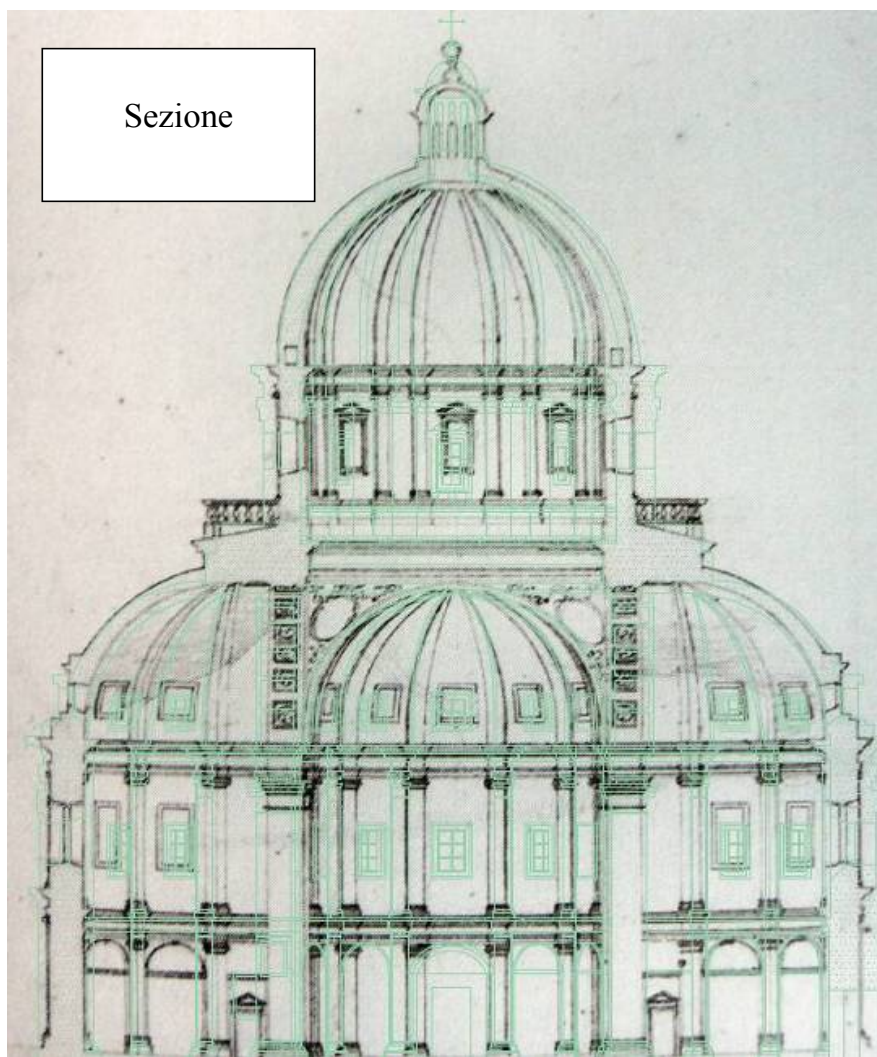


Figura 16 – Sovrapposizione tra il rilievo ottenuto da LIDAR (in verde) e quello settecentesco.

Ringraziamenti

Si ringrazia la Leica Geosystem Italia e in particolare il suo ufficio di Firenze e l'Ing. Matteo Lapini, che hanno gentilmente fornito la strumentazione per i test.

Si ringrazia inoltre L'Ente Tuderte di Assistenza e Beneficenza "La Consolazione", nella persona del Dr. Bruno Severi, che ha cortesemente consentito l'accesso e le riprese del monumento.

Bibliografia

C. e M. Grondona, Todi storica e artistica, Ediar, Todi (PG), 2009

(a cura di) C. Grassetti, Todi Bella, Grassetti Editore, Todi (PG), 1993

F. Mancini, Todi e i suoi castelli, Grafoedit Editrice, Todi (PG), 1992

M. Pallotta, Todi tra leggenda, storia e cronaca (dagli Etruschi ad oggi), Sograte, Città di Castello(PG), 1983

M.Pericoli, Precisazioni sulla Consolazioni di Todi, Res Tudertinae(18), Todi 1976.

Il sisma aquilano: rilievo laser-scanner delle architetture e interpretazione dei dati

Valentina Buttolo

Università IUAV di Venezia, Sistema dei Laboratori, Laboratorio di Fotogrammetria
Santa Croce 191, 30135 Venezia, Tel. 041 257 1521

Riassunto

Il rilievo delle aree colpite dal sisma è da intendersi soprattutto nel suo uso strumentale di appoggio alle discipline di analisi strutturale e di restauro.

Il laser a scansione è stato utilizzato, appena dopo l'emergenza e durante le successive esperienze di alcune Scuole Estive tenutesi a L'Aquila, per rilevare i fronti degli edifici del borgo storico di Sant'Eusanio Forconese.

La nuvola di punti è stata opportunamente filtrata e trattata, ed è stato possibile verificare e quantificare con esattezza le deformazioni subentrate nel tempo e successivamente al terremoto, rispetto alla geometria e alla morfologia originarie della fabbrica.

Il rilievo laser-scanner permette l'acquisizione della forma nel complesso delle sue irregolarità e non solo nelle sue linee essenziali. L'informazione topologica ottenuta è più complessa rispetto a quanto ottenuto attraverso i metodi tradizionali (topografia e fotogrammetria), ma risulta estremamente utile per rilevare deformazioni e dissesti subiti da strutture la cui geometria elementare è difficilmente leggibile sul campo perché estremamente complessa ed impossibile da raggiungere fisicamente con strumenti di misura convenzionali.

Abstract

The survey of portion of the city hit by an earthquake is to be intended in its being a useful support for other structural analysis and conservation and restoration studies.

Laser scanner has been used just after the earthquake in L'Aquila and during several summer schools that took place every year since the earthquake, to survey the facades of the buildings of the old center of Sant'Eusanio Forconese.

The point cloud has been treated and filtrated, in order to quantify and verify exactly the deformations due to the earthquake, confronted with the original form and geometry of the building.

Laser scanning surveys allow the acquisition of the complexity of the form of the building, with its irregularity, not only in some essential lines, as it is in topography. The whole information is more complex than what we obtain with traditional techniques (topography and photogrammetry), but it is extremely useful to survey and measure deformation and dissessts of structures which geometry is extremely difficult to read because of the damage due to the earthquake and the impossibility of reach it physically with traditional methods of measurement.

Articolo

Il rilievo delle aree colpite dal sisma presenta alcune caratteristiche specifiche, che lo rendono difficilmente ascrivibile agli schemi convenzionali e alle metodologie standardizzate di questo tipo di attività. Ogni situazione diventa un caso a sé stante e richiede l'intervento e l'integrazione di metodi e strumenti che operano con precisioni non omogenee ma che devono colloquiare in qualche modo tra loro all'interno di un unico sistema di riferimento generale.

I riferimenti che in genere guidano e sottendono la costruzione dell'architettura e quindi anche il suo rilievo (piani paralleli ai solai e alle murature), spesso vengono a mancare. Le architetture presentano gravi lesioni che ne modificano la forma, spesso sono avvenuti dei crolli e quindi non rimangono che macerie. In tali situazioni i riferimenti prima considerati come fondamentali per la progettazione e l'esecuzione di un rilievo, vengono completamente persi.

Il rilievo delle aree colpite dal sisma del 6 aprile 2009 in Abruzzo, data la vastità e la diffusione sul territorio dell'evento, pone la necessità di:

- rilevare la posizione dei manufatti all'interno di un'area urbana circoscritta;
- rilevare ogni singolo edificio (rilievo dei manufatti architettonici emergenti);
- rilevare alcuni particolari al fine di permetterne un possibile recupero.

Il tutto però va sempre inserito in un quadro più vasto, in modo che non vadano mai persi i rapporti tra le parti di cui si compone l'area considerata.

Il rilievo in questo caso non è infatti più finalizzato allo studio della città e delle sue fabbriche, ma diviene soprattutto un contenitore multi-scala dove possono essere catalogate le emergenze: è quindi inteso in questo senso nel suo uso strumentale per le discipline di analisi strutturale e di restauro.

Il Rilievo

L'obiettivo principale delle operazioni di rilievo pianificate nel borgo era definire le posizioni dei diversi volumi edificati prospicienti la piazza del centro urbano e rilevare i fronti dei palazzi, al fine di poter effettuare un'analisi dello stato di degrado e una valutazione statica delle strutture, il cui comportamento è influenzato dai dissesti e dalle deformazioni morfologiche che si sono succedute nel tempo, il tutto aggravato ancor più dal possibile innesco di alcuni cinematismi dovuti alla forte scossa sismica del 6 aprile 2009.

Proprio la grande rapidità di acquisizione dei dati si caratterizza come particolarità fortemente positiva nell'utilizzo del laser scanner, che unisce alla precisione metrica del rilievo degli edifici la definizione dell'immagine delle facciate. L'immagine urbana è così caratterizzata contestualmente alla definizione dimensionale corretta degli edifici e degli spazi urbani oggetto del rilievo, consentendo la ricostruzione tridimensionale dello spazio esterno della piazza e relazionando tutti gli elementi tra loro.

Il rilievo topografico (eseguito mediante una stazione totale Leica TCR) ha definito la rete geometrica di riferimento e ha consentito di riportare in un unico sistema di riferimento tutte le scansioni effettuate nello spazio urbano del piazzale, arrivando a definire un modello tridimensionale, per punti, dello spazio stesso.

La tecnologia del laser scanning consente di acquisire digitalmente oggetti tridimensionali di varie dimensioni sotto forma di nuvole di punti. La descrizione geometrica digitale dell'oggetto è discreta: quanto maggiore è la risoluzione impostata per l'acquisizione tanto più densa sarà la nuvola di punti e quindi il dettaglio della rappresentazione.

Ciascun punto è definito da una posizione spaziale in coordinate x e y e z rispetto al punto di origine rappresentato dalla posizione dello scanner. Se lo scanner è dotato di fotocamera digitale incorporata è possibile mappare anche il valore RGB, quindi il valore cromatico, del punto acquisito.

A Sant'Eusanio Forconese è stato utilizzato il laser scanner in dotazione al laboratorio di fotogrammetria, il modello LMS-Z360i della Riegl, integrato con camera digitale Nikon D100, che consente di arrivare ad avere precisioni di 2 mm e misura fino a 11000 punti al secondo.

Questo tipo di strumento è un laser a tempo di volo (TOF, *Time Of Flight*), cioè le coordinate 3D dell'oggetto sono derivate dalla misura del tempo che il raggio laser impiega a ritornare verso l'oggetto dopo averlo colpito. Si tratta di un sensore terrestre portatile, adatto all'acquisizione veloce di immagini tridimensionali di buona qualità anche in presenza di difficili condizioni ambientali. E' considerato un sistema "ibrido laser scanner-fotogrammetrico", che offre la

possibilità di acquisire non solo le tre osservazioni necessarie alla determinazione delle coordinate X,Y, Z di ogni punto ma anche i valori RGB corrispondenti al singolo punto rilevato.

L'acquisizione automatizzata per passi angolari discreti annulla la preventiva operazione di discretizzazione propria del rilevamento diretto o con stazione totale, che impone una conoscenza a priori dei punti interessati dai fenomeni di dissesto. Il laser scanner rileva la posizione di tutti i punti nello spazio su una maglia ortogonale fissata: riducendo la distanza tra i punti acquisiti a valori molto piccoli, nell'ordine del centimetro è quindi possibile rilevare intere superfici, nella loro forma complessiva, senza bisogno di ridurle a linee individuate da predeterminati piani di sezione orizzontali e verticali.

Il prodotto finale delle scansioni è una “nuvola di punti” con una densità superiore ad un punto per centimetro, che ricostruisce la forma complessiva dell'oggetto attraverso la visualizzazione delle sue superfici.

Nonostante si sia parlato in precedenza di acquisizione automatica dei dati, anche nel caso di un rilevamento con laser scanner occorre un accurato progetto preliminare delle fasi di rilievo e dunque un sopralluogo al fine di verificare le caratteristiche geometrico – dimensionali del manufatto e l'accessibilità dei luoghi. Immaginando di paragonare lo scanner ad una sorgente luminosa si devono infatti prevedere sufficienti punti di acquisizione in modo da coprire tutti i “coni d'ombra” che superfici sporgenti, sottosquadri, rientranze e impedimenti vari inevitabilmente proiettano.

La grande piazza del borgo ha favorito in questo senso il rilievo da punti sufficientemente lontani, in modo da permettere di minimizzare la copertura dovuta a rientranze ed aggetti. Sulla base di questi fattori sono state definite, oltre alla strumentazione da usare, al posizionamento e al numero delle stazioni, anche le impostazioni di scansione che determinano la quantità dei punti rilevati.

Essendo state necessarie molte scansioni per acquisire tutte le superfici murarie e coprire tutte le superfici, è seguita una fase di post-processamento dei dati in cui, con l'utilizzo di specifici software si sono assemblati i risultati ottenuti dai singoli lavori. Per poter ricomporre ed allineare le scansioni in una nuvola globale si è proceduto secondo una metodologia chiamata “georeferenziazione sui target”, che prevede l'uso di dati topografici.

Dopo questa prima fase di assemblaggio delle scansioni e di registrazione dei dati il modello tridimensionale dell'oggetto può considerarsi completo, anche se costituito solamente da milioni di punti nello spazio.



Figura 1 – Le scansioni della piazza del Borgo di Sant'Eusanio Forconese.

Uno dei motivi che ha portato alla scelta di un rilievo attraverso l'utilizzo di un laser scanner è stata proprio la necessità di acquisire la forma nel complesso delle sue irregolarità e non solo nelle sue linee essenziali, per poter esprimere valutazioni sulla sua qualità costruttiva e sulle possibili deformazioni subentrate nel tempo e dopo il sisma e quindi ipotizzare corretti fenomeni di dissesto e conseguenti adeguati progetti di consolidamento.

Il laser scanner è stato scelto anche per la possibilità di rilevare parti non raggiungibili con metodologie più tradizionali e per la necessità di minimizzare l'esposizione dell'operatore in un contesto ad alto rischio come quello di porzioni di città colpite dal sisma.

Sono poi possibili restituzioni raster e vettoriali ottenibili in modo semplificato e la tecnologia laser scanner permette anche nuovi prodotti grafici, come l'ortofoto 3D e le immagini solide.

La nuvola di punti, risultato della scansione laser scanner, è stata utilizzata, nel caso del borgo di Sant'Eusanio Forconese, per lo studio di una particolare applicazione volta ad analizzare la facciata di Palazzo Barberini, prospiciente la piazza, come verifica di alcune ipotesi di dissesto dopo il terremoto del 6 aprile dello scorso anno.

Attraverso un programma di modellazione di superfici in 3D, *Surfer 9*, distribuito dalla *Golden Software*, si è voluta studiare l'elaborazione di un possibile metodo automatico-assistito per l'individuazione dei meccanismi di dissesto innescatosi nelle fabbriche colpite dal sisma.

Si ricorre spesso a metodologie basate su dati in formato digitale per descrivere la variazione continua di quote nello spazio, utilizzando i cosiddetti *Digital Terrain Model* o *Digital Elevation Model*. I *DTM*, inizialmente introdotti proprio per descrivere l'andamento delle quote del territorio, sono ora impiegati per descrivere l'andamento di un qualsiasi attributo (ad esempio inquinanti o temperature al suolo), al variare delle coordinate planimetriche.

I dati per costruire un *DTM* vengono acquisiti con differenti distribuzioni spaziali a seconda del tipo di impiego a cui è finalizzato il *DTM*: nel caso di scansioni laser i dati sono costituiti da una serie di punti ognuno con coordinate x , y , z .

Il programma utilizzato permette la creazione di *DSM* (*Digital Surface Model*) a partire da una nuvola di punti con coordinate x , y , z . Solitamente è usato per la creazione di modelli digitali di terreno a partire da scansioni laser o da cartografia numerica, in questo caso se ne è voluta testare la validità creando superfici 3D dei prospetti degli edifici del borgo per studiarne l'andamento rispetto ad un asse di riferimento stabilito.

Si è scelto di testare il metodo descritto su una facciata di palazzo Barberini a Sant'Eusanio, di cui sono state compilate le schede speditive di rilievo del danno fornite dalla Protezione Civile, in modo da consentire un confronto tra i risultati ottenuti e le ipotesi da verificare.

L'acquisizione dei dati del laser scanner avviene senza selezione preventiva dell'operatore e consente una vasta raccolta di dati, che però devono essere sempre selezionati: la nuvola di punti ottenuta dal laser scanner è stata pulita, eliminandone gli errori e prendendo in considerazione solo la porzione di edificio desiderata. Sono stati cancellati i punti troppo distanti dalla facciata e non appartenenti al piano medio, rispetto a cui si vogliono evidenziare i discostamenti.

Viste le considerazioni fatte in precedenza sulla formazione di *DTM*, è stato necessario modificare il sistema di riferimento della nuvola: è stata rototraslata in modo che il piano formato dagli assi x e y individui il prospetto considerato e l'asse z ne risulti conseguentemente ortogonale. Il programma *Surfer* infatti, essendo concepito per la cartografia territoriale a vasta scala, procede con la creazione di *DSM* a partire dalla variazione in quota dei punti considerati, considerando quindi il valore z della terna di coordinate. In pratica si considerano gli scostamenti dal piano medio provocati dall'attivazione dei meccanismi di collasso come "differenze di quota" rispetto ad uno "zero", un asse medio stabilito in modo opportuno.

A partire dalla nuvola di punti, la cui distribuzione è irregolare, si è proceduto alla creazione di un file grid (grigliato), ottenuto mediante il ricampionamento regolare dei punti originali di misura, che tipicamente sono distribuiti invece in maniera irregolare. Il file che contiene i dati digitali che

rappresentano il *DSM* è quindi una matrice di valori, ognuno dei quali corrisponde alla quota attribuita a un pixel del raster che rappresenta il modello stesso. Nel caso considerato è stata usata una griglia regolare di punti: fissato il passo di campionamento (e quindi l'intervallo della griglia), le coordinate *x* e *y* sono implicite.

Per ricavare una griglia regolare di valori a partire dai dati a disposizione è possibile utilizzare diversi algoritmi di interpolazione. Surfer permette la scelta tra numerosi diversi algoritmi, nel caso considerato si è optata per la scelta dell'algoritmo di Kriging, che permette di creare una buona qualità di grigliato per molti set di punti. Per eliminare la rumorosità dei dati è stato applicato un filtro sulla mediana, in modo da ottenere una superficie meno disturbata.

È stato quindi creato il *DSM* della facciata dell'edificio. Attraverso una scala a falsi colori è possibile individuare, in modo semplice ma nello stesso tempo univoco, gli scostamenti rispetto al piano medio impostato. Sono proprio questi scostamenti che individuano i dissesti provocati dal sisma e in questo modo la lettura degli stessi risulta molto agevolata.

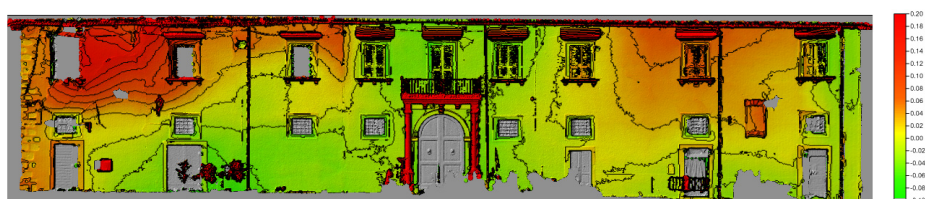


Figura 2 – *DSM della facciata con visualizzazione a falsi colori.*



Figura 3 – *Visualizzazione 3D del DSM a falsi colori e con valori RGB.*

Conclusioni

Attraverso questo metodo sembra possibile verificare, utilizzando i dati laser acquisiti sul posto, delle ipotesi di danneggiamento che sono state fatte a seguito del sisma in modo speditivo e a vista, in genere eseguite nella prima fase di emergenza post-sismica. I meccanismi di collasso si manifestano infatti in genere in modo visibile sulle fabbriche, provocando lesioni e danno che ne sono diretta testimonianza e che sono sempre gli stessi per lo stesso meccanismo di danno.

Con questo tipo di elaborazioni è possibile evidenziare anche minime variazioni rispetto al piano, non apprezzabili se non con metodi strumentali ma che tuttavia testimoniano meccanismi attivati, permettendo sempre e comunque un confronto con il dato numerico.

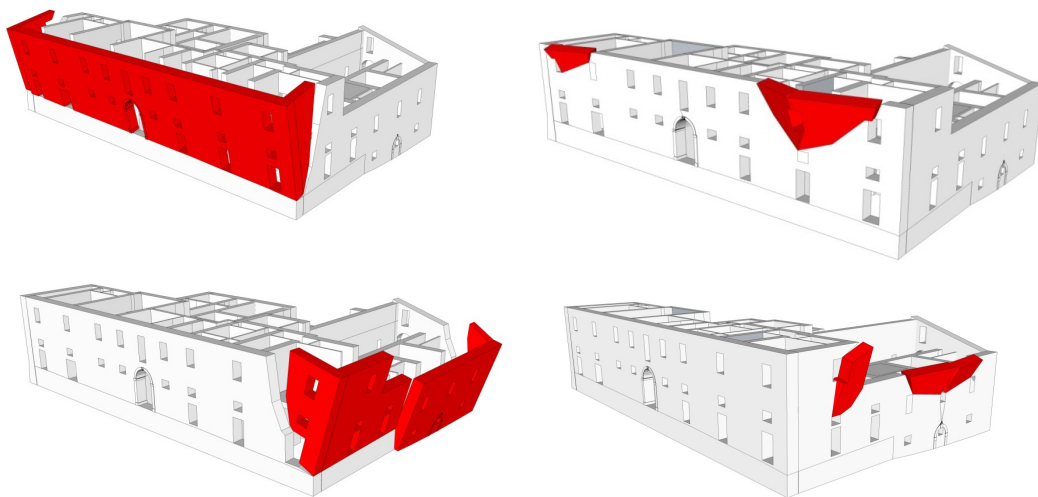


*Figura 4 – Confronto tra danni identificati visivamente e dopo la verifica con DSM
- facciata e lato est.*

Viene posticipata la fase di elaborazione dei dati e quindi ridotto il rischio che deriva dall'esposizione dell'operatore in luoghi pericolosi come quelli del centro storico colpito dal sisma: l'acquisizione automatica di una grande quantità di dati permette tempi brevi di permanenza.

Le nuove elaborazioni grafiche ottenute sono facilmente ottenibili e comprensibili, comunicano con precisione i dati metrici e hanno forte impatto grafico, ma è tuttavia possibile ottenere anche elaborazioni più tradizionali, attraverso l'estrazione automatica di profili o di curve di livello, anche con esagerazioni volte ad evidenziare determinati fenomeni di dissesto.

Proprio la divisione del lavoro in due fasi successive, una di campagna e una di elaborazione, può portare a qualche problema interpretativo: viene a mancare infatti il contatto diretto con la fabbrica. La lettura dei meccanismi di dissesto delle fabbriche risulta particolarmente agevole per quelli che vengono definiti "danni di primo modo", cioè attivati da forze che agiscono in modo ortogonale al piano della facciata e che generano quindi danni fuori dal piano come rotazioni, ribaltamenti o espulsioni di materiale. Sono proprio questi scostamenti dal piano che vengono evidenziati attraverso l'utilizzo di una scala a falsi colori del programma Surfer.

La lettura non è altrettanto agevole per quanto riguarda i danni di secondo modo, cioè provocati da forze che agiscono nel piano della muratura, che generano soprattutto rotture a taglio nei maschi murari e nelle fasce di piano. Questo tipo di danno è testimoniato dalle tipiche rotture della muratura ad X, ma proprio perché avviene nel piano stesso della muratura non è direttamente leggibile come spostamenti del materiale murario rispetto ad uno zero. Per questo motivo tale tipo di elaborazione grafica andrebbe sempre accompagnata da disegni e da analisi di tipo tradizionale, come possono essere i quadri fessurativi o deformativi, di cui potrebbe essere considerata come un completamento. Solo in questo modo è possibile una lettura globale di un sistema complesso come quello di un edificio, per avere informazioni adeguate circa lo stato di salute dello stesso dopo il sisma. Devono infatti sempre tenere in considerazione anche altri aspetti, non solo "spaziali", quali lo stato di conservazione e di degrado del materiale che compone la muratura e la bontà delle connessioni tra le parti della fabbrica.

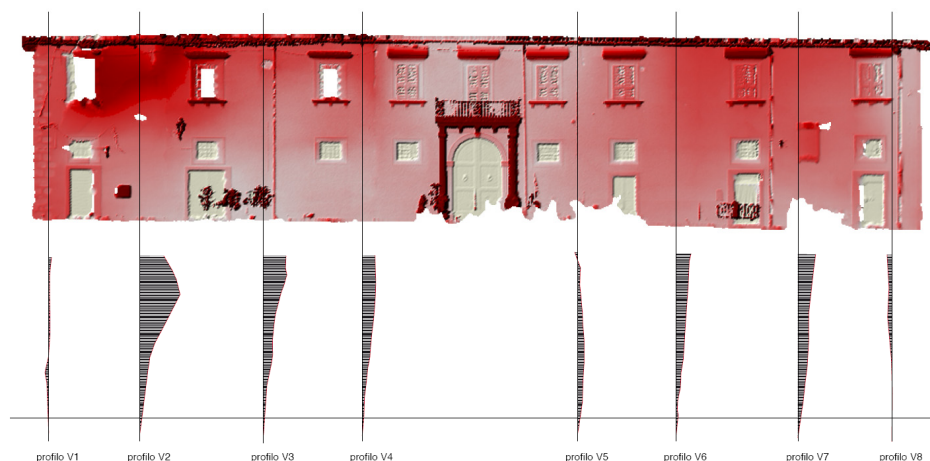


Figura 5 – DSM ed elaborazioni tradizionali: profili verticali.



Figura 6 – DSM ed elaborazioni tradizionali: quadro fessurativo

Bibliografia

- Achille C, (2008) "Applicazioni di tecniche miste laser scanner e fotogrammetria", in "Il cantiere della conoscenza: metodologie e strumenti per la conservazione e il restauro", a cura di A. R. Genovese, Arte Tipografica, Napoli.
- Balletti C, Guerra F. (2006), "Il rilievo per la rappresentazione 3D: la città romana di Grumentum", in Atti del convegno nazionale SIFET "Le nuove frontiere della rappresentazione 3D", Castellaneta Marina, Taranto, 14-16 giugno 2006.
- Guerra F, Balletti C, Adami A, (2005), "3D multiresolution representations in archaeological sites", in Proceedings of CIPA 2005 XX International Symposium "International cooperation to save the world's cultural heritage", Torino, 26 settembre - 1 ottobre 2005.
- Guidi G, Beraldin J A, (2004) *Acquisizione 3D e modellazione poligonale. Dall'oggetto 3D al suo calco digitale*, Edizioni Poli design, Milano.
- Monti C, Fregonese L, (2008), "Il rilievo e il patrimonio culturale: le interrelazioni con la scienza e la pratica", in "Il cantiere della conoscenza: metodologie e strumenti per la conservazione e il restauro", a cura di A. R. Genovese, Arte Tipografica, Napoli.

G.I.R.E.T.: uno strumento informatico per la gestione analitica e territoriale di indicatori di realtà energetiche

Emanuela Caiaffa (*), Laura Gaetana Giuffrida (**),
Giovanni Paolo Maria Esposito (***), Patrizio Boschi (***)

(*) ENEA, Laboratorio Modellistica Climatica e Impatti (UTMEA-CLIM), Centro Ricerche Casaccia
Via Anguillarese 301, 00123 Roma, Tel. 0630483698, Fax 0630484264, emanuela.caiaffa@enea.it

(**) ENEA, Lungotevere Thaon di Revel 76, 00196 Roma, Tel. 0636272663, tania.giuffrida@enea.it

(***) Liberi professionisti

Riassunto

G.I.R.E.T. (Gestione Indicatori di Realtà Energetiche e Territoriali) è un software che è stato ideato e realizzato allo scopo di fornire un supporto per la rappresentazione di indicatori energetici, sia a livello di macro settori (industria, agricoltura, trasporti, terziario e residenziale) sia a livello territoriale, grazie all'integrazione dello strumento GIS (Geographic Information System) all'interno del sistema informativo stesso. Tale caratteristica si allinea perfettamente con i nuovi canoni di approccio alle politiche energetiche, che devono per forza di cose tenere conto di numerose variabili economiche, sociali, ambientali, territoriali e devono quindi presentare la caratteristica di poter integrare specifici indicatori con le realtà territoriali utilizzando lo strumento GIS.

La gestione dei dati all'interno di GIRET è a risoluzione regionale poiché a tale scala è disponibile la maggior parte dei dati della statistica ufficiale (dati sui consumi, dati sulla popolazione, bilanci energetici, ISTAT ecc.). In ogni caso, nella consapevolezza dell'importanza di condurre analisi a scala territoriale più dettagliata, è stata anche implementata, all'interno del sistema GIRET, la struttura portante di gestione dei dati a risoluzione sub-regionale (province).

Abstract

The paper describes G.I.R.E.T. software that is an informatics tool to manage energetic indicators at either the macro-sector level or the territorial level. The GIRET software has been implemented at ENEA to support the energetic indicators creation and their representation in a territorial way. The informatics tool GIRET permit to manage also a series of macro-sector indicators like industry, agriculture, transport, residential, etc. In an integrated approach to energy policy-making, priority is now given to the use of indicators. GIRET is a software program that enables users to create and plot energy indicators thanks to the integration of a GIS tool. GIRET has been realized using open source and freeware software.

Introduzione

Scopo del presente articolo è la presentazione di GIRET: uno strumento informatico per lo studio e la rappresentazione a livello territoriale di indicatori energetici. Il software GIRET, brevetto ENEA N° 623, è tutelato dal Diritto d'Autore con Numero del deposito SIAE (Società Italiana degli Autori ed Editori) Sezione OLAF – Servizio Deposito Opere Inedite: 0605526, con decorrenza dal 19.12.2006 e con scadenza il 18.12.2011.

E' ormai assodato che, anche a livello europeo, tutti i paesi sono chiamati a dimostrare, attraverso lo studio di specifici indicatori, i progressi conseguiti in campo energetico e ambientale che prevedono il monitoraggio delle emissioni di gas a effetto serra, anche in vista dell'attuazione del protocollo di Kyoto. Ne è derivata l'esigenza di poter disporre di indicatori il più possibile rappresentativi del

Sistema Energia, in grado cioè di facilitare la lettura delle correlazioni tra i diversi fenomeni legati ai processi di produzione e utilizzazione dell'energia stessa. In questa visione integrata delle problematiche che ruotano attorno alle politiche energetiche, l'utilizzo di indicatori energetici ha assunto un'importanza prioritaria.

Il prodotto software GIRET si inserisce in questo contesto in quanto è un'applicazione web per la gestione e il calcolo di indicatori di realtà energetiche e territoriali. Il lavoro compiuto per la realizzazione del software si è posto come obiettivo quello di fornire nuovi strumenti avanzati per lo studio e l'analisi delle correlazioni tra energia-economia-ambiente-territorio nei diversi settori utilizzatori dell'energia (Agricoltura, Industria, Terziario, Residenziale, ecc.).

GIRET è stato interamente ideato e realizzato dagli autori allo scopo di fornire ai potenziali utenti elementi descrittivi e rappresentativi delle realtà energetiche nei diversi livelli di risoluzione territoriale (Regioni, Province, ecc.). La caratteristica essenziale di GIRET, è di avere introdotto la possibilità di legare al territorio i risultati delle elaborazioni effettuate all'interno di GIRET stesso. In questo modo la capacità, propria dello strumento GIS, di condurre correlazioni tra fattori di tipo energetico, socioeconomico e fattori antropici e ambientali, permette di evidenziare attraverso la rappresentazione geografica, le specificità di una o più aree territoriali.

Per il software GIRET sono stati ideati diversi tipi di output che vanno dalla rappresentazione della distribuzione dei dati tramite mappe tematiche per area territoriale e per identità territoriale, alla rappresentazione tramite uscite grafiche personalizzabili.

Mediante l'analisi per area territoriale, si possono visualizzare i dati di base e gli indicatori scelti per tutte le zone facenti parti di un insieme (tutte le regioni italiane, alcune regioni italiane). La rappresentazione può essere tabellare, grafica (mediante esportazione su foglio di calcolo), oppure su mappe con l'ausilio del sistema GIS MapServer. I dati possono inoltre essere esportati per ulteriori elaborazioni.

Mediante l'analisi per identità territoriale, si può accedere a tutti i dati di una determinata regione per la quale si potranno scegliere l'anno e il settore d'interesse. La visualizzazione dei dati attraverso carte tematiche permetterà di operare, da parte degli addetti, una serie di confronti sia tra le diverse regioni che tra differenti anni.

Il software in oggetto gestisce la parte cartografica di output con il sistema GoogleEarth, permettendo anche la personalizzazione delle gamme di colori delle carte tematiche, del numero delle classi, ecc.. E' dotato inoltre di una serie di uscite grafiche personalizzabili e esportabili in files immagini. Il sistema è dotato di pagine di help cui si accede cliccando su questo bottone: .

L'applicativo GIRET

Il sistema GIRET è un innovativo strumento di supporto alla programmazione energetica regionale concretizzatosi nella realizzazione di una applicazione Web pienamente rispondente ai più moderni requisiti di semplicità di utilizzo, funzionalità ed estendibilità. Il tutto è stato realizzato con l'ausilio di tecnologie esclusivamente Open Source.

Attraverso le sue funzioni, GIRET consente di costruire, relativamente ad un anno e/o ad un arco di tempo predefinito, indicatori di diverse categorie come:

- indicatori strutturali, economici, demografici, ecc., per descrivere le caratteristiche dell'utenza energetica nei vari settori;
- indicatori di intensità e di densità per valutare l'incidenza e/o la concentrazione di un determinato fenomeno sul territorio;
- e più in generale, il sistema permette di evidenziare le correlazioni di alcune variabili significative, in relazione all'obiettivo di analisi e valutazione prefissato.

Gli indicatori, una volta identificati, calcolati e classificati, vanno a costituire, insieme ai dati di base, il database del sistema informativo stesso, calibrato per fornire informazioni significative e specifiche, in relazione alle esigenze di ciascun utente.

Dal punto di vista operativo, questo avviene attraverso le funzionalità del software GIRET che si possono sintetizzare nei seguenti punti:

- capacità di apprendere, a livello settoriale e territoriale, nuove variabili e dati di base con la possibilità di inserirli e caratterizzarli con nome, unità di misura, e descrizione: dati che costituiscono i valori da data entry (Figura 1, Figura 2, Figura 3);
 - capacità di apprendere nuovi indicatori con la possibilità di inserire le formule necessarie al calcolo degli stessi, e che costituiscono i cosiddetti valori generati (Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8);
 - fornire output utili ed esportabili come tabelle regione-valore, tabelle multicolumna (regione val1-val2-...), serie storiche, grafici, direttamente on-line in formato excel compatibile ed in DBF, Istogrammi (Figura 4, Figura 9) e tramite restituzione territoriale GIS (Figura 10, Figura 11, Figura 13).
 - limitazione degli accessi per cui il prodotto presenta una gestione dell'utenza definita da ruoli gerarchici governati da password con snelle procedure di autenticazione.
- Come si evince dalla Figura 1 l'utilizzo del sistema, per come è stato concepito, prevede l'attivazione delle diverse funzioni attraverso delle scelte riassunte nei bottoni: OUTPUT DATI, DATA ENTRY, GESTIONE DB.

The screenshot shows the GIRET web application interface. At the top, the ENEA logo is on the left, and the text 'GESTIONE INDICATORI DI REALTÀ ENERGETICHE E TERRITORIALI' and 'VERSIONE: 2.00ALPHA' are in the center. On the right, it says 'Logged: caiaffa' with a user icon. Below the header is a navigation bar with buttons: HOME, OUTPUT DATI, DATA ENTRY, and GESTIONE DB. The 'DATA ENTRY' button is highlighted, and a dropdown menu is open showing options: AREA TERRITORIALE, IDENTITÀ TERRITORIALE, and IMPORTAZIONE DATI. The 'AREA TERRITORIALE' option is selected, and a sub-menu is open showing: ITALIA, MACROREGIONI, REGIONI, and PROVINCE. Below the navigation bar, the main content area is divided into two sections. The first section is titled 'INPUT DATI PER AREA TERRITORIALE' and features a map of Italy. It includes a list of hierarchical levels: Macrorregioni Italiane, Regioni Italiane, Province Italiane, Comuni Italiani, and L'intero territorio Italiano. The second section is titled 'INPUT DATI PER IDENTITÀ TERRITORIALE' and features a magnifying glass icon. Both sections contain explanatory text and examples of data entry.

GESTIONE INDICATORI DI REALTÀ ENERGETICHE E TERRITORIALI
VERSIONE: 2.00ALPHA

Logged: caiaffa

HOME OUTPUT DATI DATA ENTRY GESTIONE DB

Pagina corrente: Data Entry

Sezioni:

- Input dati per area territoriale
- Input dati per identità territoriale
- Importazione dati esterni

AREA TERRITORIALE

IDENTITÀ TERRITORIALE

IMPORTAZIONE DATI

ITALIA

MACROREGIONI

REGIONI

PROVINCE

INPUT DATI PER AREA TERRITORIALE

Mediante questo tipo di input dati si può inserire e modificare il valore di **un determinato dato di base per tutte le zone** facenti parte di un insieme.

Esempi:

- Inserisci il numero di abitazioni nell'anno 2005 per ogni regione.
- Modifica i valori delle emissioni di CO2 per l'anno 2006 per ogni macroregione.

- Macrorregioni Italiane
- Regioni Italiane
- Province Italiane
- Comuni Italiani
- L'intero territorio Italiano

INPUT DATI PER IDENTITÀ TERRITORIALE

Mediante questo tipo di input dati si può inserire e modificare il valore di **tutti i dati di base per una zona**.

Esempi:

- Inserisci vari valori per il Lazio.
- Modifica i valori delle emissioni di CO2 per l'anno 2006 del

Figura 1 – DATA ENTRY.

Una delle prime operazioni da compiere per attivare e personalizzare lo strumento GIRET è quello di caricare al suo interno la serie di dati di base utili alle elaborazioni che si hanno in programma di operare.

La Figura 2 mostra come accedere alle varie possibilità di data entry che possono essere eseguite, come già accennato, per area territoriale o per identità territoriale.

Altra funzione molto importante, per un appropriato utilizzo del sistema GIRET, è la creazione e la gestione del data base che costituirà la spina dorsale dell'intero sistema informativo.

La Figura 2 mostra l'accesso a questo tipo di facility.

Scegliendo l'opzione indicata dalla freccia di Figura 2 si accede ad una pagina di dialogo attraverso la quale, riempiendo i giusti campi, è possibile caricare una serie di dati di base oppure crearne dei nuovi (Figura 3).



Figura 2 – Gestione Dati di Base.

Nome	Unità	Descrizione	Gruppo	C
consumi finali di energia	ktep	consumo finale di energia da tutte le fonti energetiche	public	
consumi finali di energia nell'industria	ktep		public	
Consumo di energia elettrica settore Industria	GWh	Consumo totale di energia elettrica per il settore Industria	public	

Figura 3 – Gestione Dati di Base: creazione del nuovo tema: consumi finali di energia.

La Figura 4 mostra la creazione e caricamento, nel data base del sistema informativo GIRET, dei dati numerici per regione, relativi al dato di base *consumi finali di energia*, che indica il valore, per regione italiana, dei consumi finali di energia da tutte le fonti energetiche disponibili per quel territorio (prodotti petroliferi, gas naturale, rinnovabili, energia elettrica, ecc.).

Attraverso gli strumenti di input del sistema è possibile anche caricare i dati dei consumi regionali divisi per fonti (gas, elettrico, idrografico, eolico), ottenerne delle uscite, sia grafiche che cartografiche, e fare dei confronti tra l'ammontare di tali diversi tipi di consumi.

Una volta creato questo nuovo dato di base l'aspetto più interessante del sistema GIRET, è che permette la sua visualizzazione, oltre che dal punto di vista numerico e grafico, anche dal punto di vista di distribuzione del dato stesso sul territorio attraverso l'uso del GIS.

Quindi, una volta finita la creazione del dato appena descritto in GESTIONE DB, passando al bottone OUTPUT DATI -> AREA TERRITORIALE -> REGIONI, si accede alla visualizzazione dei dati stessi come mostrato nella Figura 4.

Cliccando sulla icona indicata dalla freccia nella Figura 4 si può ottenere il grafico dei dati appena creati che si può personalizzare come mostrato nella Figura 9. La personalizzazione del grafico può interessare sia il tipo di grafico stesso (Bar Chart, Line Chart, Pie Chart, Line Dot Chart, Line Hollow Chart, Area Hollow Chart, ecc.), sia la scelta e la combinazione dei diversi colori delle parte che lo compongono (Figura 9).

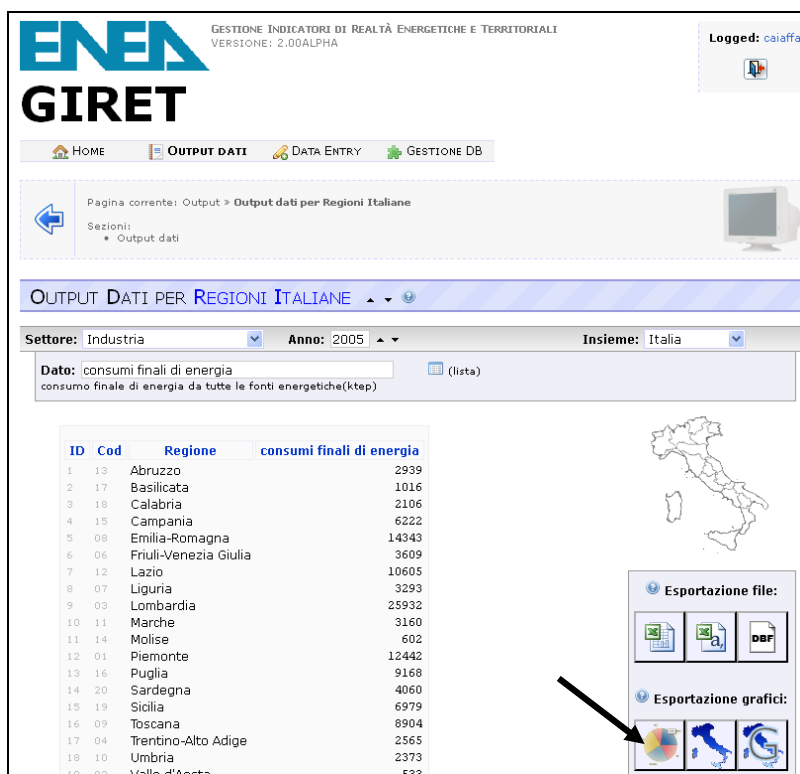


Figura 4 – Output Dati per regioni italiane.

Una funzione veramente molto importante per il raggiungimento degli obiettivi previsti dal software GIRET, è la possibilità di poter creare indicatori ad hoc a seconda delle esigenze dell'utenza. La

creazione degli indicatori avviene utilizzando il percorso, GESTIONE DB-> INDICATORI, mostrato nella finestra di Figura 5.



Figura 5 – Attivazione del percorso per la creazione di un indicatore.

Nome	Unità di misura	Descrizione	Gruppo	C
Consumo energia elettrica pro capite	Kwh/anno pro capite	Consumo energia elettrica per popolazione residente	public	

Figura 6 – Riempimento dei campi e attivazione della finestra per l'inserimento della formula per la creazione di un indicatore.

ENEA GIRET GESTIONE INDICATORI DI REALTÀ ENERGETICHE E TERRITORIALI VERSIONE: 2.00ALPHA

Logged: caiaffa

HOME OUTPUT DATA

Pagina corrente: Gestione Database » Editor Indicatori

Sezioni:

- Modifica Indicatore
- Elenco Indicatori esistenti

MODIFICA INDICATORE

Settore: **Residenziale**

Nome: **Indice di invecchiamento**

Unità di Misura: **%**

Descrizione: **Indice di invecchiamento**

Tipo: **Dens./Intens.** ☐ Struttura ☐ Economici ☐ Consumi ☒ Altro

Gruppo: ☐ Agenziaeff ☐ SIER_test ☐ Test ☐ ENEA ☒ public

Sposta in:

Formula: **(c298/c297)*100**
Per inserire una formula, cliccare sull'icona.

INDICATORI ESISTENTI

Nome	Unità di misura	Descrizione	Gruppo	C
Consumo energia elettrica pro capite	Kwhattora pro capite	Consumo energia elettrica per popolazione residente	public	

Figura 7 – Riempimento del primo e del secondo campo della finestra CREA FORMULA e attivazione dell'indicatore.

GIRET

HOME OUTPUT DATA DATA ENTRY GESTIONE DB

Pagina corrente: Gestione Database » Editor Indicatori

Sezioni:

- Aggiungi Indicatore
- Elenco Indicatori esistenti

AGGIUNGI INDICATORE

Settore: **Residenziale**

Nome: **Rapporto di mascolinità**

Unità di Misura: **%**

Descrizione: **percentuale del rapporto maschi/femmine residenti**

Tipo: ☒ Dens./Intens. ☐ Struttura ☐ Economici ☐ Consumi ☒ Altro

Gruppo: ☐ Agenziaeff ☐ SIER_test ☐ Test ☐ ENEA ☒ public

Formula:
Per inserire una formula, cliccare sull'icona.

INDICATORI ESISTENTI

Nome	Unità di misura	Descrizione	Gruppo	C
Consumo energia elettrica pro capite	Kwhattora pro capite	Consumo energia elettrica per popolazione residente	public	
Indice demografico di dipendenza	%	Indice demografico di dipendenza: $(P<15 + P>64) / (P15-64) * 100$	public	
Indice di invecchiamento	%	Indice di invecchiamento $(P>64 / P<15) * 100$	ENEA	
N. medio componenti		Numero medio componenti nucleo familiare	public	
Rapporto di mascolinità	%	Rapporto di mascolinità: $(M / F) * 100$	public	
Rapporto di mascolinità	%	percentuale del rapporto maschi/femmine residenti	public	

Figura 8 – Disponibilità del nuovo indicatore.

Una volta riempiti i campi in cui si dichiara il nome dell'indicatore che si vuole creare, l'unità di misura, e una descrizione completa del significato dell'indicatore stesso, come mostrato nella Figura 6, cliccando sull'icona indicata dalla freccia nera di Figura 6, si aprirà una ulteriore finestra tramite la quale è possibile inserire la formula per il calcolo dell'indicatore ricercato, utilizzando i dati di base precedentemente caricati nel data base del sistema GIRET (Figura 7). Dopo avere riempito i campi è possibile attivare il nuovo indicatore che sarà disponibile per tutte le future elaborazioni e visualizzazioni come mostrato nella Figura 8.

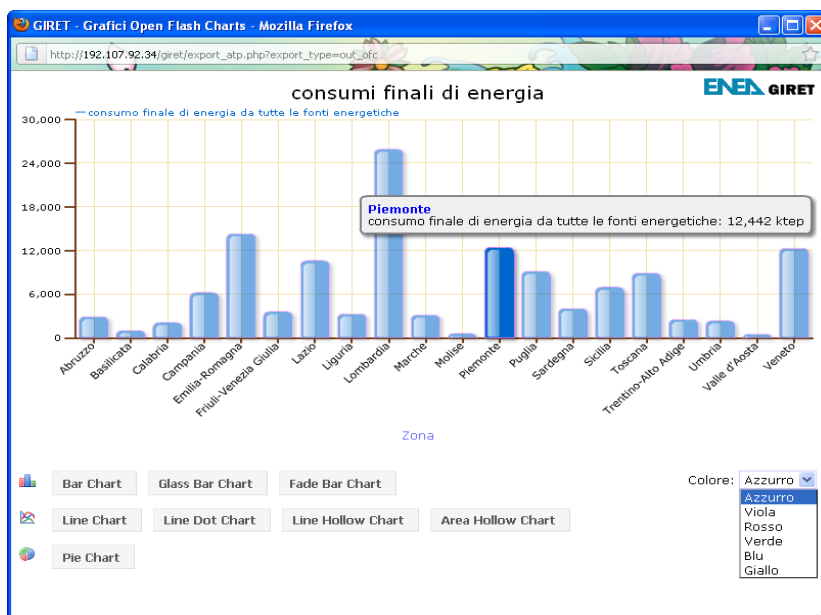


Figura 9 – Output grafici e loro personalizzazioni.

La rappresentazione cartografica dei dati

Come più volte ribadito, la caratteristica particolare del software GIRET consiste nel fatto che con GIRET è possibile visualizzare sia i dati di base, già presenti o caricati nel sistema, sia i dati (come ad esempio un nuovo indicatore) creati ad hoc nelle modalità appena viste. Tale rappresentazione può avvenire attraverso l'uso di carte tematiche che mostrano l'aspetto territoriale della distribuzione dei valori degli indicatori energetici e di quelli socio-economici che possono suggerire opportunità di confronto e di analisi.

La decisione di arricchire il software GIRET con un'innovativa forma di restituzione geografica dei dati, concorre alla definizione di un nuovo modo di intendere e di interpretare l'Informazione stessa. La componente geografica contenuta in una larga parte dei dati comunemente usati può trasformare tali dati in geo-informazione, un nuovo tipo di conoscenza legata al territorio ed alle sue dinamiche fisiche, ambientali, socio-economiche ecc.

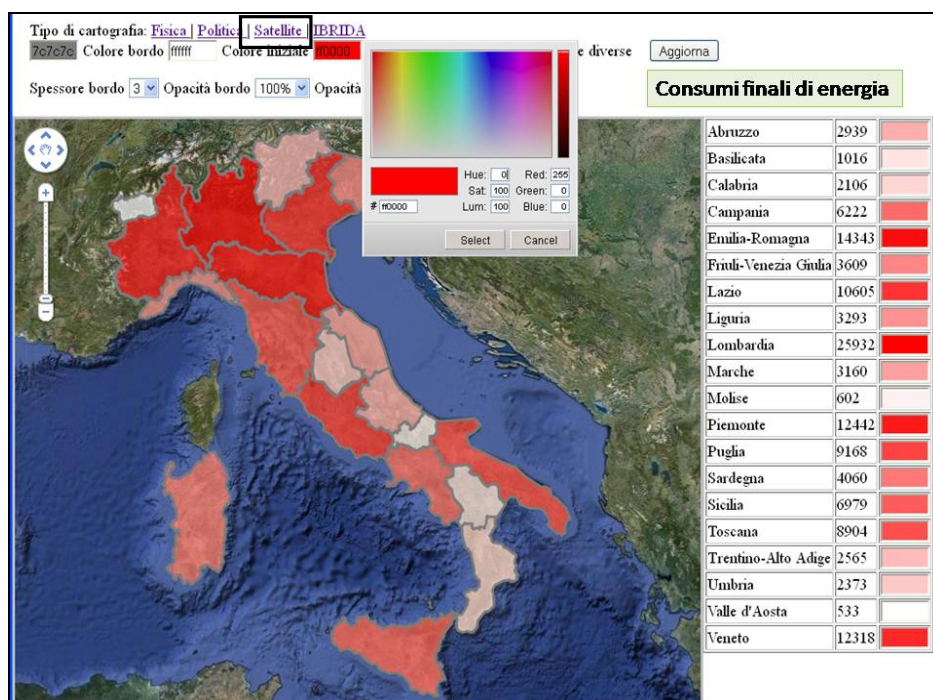


Figura 10 – Distribuzione territoriale del livello dei consumi finali di energia per regione, e personalizzazione della mappa tematica (modalità Satellite).

La Figura 10 mostra un esempio di rappresentazione di elaborazioni dei dati sul territorio.

La scala territoriale di rappresentazione del dato è molto importante non solo per gli ovvi motivi legati alla territorialità del valore del dato stesso, ma anche per il significato che il dato stesso è in grado di assumere.

Ad esempio, il confronto territoriale fra differenti regioni del dato: consumi di energia da tutte le fonti di energia rinnovabili, come mostrato in Figura 11, evidenzia, oltre alla vocazione regionale per questo tipo di installazioni e sfruttamento di energia, anche quanto sia importante la componente ambientale e come essa incida sulla possibilità di sfruttamento o meno delle fonti in oggetto. Anche la rappresentazione grafica del dato offre ulteriori spunti di analisi e di confronto (Figura 12) della vocazione regionale allo sfruttamento delle fonti di energia rinnovabili.

L'analisi di indicatori di realtà energetiche condotta con l'uso dello strumento GIS (Geographic Information System), introduce un interessante fattore geografico di ausilio per la definizione di nuove grandezze e nuovi indicatori legati al territorio su cui insistono. L'uso del GIS offre, infatti, un valore aggiunto insito nel carattere territoriale dello svolgimento dello studio. Il territorio diventa protagonista nella capacità, propria dello strumento GIS, di condurre correlazioni tra fattori di tipo energetico, socioeconomico e fattori antropici e ambientali.

Le funzioni offerte da GIRET consentono elaborazioni e correlazioni tra dati ed indicatori inseriti in un database costruito ad hoc, calibrato per fornire informazioni significative e specifiche, in relazione alle esigenze di analisi di ciascun utente. Lo strumento GIS di fatto consente di legare maggiormente al territorio i risultati delle elaborazioni effettuate all'interno di GIRET: il territorio diventa protagonista nella capacità, propria dello strumento GIS, di effettuare correlazioni tra fattori di tipo energetico, socioeconomico e fattori antropici e ambientali, evidenziando in tempo reale, attraverso la rappresentazione visiva le specificità di una o più aree territoriali

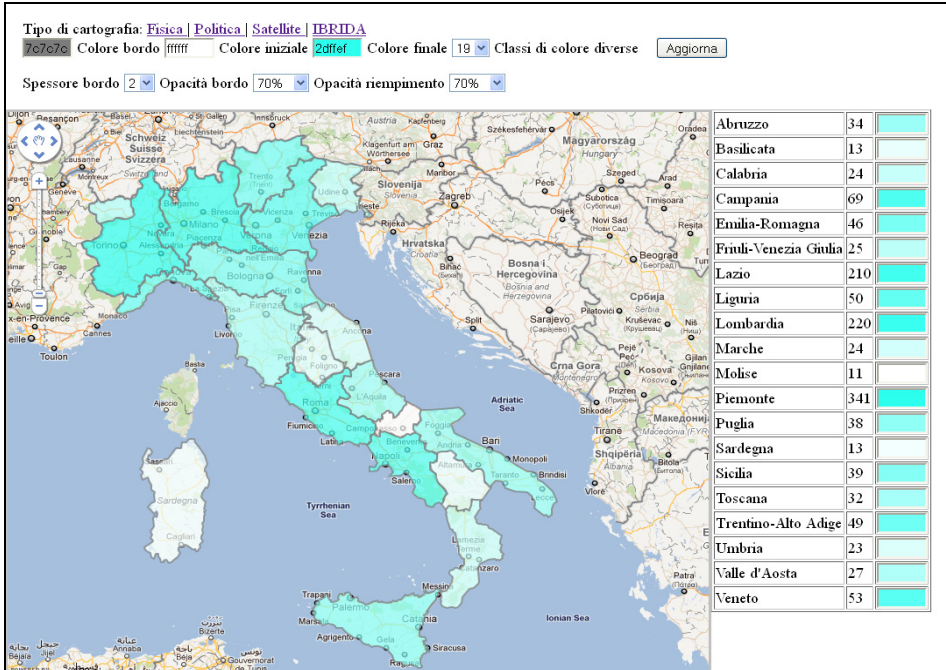


Figura 11 – Distribuzione territoriale del livello dei consumi finali di energia per regione, da fonti rinnovabili (modalità politica).

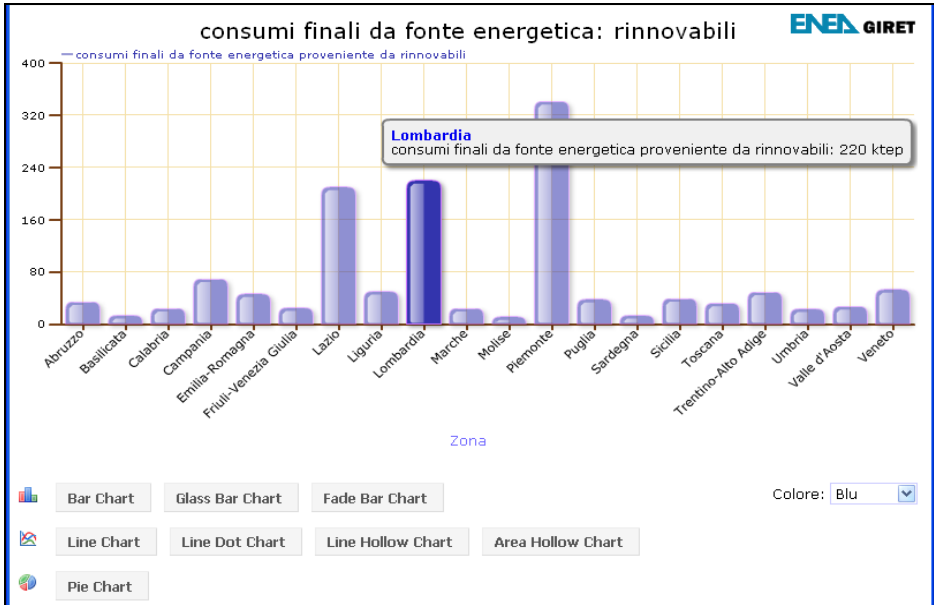


Figura 12 – Grafico della distribuzione dei consumi finali di energia per regione, da fonti rinnovabili.

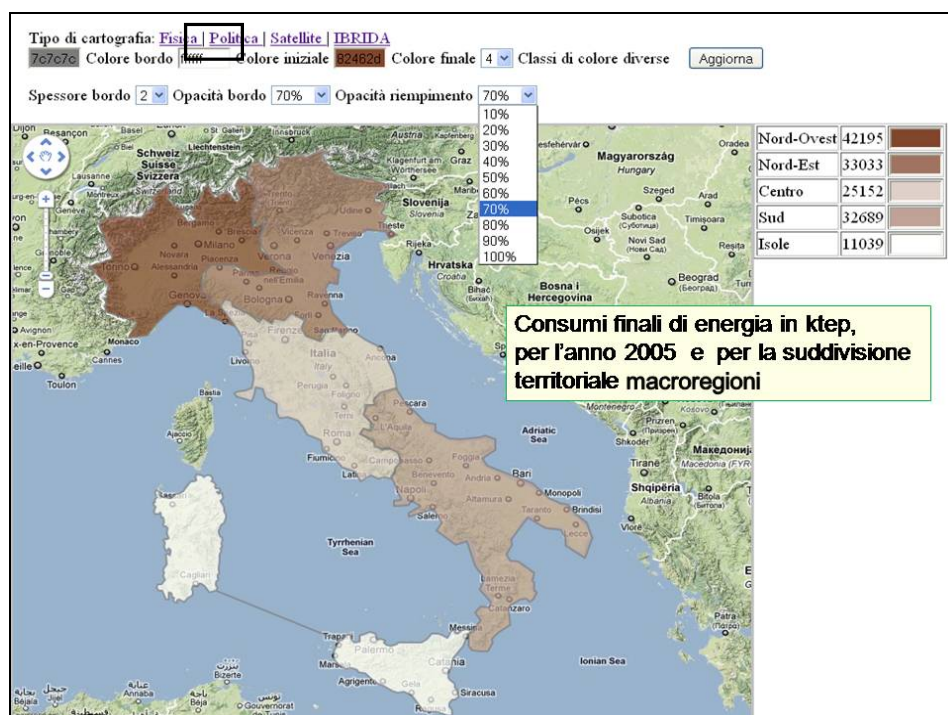


Figura 13 – Distribuzione territoriale dei consumi finali di energia per macro regioni (modalità Fisica).

Note tecniche e strumenti software

Il software GIRET non necessita di particolari software per la sua installazione e per un suo utilizzo in quanto interamente sviluppato con prodotti open source e freeware (Figura 14).

Si sottolinea la natura user friendly del prodotto che consente ad utenti, anche non esperti di informatica, di gestire autonomamente i dati, gli indicatori e le relative attività di analisi.

Implementazioni previste

E' prevista l'implementazione della struttura portante di gestione dei dati a risoluzione provinciale e comunale già prevista in fase di realizzazione del software GIRET. La possibilità di elaborare e gestire indicatori anche a livello sub-regionale, consentirà di sfruttare appieno le potenzialità dello strumento cartografico (GIS), allargando il bacino di utenza che potrebbe essere interessato all'utilizzo del software stesso.

Nell'ambito della rappresentazione dei dati dal punto di vista territoriale, oltre alle già implementate personalizzazioni, alcune delle quali mostrate nelle figure 10, 11, 13, si prevede di arricchire le funzioni già attivate in GoogleMap, con una serie di funzioni caratteristiche del GIS. Ciò renderà possibile aggiungere alla restituzione finale del dato energetico, coperture tematiche come: la rete stradale, la rete idrografica, i laghi, le ferrovie, i capoluoghi ecc., ma renderà soprattutto possibile la visualizzazione contestuale di dati socio-economici, ambientali, territoriali.

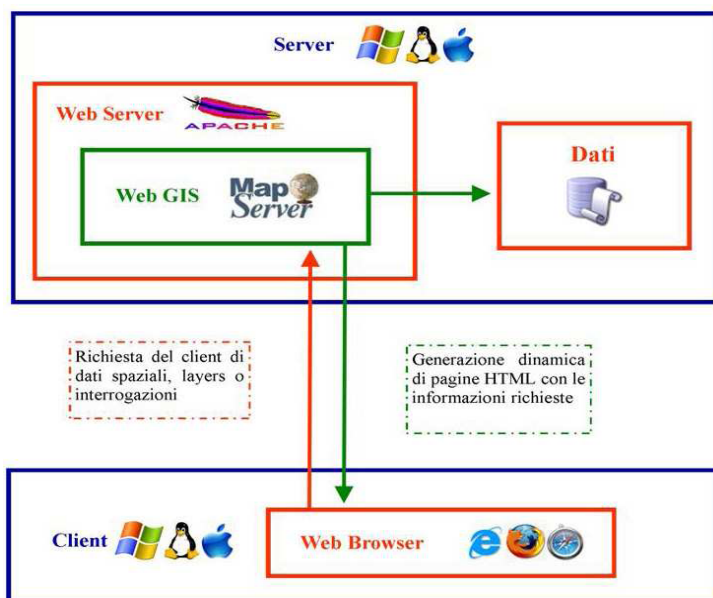


Figura 14 – Strumenti software.

Bibliografia

- Biallo G., *Introduzione ai Sistemi Informativi Geografici*, MondoGIS, 2005
Brail R., Klosterman R., *Planning Support System*, ESRI Press, 2001
Bukley A., Gahegan M., Clarke K., *Geographic Visualization: Emerging Themes in GIScience Research*, University Consortium for Geographic Information Science, 2000
Burrough P., Craglia M., Masser I., Rhind D., "Decision makers' perspectives on European geographic information", *Transactions in GIS*, vol. 1, n. 1, 1997
Neteler M., Mitasova H., *Open Source GIS. A GRASS GIS Approach*, Springer, 2008
Yoshida S., Sadohara S., *GIS Database for Environmental and Energy System Planning in Tokyo*, Proc. ESRI User Conference, 2004

Map Server web site: <http://mapserver.org>
<http://www.opengis.org>: OPEN GIS Consortium
QuantumGIS web site: <http://www.qgis.org>

La gestione del dato in BRISEIDE: analisi, acquisizione e pubblicazione

Simone Caldon, Luca Maroni

Reggiani S.p.A., Via Rovera, 40, 21026 Gavirate (VA)
simone.caldon@reggiani.it, luca.maroni@reggiani.it

BRISEIDE è un progetto co-finanziato dall'Unione Europea attraverso il programma ICT-PSP nel settore del Sistema dell'Informazione Geografica (GIS).

Obiettivo di BRISEIDE è di estendere i modelli di dati geografici sviluppati nell'ambito di altri progetti finanziati e nel contesto della direttiva comunitaria INSPIRE, includendo gli aspetti spazio-temporali che, con poche eccezioni, non sono contemplati dalle linee guida sui dati geografici oggi disponibili, o dalle norme in essere. Il progetto sta sviluppando diverse applicazioni basate sull'integrazione delle banche dati e dei servizi esistenti e di servizi aggiuntivi per la gestione, il processamento, l'analisi e la visualizzazione interattiva spazio-temporale dei dati.

BRISEIDE sarà applicato, testato e validato nel contesto di diversi casi d'uso in scenari di protezione civile e gestione del territorio. La fase pilota operativa coinvolgerà molti fornitori di dati a livello europeo, partner tecnologici, e utilizzatori finali con una base dati molto importante.

Tra le attività già svolte nell'ambito del progetto vi è la fase di raccolta, analisi e pubblicazione dei dati e dei servizi esistenti messi a disposizione dai vari partner allo scopo di ottenere un'immediata visione operativa sui dati in oggetto. Formati esistenti, volume complessivo dei dati, criteri di protezione dei dati sensibili e ed armonizzazione del dato sono alcuni dei fattori da considerare e pianificare attentamente.

Lo scopo di questo paper è descrivere l'esperienza maturata nella gestione dei dati in BRISEIDE per fornire linee guida e considerazione utili nella gestione di una base dati importante ed eterogenea.

Gli aspetti trattati saranno:

- Indagine dei dati e servizi esistenti.
- Linee guida per la raccolta dati.
- Architettura della piattaforma per la gestione dati.
- Verifica dei dati raccolti.
- Analisi e acquisizione del dato grezzo.
- Processo di armonizzazione.
- Pubblicazione attraverso servizi standard.
- Verifica dei dati esposti.
- Ottimizzazione delle prestazioni.

Abstract in English

BRISEIDE is an ICT Policy Support Programme project within EU. It involves 15 EU partners on the development of spatio-temporal web processes for geospatial application.

BRISEIDE aims at delivering:

1.time-aware extension of data models developed in the context of previous/on-going EU INSPIRE related projects (e.g. in the context of GMES, eContentPlus);

2.application (e.g.Civil Protection) based on the integration of existing, user operational information;

3.value added services for spatio-temporal data management, authoring, processing, analysis and interactive visualization.

BRISEIDE will be applied, tested and validated within a Civil Protection application context, using the INSPIRE relevant themes, via a chain of stakeholders, data providers, technology partners, and downstream users. The Pilot operational phase will last 12 months and will consider real life events, with extensions in additional domains, being considered and assessed.

One of the first activities carried out within the project was the data collection. To have an operative and concrete view on available data, a key task is the analysis and exposure of available data and existing services through OGC standard services. Data format and size, harmonization of data and authorization to protect sensible data are all factors to be analyzed and planned in a proper way.

The topics covered in this paper will be:

- data and existing services survey
- guideline for data collection
- infrastructure for data management
- data analysis
- data harmonization
- OGC standard services exposure
- data testing
- optimization.

Indagine dei dati e servizi esistenti

Briseide è un progetto Europeo gestito da un consorzio costituito da 14 partner, validato in 10 scenari di protezione civile e gestione del territorio reali. La base dati e servizi esistenti messi a disposizione devono essere attentamente analizzati al fine di predisporre un preciso ed efficace ciclo di raccolta, controllo e pubblicazione del dato. I dati vengono forniti da molteplici attori, con formati ed esigenze diverse.

È stato distribuito un questionario a tutti i partner del progetto per catalogare i dati e servizi esistenti:

1. Vector data
2. Raster data
3. Alphanumeric data
4. Services

Per ogni dataset disponibile le informazioni richieste sono state:

- Dataset name
- Description
- Format (VECTOR: shp, Arcinfo Coverage, dgn, Mapinfo, gml, Kml, PostGis, ArcSDE, Oracle, SQLserver, other; RASTER: jpg, ECW, tiff, Png, grid; ALPHANUMERIC: XML, Excel (xls)m Formatted text (Txt, csv), PostGres, Oracle, SQL server, DB Access, Other)
- Storage (file system, DB, Web services, other)
- Protocol Access (http, ftp, odbc, WMS, WFS, WCS, SOS)
- Data URL
- Use (Public, Private, Private for partners)
- CRS
- Scale

- Attributes
- Temporal Properties (Geometry change during time, Attributes change during time, Data continuously update (new features added), Result from spatio-temporal analysis, Time series, Geometry and attributes change during time, other)
- Language
- Metadata
- Metadata Standard
- Metadata URL
- Owner

Per i servizi le informazioni richieste sono state:

- Service name
- Description
- OGC-ws
- Use
- XML messaging
- Programming language
- Url
- Metadata
- Metadata Standard
- Metadata URL

Le informazioni raccolte sono state aggregate in un documento riassuntivo condiviso con i vari partner. È stato così possibile avere un quadro preciso della quantità di dati da trattare al fine di pianificare le risorse necessarie per la loro gestione.

Linee guida per la raccolta dati

Con un quadro chiaro dei dati e servizi disponibili all'interno del progetto è stato possibile definire una procedura condivisa per ottimizzare la raccolta e la gestione dei dati /metadati.

E' stata sviluppata una guida per illustrare ai partner del consorzio le modalità di raccolta dati e gli strumenti disponibili per la validazione/creazione di metadati compatibili, in un primo momento, con il modello INSPIRE e successivamente con il modello proposta da BRISEIDE.

Nel dettaglio:

- come caricare i dati in un area FTP condivisa e protetta da password
- formati compatibili che possono essere utilizzati per la condivisione dei dati
- caratteristiche dei metadati da produrre
- tool disponibili per la validazione e la creazione dei metadati
 - MDweb
 - CatMDEdit
 - INSPIRE
 - GeoNetwork
 - MIG
 - Preludio

Grazie a questo strumento è stato possibile standardizzare la modalità di raccolta dei dati e semplificare il lavoro di analisi, correzione e pubblicazione dati.

VECTOR	NOTE
ArcView SHP	.prj file is mandatory
Access GeoMedia Warehouse (.mdb)	no ESRI geodatabase
RASTER	NOTE
TIFF + TFW	zipped if heavy. Coordinate Reference System is mandatory
GeoTIFF	zipped if heavy. Coordinate Reference System is mandatory
ECW	zipped if heavy. Coordinate Reference System is mandatory
ALPHANUMERIC	NOTE
CSV (comma or character separated values)	PLAIN TXT format is preferred. Check carefully lat/long column format (decimal position). Coordinate Reference System is mandatory
GRID	NOTE
ASCII .ASC (ArcGRID)	zipped if heavy. Coordinate Reference System is mandatory
XYZ	zipped if heavy. Coordinate Reference System is mandatory
METADATA	NOTE
	Metadata of the real DATA. NO Services metadata.
XML file / URL ref	ISO 19115 INSPIRE compliant
OTHER INFO	NOTE
Thematic information for maps	For each layer please provide info like: Proper scale visualization value Map styling (e.g colour based on attribute values) Additional "Wished" Layer (e.g Filtered by, Geometric Intersection)
Time parameter specification	In case of separate datasets (e.g 3 datasets which 1 shp per year) give guidelines to identify: common data schema (if attribute schema is different between the shapes) timestamp (format e.g yyyy-mm-dd, how to build it if not exist)

Tabella 1 – Esempio di formati compatibili per la raccolta dati.

Architettura della piattaforma per la gestione dati

Al fine di supportare le fasi iniziali degli sviluppi software e per mettere i partner in condizione di verificare la correttezza dei dati raccolti è stata configurata una piattaforma SDI (Service Data Infrastructure) così composta:

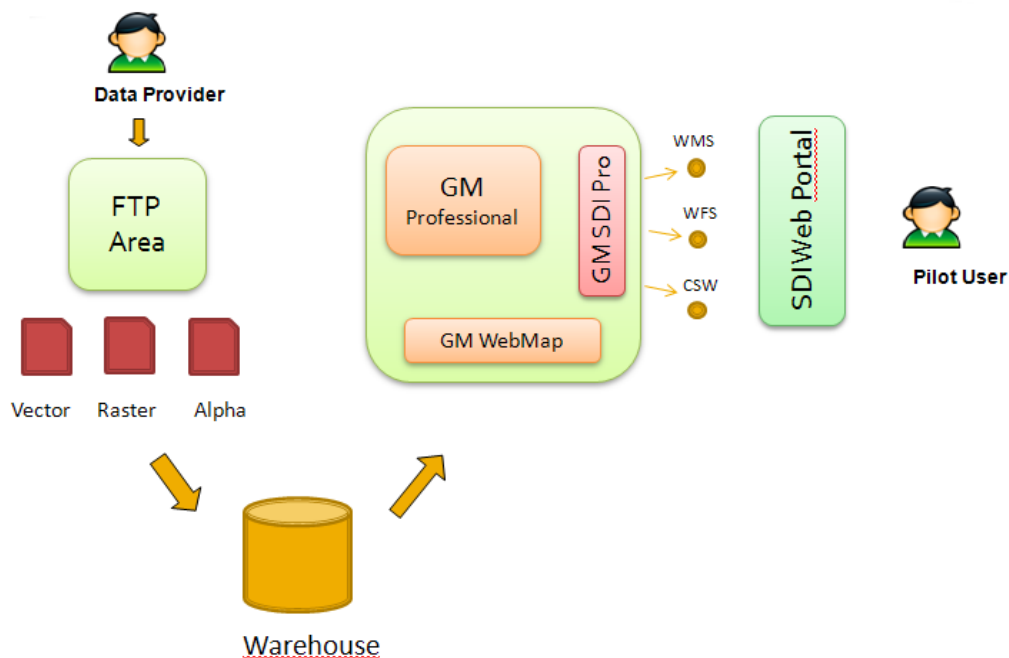


Figura 1 – Architettura piattaforma per la gestione dei dati.

L'architettura prevede le seguenti componenti:

- **Area FTP:** E' stato creato un ambiente con autenticazione dedicata per ciascun pilot, definendo una struttura directory base in grado di mantenere una raccolta ordinata dei file:

```

PILOT-NAME/
/ALPHANUMERIC-DATA
    /DB
    /XML
/RASTER-DATA
    /DataSet1
/VECTOR-DATA
    /DataSet1
    
```

- **Warehouse:** I dati nei formati originali sono stati importati in un database con estensioni geo-spaziali (Oracle). La conversione è stata realizzata con Intergraph Geomedia Fusion, definendo mapping tra gli attributi dei dati originali e i campi delle tabelle per i dati spaziali. Sono state, inoltre, applicate trasformazioni come ad esempio la creazione di nuovi campi per definire il timestamp del dato e l'accorpamento di più versioni temporali in un'unica struttura

- **Componenti SDI Server-side:** I dati importati sono stati verificati con un desktop GIS (GeoMedia Professional) e pubblicati come servizi OGC standard (WMS/WFS/WCS e CSW) tramite GeoMedia WebMap con estensioni SDI Pro
- **SDI Client:** E' stato configurato un portale web con profilo di autenticazione dedicato per ogni pilot al fine di facilitare la visualizzazione e verifica dei dati.

I riferimenti per poter accedere ai servizi esposti sono stati diffusi attraverso uno documento condiviso avente il seguente schema:

- **Dataset ID:** codice univoco del dataset
- **Service:** modalità di esposizione del dato
- **End Point:** URL di accesso al servizio
- **EPSG:** sistema di coordinate utilizzato

PILOT			
Dataset Id	Service	End Point	EPSG
VD1	WMS	http://host/serviceEndpoint1	EPSG:4326, EPSG:2100, EPSG:3785
VD2	WFS	http://host/serviceEndpoint2	EPSG:4326, EPSG:2100, EPSG:3785

Tabella 2 – Esempio elenco servizi esposti.

Sono stati inoltre configurati strumenti per il monitoring delle performance e log di accessi che hanno fornito utili indicazioni sull'utilizzo dei servizi per l'ottimizzazione delle prestazioni.

Verifica dei dati raccolti

Per la raccolta dati sono state definite delle scadenze diverse per ogni categoria di dato:

1. Vector data
2. Raster data
3. Alphanumeric data

Il lavoro di raccolta è stato monitorato mettendo a disposizione di tutti i partner un documento condiviso e accessibile tramite web. Il documento contiene l'elenco dei dataset disponibili divisi per pilot. Per ogni dataset è stato indicato:

- Nome dataset
- Descrizione del dataset
- Se la richiesta del dataset è stata inoltrata al fornitore del dato
- Se il dato è stato fornito
- Se il metadato associato è stato fornito
- Note generiche

DATASETS	Usage	Data Collection			
		Data requested	Data available	Metadata available	Note
Dataset 1 Dataset description	Public	Yes	Yes	Yes	EPSG:32633
Dataset 2 Dataset description	Public for partners	Yes	Yes	No	EPSG:32632
Dataset 3 Dataset description	Private	Yes	No	No	Not yet available

Tabella 3 – Esempio datasheet raccolta dati.

In una tabella riassuntiva è stata evidenziata la percentuale di dati forniti per poter monitorare costantemente l'andamento della raccolta dati.

Data provider	Vector data	Raster data	Alphanumeric data	Metadata	Note
DP 1	5/9	0/1	4/5	8/14	
DP 2	10/11	38/38	7/7	50/56	new alphanumeric data has been provided but not yet checked.
DP 3	6/6	$\frac{3}{4}$	0/5	4/15	
DP 4	1/10	1/37	0/6	1/53	
DP 5	10/10	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	11/14	
DP 6	20/21	3/3	1/3	0/22	
DP 7	14/14	6/6	6/6	20/26	2 metadata are not ISO valid.
DP 8	1/2	$\frac{1}{2}$	0/0	3/5	3 metadata provided are not ISO valid
DP 9	5/6	0/2	0/2	0/5	
ALL	72/89	53/95	19/36	95/210	
	82%	56%	53%	45,23%	

Tabella 4 – Report raccolta dati.

Analisi e acquisizione del dato grezzo

Per ogni dataset messo a disposizione è stato applicato il seguente flusso di acquisizione:

1. Accesso del dato su Area FTP
2. Controllo delle caratteristiche del dato con quanto dichiarato nell'indagine iniziale
3. Controllo preliminare sulla corretta visualizzazione/sovrapposizione del dataset mediante applicativo GIS
4. Acquisizione e trasformazione del dato nel database geospaziale

5. Creazione di una tematizzazione base per la pubblicazione del dato
6. Pubblicazione del dato attraverso servizi OGC standard e profilazione delle autorizzazioni
7. Acquisizione dei metadati associato al dato nel database di catalogo
8. Configurazione del workspace dedicato sul portale web

Partendo da una situazione eterogenea e dovendo gestire una quantità considerevole di dati provenienti da fornitori di dati diversi sono emerse problematiche che possono essere riassunte nelle seguenti categorie:

- Layer “corposi” (>10000 feature)
- Attributi delle feature class equivalenti a parole riservate nel database
- Anomalie nelle geometrie (Kickbacks, Duplicate points, Loops)
- Attributi con descrizioni UNICODE
- Data temporale e timestamp da ricostruire in quanto espressi su più campi
- Caratteri di separatore decimale e campo non eterogenei (nel caso di tabelle CSV)
- Identificatori di metadato non univoci

Processo di armonizzazione

Conclusa la fase di raccolta e analisi dei dati grezzi si è reso necessario iniziare una fase di armonizzazione del dato. Tutti i dataset forniti sono stati adattati per aderire ai requisiti del progetto:

- Formato del dato
- Correzione delle geometrie e ottimizzazioni dei dati
- Estensione del dato con la variabile temporale dove necessario
- Estensione del metadato per aderire al nuovo modello proposto da Briseide

Per ogni dataset è stata compilata una scheda di dettaglio al fine di tenere traccia delle operazioni eseguite per l'armonizzazione del dato, così composta:

- Descrizione delle caratteristiche del dataset
- Operazioni eseguite per eseguire l'armonizzazione del dato e del metadato
- Tools usati durante l'armonizzazione
- Feedback/commenti relativi alle operazioni di armonizzazione

I dati armonizzati sono stati poi collezionati seguendo la stessa procedura usata per la raccolta del dato grezzo:

- Upload dei dati sull'area FTP
- Monitoraggio della fase di raccolta utilizzando un documento condiviso e accessibile dai vari fornitori di dati

Pubblicazione attraverso servizi standard

La pubblicazione è stata realizzata tramite la configurazione di servizi GeoMedia SDI Pro abilitando dove necessario un profilo di autenticazione dedicato. La pubblicazione ha seguito in generale il seguente approccio:

Tipo di dato	Servizio	CRS
Vector	WMS, WFS	EPSG:4326 e CRS nativo
Raster (GeoTIFF)	WMS, WCS	EPSG:4326 e CRS nativo
Raster (ASCII)	WMS, WCS	EPSG:4326 e CRS nativo
Alphanumeric (CSV, TXT)	WMS, WFS	EPSG:4326 e CRS nativo

Tabella 5 – Esposizione dati.

Nei casi in cui il dato presentava caratteristiche temporali è stato configurato un servizio WMS in grado di servire una versione del dato corrispondente al parametro temporale specificato (parametro TIME).

Verifica dei dati esposti

Nella fase iniziale del progetto è stata utilizzata una soluzione commerciale (Intergraph SDI Suite), che ha permesso una rapida configurazione di un'infrastruttura SDI completa per la raccolta e verifica dei dati:

- Tutti i dati sono stati esposti con servizi standard OGC (WMS, WFS, WCS)
- È stato implementato un servizio di catalogo (CSW)
- I servizi esposti sono protetti e accessibili tramite autenticazione
- È stato implementato un portale web per permettere ai partner di accedere ai dati e verificarli

Con questi strumenti ogni data provider ha potuto accedere ai propri dati per verificarne la correttezza. Per gestire al meglio la fase di test è stata definita una procedura condivisa da tutti i partner con sessioni di test registrate su formato multimediale.

E' stato definito il seguente modello per il piano di test:

No: codice univoco per identificare il test.

REQ. ID: codici univoci dei requisiti funzionali identificati nel fase di analisi del progetto

TEST DESCRIPTION: descrizione del test da eseguire

INPUT DATA: dati richiesti per l'esecuzione del test

TEST STEPS: descrizione delle azioni da eseguire per completare il test (lista analitica)

PANEL: immagine relative al test

EXPECTED RESULT: descrizione del risultato atteso

TEST RESULT: risultato del test (OK/KO)

COMMENTS: commenti utili da inoltrare al team di sviluppo riguardo a problemi emersi durante il test

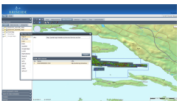
No	Pilot FUN. REQ. ID	REQ. ID	TEST DESCRIPTION	INPUT DATA	TIME RESPONSE	TEST STEPS	PANEL	EXPECTED RESULT	TEST RESULT OK/KO	COMMENTS
CAT.TEST.01	NaN	CAT.GEN.01	Implement Catalogue Services.	None	1sec	<ul style="list-style-type: none"> Open Geoportal Geofoto workspace Click on "Data Sources" Click on "New Data Source" To the left side of the Panel that is appeared select "CSW" To the bottom side on the Panel select the appropriate Public Data Source "INGR BRISEIDE CSW" Click on "Register" Click on "Show data sources" and check if CSW is activated 		Implement correctly a Catalog Service	OK	NaN
CAT.TEST.02	NaN	CAT.FUN.01	Return a list of identifiers for corresponding features for a request expressed in an OGC query language (CSW Discovery.GetRecords).	RD15-IGN	5sec	<ul style="list-style-type: none"> Open Geoportal Geofoto workspace Click on "Search for data (metadata)" On "Search criteria" request for "IGN" Index of Ignition Click "Search" On "Metadata Results", click on "IGN" On "Metadata Information", view "File Identifier" 		View the File Identifier of IGN	OK	NaN

Figura 2 – Esempio di test plan.

I test sono stati eseguiti in connessione remota. I partner coinvolti, insieme ai team di sviluppo, hanno partecipato in teleconferenza. Il desktop della persona che ha eseguito il test è stato condiviso per permettere a tutti di assistere allo svolgimento in tempo reale. La persona che ha eseguito il test ha descritto e illustrato ai partecipanti le azioni eseguite e le eventuali impressioni positive/negative emerse.

Tutti i test sono stati condivisi attraverso il canale YouTube del progetto:
<http://www.youtube.com/user/BriseideEU#p/c/5EC22571286749DB>

Alla fine di ogni test il documento contenente il test plan è stato aggiornato con i risultati ottenuti ed è stato inoltrato ai team di sviluppo per la correzione dei problemi riscontrati.

Ottimizzazione delle prestazioni

Nella prima fase del progetto il sistema è stato utilizzato in configurazione standard, dove l'accesso ai dati era effettuato mediante una connessione diretta al database geospaziale Oracle.

A seguito dei primi accessi da parte degli utenti, analizzando strumenti di log ed indicatori di performance è stata rilevata la necessità di ottimizzare il caricamento dei servizi. Si è quindi scelto di introdurre una base dati ottimizzata per la pubblicazione in grado di garantire tempi di risposta rapidi a fronte della crescita della dimensione dati complessiva.

E' stato inoltre configurato uno script di "polling" sui servizi per mantenere le risorse di sistema allocate ed in grado di servire tempestivamente le richieste.

Metadati, Dati, Servizi: un approccio integrato per esporre il proprio mondo secondo le regole INSPIRE

Gianni Campanile

Esri Italia, Via Tiburtina 755, 00159 Roma, Tel. 06406961, gcampanile@esriitalia.it

Riassunto

Molte realtà si pongono il problema di come esporre il proprio „mondo“ secondo le regole INSPIRE. Fra le varie soluzioni proposte alcune sembrano considerare ormai i metadati da tralasciare, si concentrano sui dati e considerano i servizi come „futuro“. Questo approccio „a scatole chiuse“ non è congruente con il progetto INSPIRE, che è un disegno unico le cui specifiche, se pure pubblicate in tempi diversi, costituiscono un tutt'unico e sono strettamente interconnesse (cfr. [1], [2] e [3]). In questo articolo viene descritto l'approccio di Esri che consiste nel fornire un percorso guidato che, a partire dai dati dell'utente, attraverso una trasformazione ETL (Extract-Transform-Load) e una serie di componenti software permette di avere dati, metadati e servizi compatibili con le specifiche INSPIRE Annex I e II.

Abstract

Many companies and public authorities are facing the challenge to “expose” their information “world” according to INSPIRE rules. Some of the available solutions tend to consider the metadata theme as finalised, they concentrate on data provision and leave network services for “the future”. This “isolated” approach is not well suited for INSPIRE which is an overall design and where implementation rules are strictly interconnected (see [1], [2] e [3]) and are to be considered as a whole. In this paper the Esri integrated approach will be presented: a guided workflow which, starting from user's data, uses an ETL (Extract-Transform-Load) transformation and some software components to build metadata, data and services fully compatible with INSPIRE specifications relative to Annex I e II.

Riferimenti

1. INSPIRE Metadata: <http://inspire.jrc.ec.europa.eu/index.cfm/pageid/101>
2. INSPIRE Data specifications: <http://inspire.jrc.ec.europa.eu/index.cfm/pageid/2>
3. INSPIRE Network services: <http://inspire.jrc.ec.europa.eu/index.cfm/pageid/5>

Keywords

Metadati, Dati, servizi, INSPIRE, standard, catalogo, geoportale, ETL.

1 Introduzione

La direttiva INSPIRE è da tempo nella fase di implementazione. Come è noto, le prime scadenze sono relative alla fornitura dei metadati di dati e servizi relativi ai temi dell'Annex I e II.

In questi ultimi anni quindi tutti gli sforzi sono stati concentrati principalmente sui metadati, armonizzando le regole INSPIRE con normative nazionali e creando prodotti in grado di assistere gli utenti nella creazione di nuovi metadati o nella trasformazione da standard diversi. Le prossime scadenze della direttiva riguardano la fornitura di servizi, come evidenziato in Figura 1:

Implementation		
Milestone date	Article	Description
15-May-2010	21§1 21§2	Implementation of provisions for monitoring and reporting
03-Dec-2010	6(a)	Metadata available for spatial data sets and services corresponding to Annex I and II
09-May-2011	16	Member States shall provide the Discovery and View Services with initial operating capability
30-Jun-2011	15	The EC establishes and runs a geo-portal at Community level
19-Oct-2011	17(8)	Implementation of Regulation as regards the access to spatial data sets and services of the Member States by Community institutions and bodies under harmonised conditions for new arrangements
09-Nov-2011	16	Discovery and view services operational
28-Jun-2012	16	Member States shall provide the Transformation Services with initial operating capability
28-Jun-2012	16	Member States shall provide the Download Services with initial operating capability
23-Nov-2012	7§3, 9(a)	Implementation of Commission Regulation (EU) No 1089/2010 of 23 November 2010 implementing Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council as regards interoperability of spatial data sets and services for Newly collected and extensively restructured Annex I spatial data sets available
28-Dec-2012	16	Download services operational
28-Dec-2012	16	Transformation services operational
---		Implementation of Commission Regulation (EU) No 102/2011 of 4 February 2011 amending Regulation (EU) No 1089/2010 implementing Directive

Figura 1 – Prossime scadenze di INSPIRE.

E' ovvio che l'attenzione sia degli utenti che degli sviluppatori è ora rivolta a fornire strumenti adatti al rispetto delle scadenze previste, in modo analogo a quanto fatto per i metadati, ma nella maggior parte dei casi sembra che questo secondo passo venga percepito come scollegato dal primo, come se fosse stato ormai superato un ostacolo ormai da dimenticare. Uno dei grandi meriti di INSPIRE è invece quello di essere un disegno coerente, concepito sin dall'inizio come un percorso che, seppure adattato ad una scala temporale, concettualmente riguarda elementi interconnessi e interoperanti. In questo articolo viene presentato l'approccio integrato ad INSPIRE proposto da Esri, che consente di trasformare e pubblicare i propri dati secondo quanto richiesto da INSPIRE.

2 Un approccio integrato

Come si vede dalla seguente **Figura 2**, la direttiva si compone di diversi elementi:

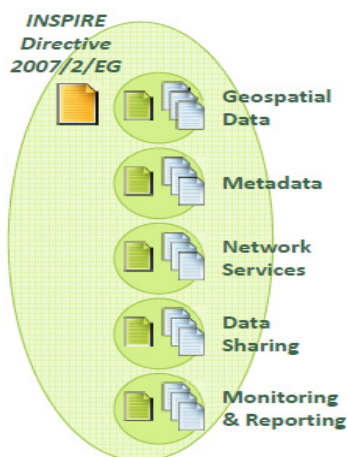


Figura 2 – Elementi della direttiva INSPIRE.

In questa immagine però non si coglie appieno l'interconnessione fra i vari elementi. Lo scopo della direttiva è estremamente pratico ed è pienamente espresso nella descrizione della direttiva stessa:

....

The INSPIRE directive aims to create a European Union (EU) spatial data infrastructure. This will enable the sharing of environmental spatial information among public sector organisations and better facilitate public access to spatial information across Europe

....

Le parole chiave sono quindi *infrastruttura* e *condivisione* dell'informazione spaziale fra vari settori pubblici. Il fatto che tale informazione sia focalizzata sull'ambiente è importante ma non influisce sulle scelte tecniche o implementative.

La condivisione implica quindi che ci sia un accesso da parte di soggetti eterogenei a risorse di interesse; questo a sua volta presuppone che siano disponibili alcune operazioni fondamentali:

1. conoscere di quali risorse si tratta e a quali condizioni sono accessibili/utilizzabili;
2. ottenere le risorse secondo le capacità e limitazioni definite

Queste operazioni, necessarie per qualunque realtà operativa, sono esattamente quello che INSPIRE richiede, come è evidente dalla seguente figura:

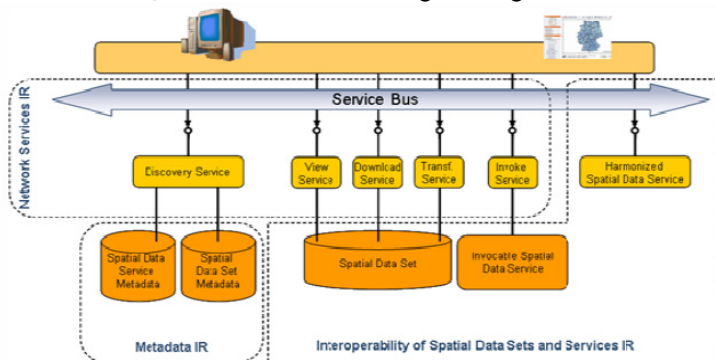


Figura 3 – Servizi dell'infrastruttura INSPIRE.

Infatti attraverso i metadati e i rispettivi servizi di *Discovery* possiamo avere informazioni sulle risorse, sulla loro disponibilità, qualità e vincoli di accesso/uso; attraverso i servizi di *View*, *Download*, *Transformation* e *Invoke* possiamo ottenere le risorse o utilizzarle secondo la loro disponibilità. Non è quindi sufficiente implementare una soluzione parziale senza avere un percorso per il disegno globale. Se ci si concentra sulle scadenze imposte dalla direttiva, si vede infatti che in alcuni casi esistono delle differenze significative di date tra la fornitura di servizi e dei dati relativi:

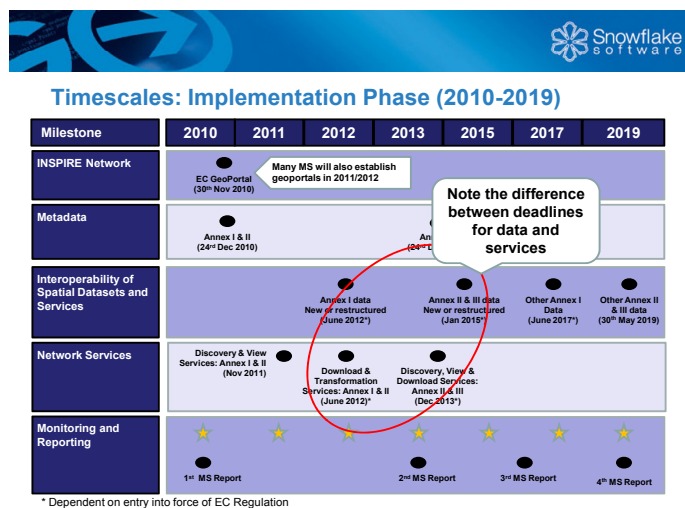


Figura 4 – Scadenze INSPIRE¹.

Nel prossimo capitolo vedremo come l'approccio definito da Esri sia conforme a questa visione complessiva di INSPIRE.

3 Dal proprio mondo ad INSPIRE

E' probabile che se un'organizzazione dovesse iniziare ora l'implementazione di un'infrastruttura di dati spaziali seguirebbe in parte o completamente le specifiche INSPIRE. Diverso e più complesso è però il caso in cui un'infrastruttura preesistente debba convertire il proprio sistema per adeguarsi alle specifiche della direttiva.

Si tratta infatti di modificare metadati, dati e servizi sui quali possono essere stati sviluppati nel tempo molte altre applicazioni, quali siti web o applicazioni specifiche.

Questa situazione è considerata in INSPIRE, che infatti non chiede né di produrre nuovi metadati né di convertire il proprio sistema, ma solo di *fornire* le informazioni rilevanti ai fini degli Annex I, II e III nel formato e nelle modalità richieste.

Alcune soluzioni proposte consistono di strumenti che permettono la conversione dei propri dati in un modello INSPIRE, ma non risolvono altri problemi quali la creazione di servizi appositi, la disponibilità di un catalogo di metadati oppure la creazione dei servizi richiesti. Altre soluzioni partono da un modello dati già compatibile con INSPIRE e permettono la gestione dei metadati e dei servizi, ma lasciano all'utente il compito di trasformare i propri dati nel formato richiesto.

¹ Slide tratta dalla presentazione [INSPIRE Essentials Back 2 Basics](#) di Debbie Wilson alla conferenza INSPIRE Edinburgh 2011

L'approccio di Esri consiste invece in dei workflow che, attraverso diverse azioni e strumenti di supporto fornisca un modello dati, servizi e metadati come richiesti da INSPIRE. Il workflow per i servizi di discovery è mostrato nella seguente figura:

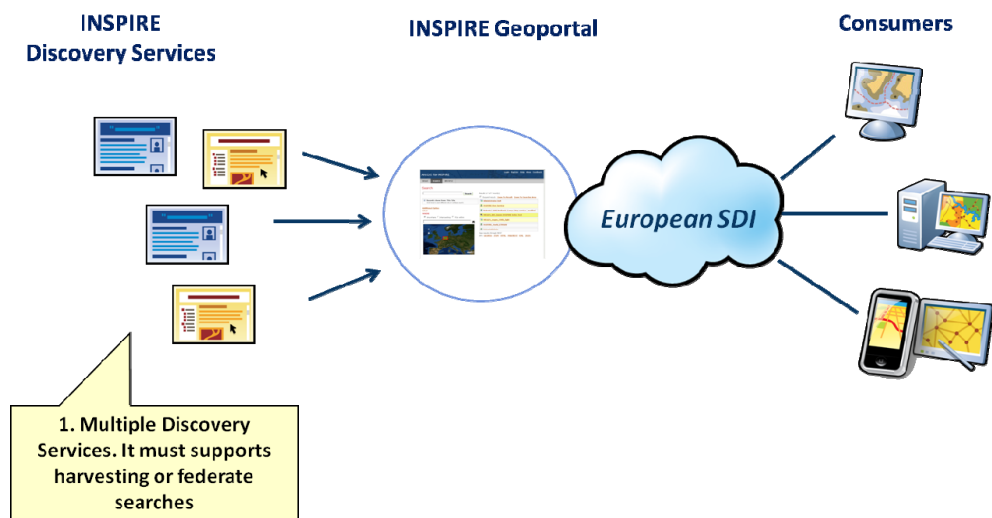


Figura 5 – Workflow per i servizi di Discovery.

E quello per i network services:

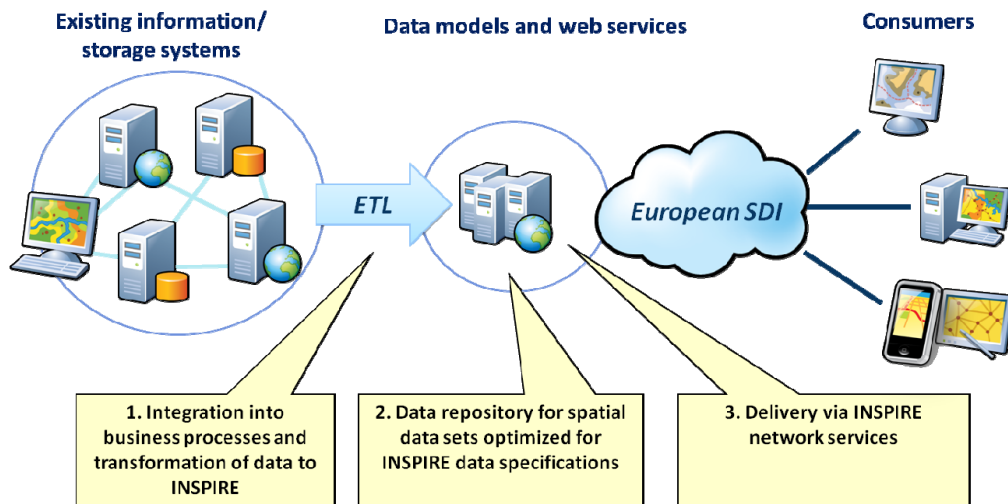


Figura 6 – Workflow per creare i network services INSPIRE.

Dalle figure è comprensibile che, disponendo degli strumenti adatti, è possibile limitare lo sviluppo e l'editing ai soli seguenti task:

1. Creazione di nuovi metadati o trasformazione dei metadati esistenti
2. Trasformazione ETL dei propri dati nel repository INSPIRE-compatibile

Effettuate queste operazioni saranno gli strumenti ad esporre metadati, dati e servizi secondo quanto richiesto da INSPIRE.

I vantaggi di questo approccio sono principalmente:

1. Non è necessario modificare le applicazioni esistenti, in quanto si trasformano solo i dati di interesse di INSPIRE
2. Nuovi temi e regole possono essere aggiunti ampliando il modello dati
3. I servizi, oltre ad essere in linea con quanto richiesto da INSPIRE, possono essere già ottimizzati per una migliore fruibilità.

I workflow ora esposti possono sicuramente essere implementati con diversi strumenti e prodotti: nel capitolo seguente viene brevemente descritto il prodotto Esri che supporta questo approccio: ArcGIS for INSPIRE.

4 ArcGIS for INSPIRE

ArcGIS for INSPIRE è un prodotto della Esri composto da diversi elementi:

1. Un'estensione specifica per il desktop;
2. Un'estensione specifica per il server;
3. Un Geoportal Server configurato per INSPIRE
4. Un modello di Geodatabase compatibile con le specifiche dell'Annex I e II di INSPIRE

Tutte le estensioni e gli altri componenti sono preconfigurati per rispettare le regole di INSPIRE. Ad esempio il Geoportal Server, che esiste anche come prodotto FOSS, è personalizzato in modo da filtrare metadati compilati secondo le Implementing rules di INSPIRE.

Il modello di Geodatabase rispetta le specifiche INSPIRE ed i servizi costruiti su di esso attraverso il ArcGIS for Server sono già ottimizzati.

Il pattern proposto da Esri e descritto al capitolo precedente viene quindi pienamente implementato nel prodotto ArcGIS for INSPIRE.

5 Conclusioni

Un approccio integrato ad INSPIRE è la chiave per rispettare i tempi e le regole di implementazione richieste.

Il workflow presentato ha il vantaggio di minimizzare l'impatto su un'infrastruttura preesistente e al tempo stesso fornire quanto richiesto. Fra le diverse possibilità di implementazione il prodotto ArcGIS for INSPIRE della Esri nasce già seguendo tale workflow ed rappresenta quindi una soluzione ottimale al passaggio da un'infrastruttura proprietaria ad una che rispetti le specifiche INSPIRE e che possa essere condivisa ed utilizzata ad ogni livello: locale, nazionale o globale.

Metadati RNDT e INSPIRE: definizione di un profilo comune basato su casi d'uso reali

Gianni Campanile (*), Pierluigi Cara (**)

(*) Esri Italia, Via Tiburtina 755, 00159 Roma, Tel. 06406961, gcampanile@esriitalia.it

(**) Dipartimento della Protezione Civile, Via Vitorchiano 2, 00189 Roma
Tel. 0668201, pierluigi.cara@protezionecivile.it

Riassunto

Il Dlgs, n.32/2010 (cfr. [8]) ha recepito la direttiva INSPIRE (cfr. [4]), descrivendo la struttura di dettaglio dei metadati, derivata dalle specifiche contenute nel Regolamento recante regole tecniche per la definizione del contenuto del Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali (RNDT, cfr. [9]) utilizzato da molte pubbliche amministrazioni per l'implementazione del loro catalogo di metadati. Ma quali sono le differenze tra le specifiche RNDT e le specifiche INSPIRE? E' possibile compilare un metadato che rispetti entrambe le specifiche? In questo articolo, basato su casi reali di implementazione di cataloghi di metadati, vengono descritte le relazioni esistenti tra le specifiche RNDT e le regole di implementazione di INSPIRE (cfr. [5]), evidenziando i punti dove potrebbero sorgere incompatibilità. Viene poi descritto un profilo compatibile con entrambe le specifiche, i cui metadati possono essere editati anche sul geoportale INSPIRE (cfr. [10]). Infine sono descritte alcune soluzioni per rendere standard e quindi efficace l'operazione di ricerca e visualizzazione di un metadato su cataloghi eterogenei.

Abstract

With the decree Dlgs, n.32/2010 (cfr. [8]) of the Italian government the INSPIRE directive came into force in Italy. In this decree a national metadata profile is described, originating from previous technical rules for defining the structure and content of the Repertorio Nazionale Dati Territoriali (RNDT, cfr. [9]), used by many public authorities to implement their metadata catalogue. But which are the differences between RNDT specs and INSPIRE Implementing Rules? Is it possible to create a metadata record that fulfills both specifications? This paper, based on several use cases of running metadata catalogues, shall describe the relationships between RNDT technical rules and INSPIRE Implementing rules (cfr. [5]), pointing out possible compatibility problems. A metadata profile that is compatible with both specifications and that can also be validated and edited using the INSPIRE geoportal (cfr. [10]) will then be described. Finally, the interoperability among different catalogues is addressed, showing some solutions adopted in use cases to optimize the research and view operations of metadata records harvested on heterogeneous catalogues.

Riferimenti:

1. ISO International Standard 19115:2003 e 2009 Geographic information - Metadata
2. ISO International Standard 19119:2005 e 2008 Geographic information - Services
3. ISO International Standard 19139:2007 Geographic information -- Metadata -- XML schema implementation

4. Direttiva 2007/2/CE, che istituisce un'infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità europea (INSPIRE)
5. INSPIRE Metadata Implementing Rules v.1.2 (MD_IR_and_ISO_v1_2_20100616)
6. INSPIRE Geoportal (<http://www.inspire-geoportal.eu/index.cfm/pageid/342>)
7. Decreto Legislativo 7 marzo 2005, n.82 (G.U.del 16 maggio 2005, n. 112 - S. O. n. 93) e s.m.e.i.
8. Decreto Legislativo 27 gennaio 2010, n.32 (G.U. del 9.3.2010, n.56 - S.O. n.47)
9. Allegato 2 "Specifiche tecniche per la formazione e l'alimentazione del Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali" dello Schema di DPCM (Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri) "Regolamento recante regole tecniche per la definizione del contenuto del Repertorio nazionale dei dati territoriali, nonché delle modalità di prima costituzione e di aggiornamento dello stesso", vedi sito DigitPA (ex CNIPA) (<http://www.digitpa.gov.it/altre-attivita/C3%A0/repertorio-nazionale-dati-territoriali>)
10. CNIPA: RNDT Linee Guida, Parte Generale
11. OGC OpenGIS Catalogue Services Specification Version 2.0.2
12. ESRI Geoportal Server (<http://sourceforge.net/projects/geoportal/>)

Keywords:

Metadati, RNDT, INSPIRE, standard, catalogo, geoportale.

1 Introduzione

In questo articolo ci proponiamo di descrivere un percorso per la compilazione dei metadati basato sull'esperienza fatta nella traduzione e implementazione di metadati sia del Dipartimento della Protezione Civile che di altri soggetti della Pubblica Amministrazione locale e centrale.

Le domande:

- "Qual è il profilo che devo utilizzare per i miei metadati ?"
- "Una volta compilati, i miei metadati saranno utilizzabili da altri senza problemi ?"
- "Come posso interrogare altri cataloghi di metadati e riconoscere i metadati raccolti ?"

sono quelle che principalmente si pongono le organizzazioni che vogliano trasformare il proprio catalogo di metadati a partire da un formato preesistente (ad. es. FGDC o ISO) o creare un nuovo catalogo secondo gli standard previsti dalle normative europee e nazionali.

L'articolo ha quindi un approccio operativo al problema e cerca di rispondere alle domande di cui sopra, chiarendo la situazione attuale dei profili a livello nazionale ed europeo e mostrando quali sono i punti di attenzione per la creazione di un catalogo di metadati veramente interoperabile.

Nei prossimi capitoli esamineremo quali sono le relazioni tra le specifiche ISO ed INSPIRE e fra INSPIRE ed il profilo nazionale RNDT; ci concentreremo in particolare su metadati di dataset "flat", cioè senza una struttura gerarchica, e su metadati di servizi.

2 Diversi profili di metadati

2.1 Le relazioni tra INSPIRE e ISO

Come è noto, a livello europeo la direttiva INSPIRE definisce delle regole di compilazione dei metadati per i paesi membri. Anche se la direttiva stessa ammette l'interesse per altri standard, tra cui Dublin Core, le specifiche di implementazione (cfr.[5]) sono basate sull'insieme di standard dell'International Standard Organization, ed in particolare su ISO

19115 per i dati (cfr [1]) e ISO 19119 per i servizi (cfr. [2]), entrambi codificati con lo standard ISO19139 (cfr. [3]).

Lo standard INSPIRE (cfr. [4] e [5]) si basa principalmente sulle specifiche ISO 19115/19139 e ISO 19119/19139, ma in alcuni casi si differenzia o imponendo regole più restrittive, oppure, al contrario, modificando alcuni vincoli. Mentre il primo caso è previsto nelle specifiche ISO, l'eliminazione di vincoli permette di creare dei record INSPIRE che non sono compatibili con le specifiche ISO.

La situazione è illustrata nella seguente figura:

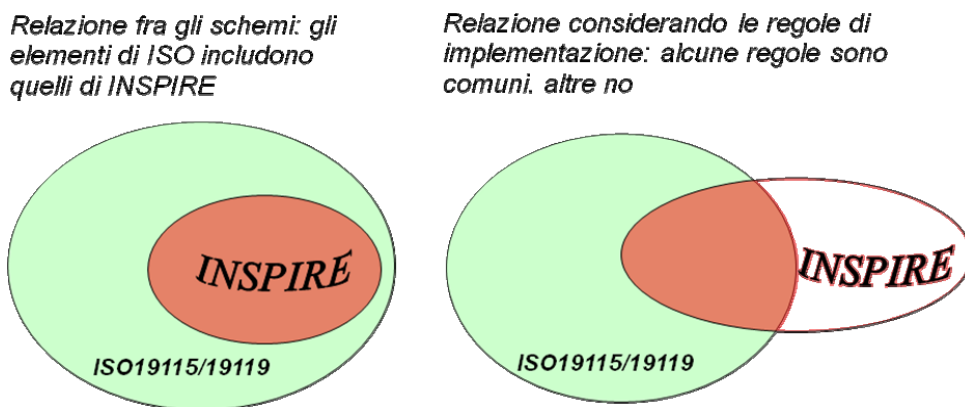


Figura 1 – Relazioni fra INSPIRE e ISO.

In base a queste relazioni, anche se l'insieme degli elementi di INSPIRE è un sottoinsieme di quelli di ISO, una validazione completa che prenda in considerazione anche tutti i vincoli di implementazione ISO, come ad esempio la presenza di un riferimento temporale, o della definizione del codice del linguaggio utilizzato potrebbero identificare un record INSPIRE come non ISO-compliant. In altre parole, mentre la figura di sinistra rappresenta la relazione fra gli insiemi degli elementi delle specifiche, quella di destra rappresenta i possibili rapporti fra documenti di metadati al momento della validazione rispetto ad uno standard. Nella figura viene considerata l'importante caratteristica della codifica XML per cui elementi aggiuntivi non invalidano uno schema. La figura di destra quindi indica che è possibile creare un documento ISO che sia anche valido per INSPIRE, uno ISO che *non* sia valido per INSPIRE (ad esempio non includendo un elemento obbligatorio per INSPIRE), ma anche che è **possibile creare un documento INSPIRE non valido per ISO.**

Infatti, sebbene ISO preveda meno di dieci elementi obbligatori (cfr. [1]), vi sono casi in cui ISO è più restrittivo di INSPIRE, come ben descritto nelle Implementing Rules di INSPIRE (cfr. [5]).

Questi casi sono riassunti nella seguente tabella:

ISO 19115 Core ¹	INSPIRE	Comments
Dataset reference date (M)	Part B 5 Temporal Reference	ISO 19115 is more demanding. The metadata shall contain a date of publication, revision or creation of the resource, while in INSPIRE the Temporal Reference can also be expressed through Temporal Extent.
Dataset language (M)	Part B 1.7 Resource Language	ISO 19115 is more demanding. It mandates the dataset language, even if the resource does not include any textual information. The ISO 19115 Dataset language is defaulted to the Metadata language.
Dataset character set (C)	-	ISO 19115 is more demanding. The dataset character set has to be documented in ISO 19115 when ISO 10646-1 is not used.
Metadata character set (C)	-	ISO 19115 is more demanding. The metadata character set has to be documented in ISO 19115 when ISO 10646-1 is not used.
Metadata date stamp (M)	Part B 10.2 Metadata Date	ISO is more restrictive because this element shall contain the "date that the metadata was created" and INSPIRE may contain the "date when the metadata record was created or updated"

Tabella 1 – Elementi più restrittivi in ISO.

In conclusione:

- L'insieme degli elementi di INSPIRE è un sottoinsieme degli elementi di ISO
- È possibile creare un metadato INSPIRE non compatibile con ISO
- E' possibile creare un metadato ISO non compatibile con INSPIRE.

Nel capitolo 3 affronteremo queste differenze per proporre delle linee guida per compilare un metadato.

2.2 INSPIRE e RNDT

Una volta che uno stato membro recepisce la direttiva INSPIRE ed i relativi regolamenti, è obbligato ad adeguarsi alle sue regole; è comunque possibile definire uno standard nazionale, purché vengano rispettate le indicazioni previste da INSPIRE.

In Italia il Codice dell'amministrazione digitale (cfr. [7]) ha istituito presso il CNIPA, ora DigitPA, il Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali (RNDT) ed ha previsto l'individuazione e la definizione delle regole per il contenuto del repertorio stesso.

Nel corso degli anni questo standard si è via via adattato alle nuove specifiche di INSPIRE fino all'ultima versione disponibile sul sito in cui, nell'Allegato 2, sono definite le specifiche tecniche (cfr. [9]).

Tuttavia nel Gennaio 2010 è stato emanato un Decreto Legislativo che costituisce il recepimento della direttiva INSPIRE da parte dello Stato Italiano; questo decreto, (cfr. [8]) è stato pubblicato nella Gazzetta Ufficiale a Marzo ed impone di fornire entro il 24 Dicembre 2010 i metadati riferiti ai dati dell'Annex I e II della direttiva INSPIRE secondo le specifiche delineate nel decreto stesso.

Al momento attuale l'iter procedurale per la definitiva adozione dello schema di DPCM (Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri) del Repertorio Nazionale dei Dati

¹ ISO ha definito un insieme minimo consigliato di elementi denominato ISO Core, nel quale sono presenti l'insieme di elementi obbligatori per ISO, più alcuni opzionali. Le Implementing Rules di INSPIRE fanno riferimento a tale insieme.

Territoriali non è ancora terminato mentre, al contrario, il decreto [8] è un documento ufficiale. Quest'ultimo ripropone quasi integralmente le specifiche RNDT e in taluni casi le aggiorna².

Stante questa situazione in questo articolo prenderemo in considerazione entrambi i profili, identificando ove necessario con RNDT-AII2 quello specificato in [9], con RNDT-Dlgs quello specificato in [8] e genericamente con RNDT quando ci si riferisce ad un profilo nazionale unificato.

Le relazioni tra le specifiche descritte finora sono rappresentate nella seguente figura:

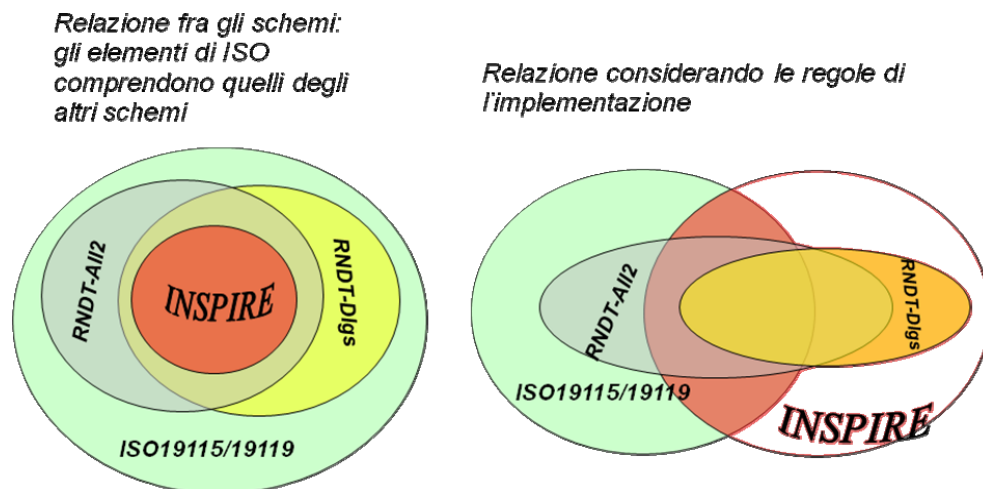


Figura 2 – Relazioni fra ISO, INSPIRE e RNDT.

Cioè dal punto di vista degli elementi dello schema, sia RNDT-AII2 che RNDT-Dlgs sono un sovrinsieme di INSPIRE comunque contenuti in ISO, ma per quanto riguarda l'implementazione si hanno varie intersezioni tra i profili senza una relazione di inclusione propria.

3 La definizione di un profilo comune: linee guida e casi d'uso

3.1 L'obiettivo: un profilo comune

Dalle figure del capitolo precedente, abbiamo visto come il problema di incompatibilità nasca dai vincoli imposti dalle regole di implementazione, che permettono la creazione di record di metadati che rispettano una specifica ma non un'altra.

L'obiettivo è quello di avere un record che sia compatibile *contemporaneamente* con ISO, INSPIRE e RNDT, cioè, sempre utilizzando gli schemi proposti sinora:

² Anche se tale aggiornamento non segue l'iter procedurale previsto dall'art.59 comma 5 del Codice dell'amministrazione digitale.

Implementazione ideale: i profili sono contenuti uno nell'altro

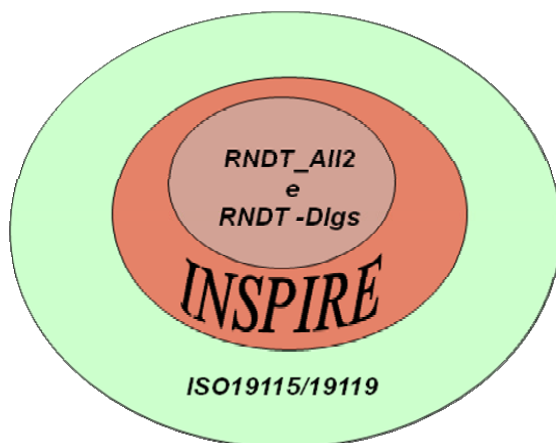


Figura 3 – Situazione ideale per l'implementazione: i profili sono contenuti.

Da notare che questa è una relazione di inclusione che va dalle specifiche con regole di implementazione più restrittive a quelle con regole meno restrittive.

Riuscire in questo obiettivo vuol dire che un documento che rispetti le regole RNDT è automaticamente sia INSPIRE che ISO compatibile.

In altre parole, è necessario un *profilo comune* che rispetti l'unione di tutte le regole degli standard definiti, scegliendo, in caso di ambiguità, le ipotesi più restrittive.

Per fare questo dobbiamo definire delle linee guida basate sui documenti che definiscono le specifiche di implementazione dei vari standard e profili:

- gli elementi e le regole di ISO definiti in [1], [2] e [3]
- le regole di INSPIRE definite in [5]
- le specifiche e le linee guida per l'implementazione per RNDT-All2 definite in [9] e [10]
- le specifiche per RNDT-Dlgs definite in [8]

e cercare di trovare il fattore comune di tutte le specifiche.

Questo è possibile se sono rispettate le seguenti condizioni:

1. E' possibile definire una relazione di inclusione fra gli elementi richiesti nei vari schemi
2. Gli elementi aggiuntivi rispetto ad uno schema non invalidano lo schema stesso
3. Le regole di implementazione non sono contraddittorie

Il punto 1 ci garantisce che uno schema non richieda elementi che sono estranei al vocabolario degli altri schemi; il punto 2 che eventuali aggiunte fatte per rispettare alcuni vincoli (ad esempio l'obbligatorietà di un elemento) non creino problemi ad uno schema meno "completo"; il punto 3 ci garantisce che un vincolo imposto da un profilo possa essere rispettato in tutti gli schemi meno restrittivi.

La prima condizione è già stata esposta nel capitolo precedente ed è evidente dalla Figura 2, dove si vede che gli elementi degli schemi sono in relazione di inclusione.

La seconda condizione è implicita nel linguaggio XML, dove la validazione di uno schema considera solamente gli elementi descritti nel documento di verifica, ignorando gli altri.

Infine, analizzando i vari documenti descritti sopra, si può evincere che anche l'ultima condizione può essere rispettata, e quindi **utilizzare tutti i vincoli definiti per definire un profilo comune, scegliendo, in caso di ambiguità, i vincoli più restrittivi.**

Vediamo alcuni esempi:

- Riferimento temporale:
 - ISO: richiede che sia definita almeno una data di creazione, pubblicazione o revisione della risorsa
 - INSPIRE: il riferimento temporale può essere espresso anche attraverso un'istanza di tipo Temporal Extent
 - RNDT-All2: come ISO
 - RNDT-Dlgs: come INSPIRE

In questo caso ISO è la scelta più restrittiva, quindi viene adottato ISO, ed è necessario specificare almeno una data.

- Informazioni sui metadati → Id file precedente
 - ISO: non presente in ISO Core, Opzionale in ISO
 - INSPIRE: non presente
 - RNDT-All2: Obbligatorio
 - RNDT-Dlgs: Obbligatorio

In questo caso RNDT è la scelta più restrittiva, quindi viene adottato RNDT, ed è necessario specificare l'identificativo.

E' evidente che un profilo definito in tal modo rispetta tutte le regole dei profili, ed è quindi raggiunto l'obiettivo che ci eravamo prefissati.

3.2 Casi d'uso

L'implementazione del profilo descritto finora è stata effettuata utilizzando l'Esri Geoportal Server (cfr. [11]). Questo è un prodotto FOSS (Free and Open Source Software), scaricabile liberamente da SourceForge e utilizzabile sotto la licenza Apache 2.0.

In questo prodotto è stato possibile definire completamente un nuovo profilo di metadati utilizzando le regole descritte nel paragrafo precedente, come visualizzato nella Figura 4.

Per limitare al massimo gli errori di compilazione, sono stati implementati diversi controlli, tra cui:

- Listbox per i campi codificati
- Uso di *CheckBox* e *RadioButton* per i valori a scelta multipla o alternativa
- Per i campi in cui il valore è predeterminato, questo è stato reso non modificabile
- Espressioni regolari per la validazione di campi speciali (ad. es. email)
- Bottoni di test per il controllo di URL

Inoltre è stata attivata la validazione dello schema al momento del salvataggio, quindi il record che viene memorizzato è già sintatticamente valido.

Figura 4 – Esri Geoportal Server: editor di metadati RNDT (parte).

Tramite questo profilo, adottato sia presso il DPC che in altri enti, come ad. es. l'ISPRA (Istituto Superiore di Protezione Ambientale), l'ARPA (Agenzia Regionale Protezione Ambiente) Piemonte, l'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), è stato possibile creare dei metadati compatibili con RNDT ma che sono validati anche tramite l'editor di INSPIRE (cfr. [10]), come evidenziato dalla figura seguente:

Figura 5 – Validazione tramite portale INSPIRE.

4 L'interoperabilità fra cataloghi di metadati

4.1 Leggere da altri cataloghi

Nei capitoli precedenti abbiamo parlato della definizione di un profilo compatibile con gli standard nazionali ed europei. Abbiamo anche descritto brevemente le implementazioni attuali di tale profilo tramite l'Esri Geoportal Server.

Ovviamente però vi sono diverse implementazioni di cataloghi, ognuno dei quali può contenere record in formati diversi.

Lo standard CS-W (cfr. [11]) definito dall'OGC (Open Geospatial Consortium) per i cataloghi di metadati è ormai uno standard de facto, malgrado alcune difformità presenti nelle varie implementazioni. Utilizzando tale standard, è quindi possibile effettuare un'operazione di *Ricerca* o di *Raccolta*³ di metadati. In entrambi i casi viene interrogato il catalogo esterno, utilizzando le capacità (*Capabilities*) che quel catalogo offre: selezione per range di date, per parole chiave, per sottostringhe, operatori booleani, caratteri jolly etc.

Per presentare correttamente i risultati però, è necessario capire in quale formato sono i record che vengono letti. Se ad esempio volessimo mostrare immediatamente le condizioni di uso dei record letti, con un record ISO potrebbe non essere possibile in quanto sono opzionali; è quindi importante riconoscere secondo quale profilo è stato compilato il record letto, in modo da conoscere l'insieme di elementi compilati e le regole utilizzate.

Un altro problema che nasce nella lettura di metadati da altri cataloghi è l'identificazione del *Tipo di Risorsa* rappresentata dal metadato.

Prendiamo il caso di un dataset compilato ad esempio secondo lo standard INSPIRE. Secondo questo standard, l'elemento Resource Locator va compilato obbligatoriamente se esiste un link da utilizzare per accedere alla risorsa o per avere informazioni sulla risorsa (cfr. [5]). E' ovvio però che queste operazioni possono essere totalmente diverse, infatti il link potrebbe portare:

- Ad un file dove è possibile scaricare i dati del dataset
- Ad un servizio mappa dove visualizzare il dataset
- Ad un sito web che contiene informazioni sul dataset
- Ad un documento con informazioni sul dataset
-

A seconda di questa informazione, noi potremmo classificare il record di metadati come una risorsa scaricabile, come una risorsa visualizzabile in un servizio mappa, come un sito web, come un documento, etc.

Altri campi possono aiutarci ad identificare la risorsa, come ad esempio il livello gerarchico o alcuni campi descrittivi; in entrambi i casi però si tratta di informazioni troppo generiche per essere realmente utilizzabili.

Per interoperare efficacemente con altri cataloghi di metadati, sono quindi da considerare almeno i seguenti aspetti:

- La comunicazione tramite specifiche CS-W (considerando anche le specificità delle varie implementazioni)
- L'identificazione del profilo di metadati (nel senso di standard di base, profilo e versione)
- L'identificazione del tipo di risorsa descritta dal metadato

Mentre il primo aspetto esula dallo scopo di questo documento, nei prossimi due paragrafi ci occuperemo degli altri due punti.

³ Nel caso della Ricerca i risultati sono presentati direttamente, mentre nel caso della Raccolta i risultati sono memorizzati nel catalogo locale.

4.2 Identificare un profilo di metadati

Nello standard ISO esistono due elementi che sembrano ideali per identificare un profilo di metadati:

- #10: MD_metadata.metadataStandardName
- #11: MD_metadata.metadataStandardVersion

Sfortunatamente questi due elementi sono opzionali in ISO e non considerati in INSPIRE.

Inoltre, se pure questi elementi venissero sempre compilati, il loro valore è un testo libero, quindi l'interpretazione potrebbe non essere univoca.

Potremmo quindi cercare di utilizzare di identificare altri elementi specifici che ci permettano di riconoscere il profilo utilizzato, ma dato che i profili che stiamo considerando sono tutti basati su ISO 19115/19139 e IO 19119/19139, comunque possono non esserci differenze tali da permettere un'identificazione certa. Spieghiamoci con un esempio:

- Sapendo che in INSPIRE è presente una sezione relativa ai Vincoli (*resourceConstraints*) che in ISO non è obbligatoria, potremmo basarci sulla presenza di questi elementi per riconoscere un record. E' però possibile che un record ISO abbia quella sezione comunque compilata, generando un errore di identificazione.

Attualmente non c'è una soluzione univoca, ma l'approccio che abbiamo adottato è stato molteplice, in modo da ridurre al minimo le errate identificazioni:

- Definire dei valori codificati per i campi *metadataStandardName* e *metadataStandardVersion*
 - Va anche tenuto conto che questi campi sono obbligatori in RNDT, quindi la loro presenza a livello nazionale dovrebbe essere garantita
- Identificare un profilo sulla base di elementi "caratteristici" che un altro profilo non ha
 - Ad esempio INSPIRE ha i Vincoli obbligatori, mentre ISO no, e RNDT ha il *Sistema di riferimento dei dati* obbligatorio, non presente né in ISO né in INSPIRE.
- Identificare un record confrontandolo con il profilo più restrittivo, per poi andare a quello meno restrittivo. Quindi prima RNDT, poi INSPIRE, poi ISO.
 - In questo modo è possibile sfruttare gli elementi caratteristici per riconoscere un profilo.

L'uso di tali regole ha mostrato che l'identificazione del tipo di profilo è corretta nella quasi totalità dei casi, rendendo quindi possibile il collegamento fra diversi cataloghi di metadati.

4.3 Identificare un tipo di risorsa

L'identificazione del tipo di risorsa può dipendere da vari elementi. Nell'Esri Geoportal Server è possibile identificare i seguenti tipi di risorse:

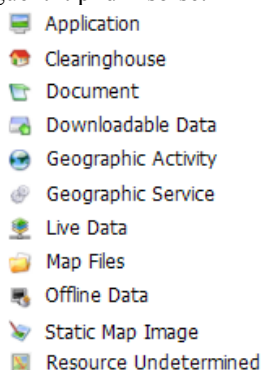


Figura 6 – Tipi di risorsa.

Questo non può essere effettuato semplicemente utilizzando gli elementi presenti in INSPIRE; in particolare il semplice Resource Locator non può definire in dettaglio il tipo di risorsa rappresentata dal metadato. Nei casi d'uso esposti prima è stato quindi scelto di utilizzare il campo opzionale *protocol*, codificandolo in modo da coprire i casi d'uso più comuni. Come esempio, consideriamo l'implementazione riportata nel documento INSPIRE:

```
<gmd:MD_Metadata ...
...
  <gmd:distributionInfo>
    <gmd:MD_Distribution>
...
      <gmd:transferOptions>
        <gmd:MD_DigitalTransferOptions>
          <gmd:onLine>
            <gmd:CI_OnlineResource>
              <gmd:linkage>
                <gmd:URL>http://image2000.jrc.it/</gmd:URL>
              </gmd:linkage>
            </gmd:CI_OnlineResource>
          </gmd:onLine>
        </gmd:MD_DigitalTransferOptions>
      </gmd:transferOptions>
    </gmd:MD_Distribution>
  </gmd:distributionInfo>
...
</gmd:MD_Metadata>
```

Come si vede, non c'è nessun modo di capire che il link inserito nel tag **gmd:URL** è un sito web. In questo caso, un programma che legge questo record potrebbe aspettarsi un servizio WMS e cercare di fare una richiesta di mappa, andando quindi in errore.

Con l'utilizzo del campo *protocol* si avrebbe:

```
<gmd:MD_Metadata ...
...
  <gmd:distributionInfo>
    <gmd:MD_Distribution>
...
      <gmd:transferOptions>
        <gmd:MD_DigitalTransferOptions>
          <gmd:onLine>
            <gmd:CI_OnlineResource>
              <gmd:linkage>
                <gmd:URL>http://image2000.jrc.it/</gmd:URL>
              </gmd:linkage>
              <gmd:protocol>
                <gco:CharacterString>WEBSITE</gco:CharacterString>
              </gmd:protocol>
            </gmd:CI_OnlineResource>
          </gmd:onLine>
        </gmd:MD_DigitalTransferOptions>
      </gmd:transferOptions>
    </gmd:MD_Distribution>
  </gmd:distributionInfo>
...
</gmd:MD_Metadata>
```


In questo modo è possibile identificare il link come l'indirizzo di un sito web ed effettuare l'operazione più adeguata.

5 Conclusioni

INSPIRE e RNDT hanno portato dei vantaggi enormi nella standardizzazione dei metadati, ma è necessario che ci siano delle regole aggiuntive che non solo evitino errori di compilazione ma permettano ai cataloghi nazionali e internazionali di comunicare in modo efficace. Le linee guida e i casi d'uso discussi fin qui vanno in questa direzione e si pensa possano essere d'aiuto a tutti coloro i quali debbano implementare o modificare un catalogo di metadati.

150 anni di uso del suolo in Emilia-Romagna: dall'unità d'Italia ad oggi

Elisabetta Campiani (**), Stefano Corticelli (*), Maria Luisa Garberi (*),
Maria Cristina Mariani (*), Sara Masi (*), Siria Panichi (*)

(*) Servizio Sviluppo dell'Amministrazione digitale e Sistemi informativi geografici, Regione Emilia-Romagna
Viale Silvani 4/3, 40122 Bologna, Tel. 0515274857, Fax 051 5274216, e-mail scorticelli@regione.emilia-romagna.it
mlgarberi@regione.emilia-romagna.it, cmariani@regione.emilia-romagna.it, smasi@regione.emilia-romagna.it
spanichi@regione.emilia-romagna.it

(**) ISMAR-CNR, Via Gobetti 101, 40129 Bologna, Tel.051 6398872, Fax 051 6398940
e-mail elisabetta.campiani@bo.ismar.cnr.it

Riassunto

La Regione Emilia-Romagna ha adeguato le sue principali edizioni dell'Uso del Suolo al nuovo assetto del territorio, che comprende, dal 29 luglio 2009, anche i sette comuni dell'alta Valmarecchia. Le edizioni aggiornate sono quella storica (1850), quella del 1976, quella del 2003 e quella del 2008.

L'adeguamento territoriale ha comportato il reperimento delle fonti necessarie all'interpretazione a video, il più possibile simili a quelle usate per l'edizione originaria.

L'edizione storica è stata estesa utilizzando la Carta Topografica dello Stato Pontificio e del Granducato di Toscana (1851).

L'edizione del 1976, oltre che adeguata territorialmente, è stata riorganizzata anche rispetto alla legenda del progetto europeo Corine Land Cover (CLC), collocando le ventinove classi della legenda al terzo livello CLC.

L'edizione del 2003 è stata migliorata mediante l'utilizzo delle ortofoto AGEA 2008 a colori (RGB), perché le ortofoto a colori permettevano di evidenziare meglio e rendere quindi mappabili, ad esempio, certi piccoli agglomerati urbani, in genere coperti in parte dalla vegetazione, che non era stato possibile perimetrare sulle immagini Quickbird 2003.

L'edizione del 2008 è stata creata utilizzando le ortofoto ad alta definizione AGEA 2008, riprese nel breve intervallo che va dal 19 giugno al 29 agosto del 2008, mentre per la zona dei sette comuni dell'alta Valmarecchia sono state utilizzate le ortofoto ad alta definizione AGEA 2007 riprese dal 24 giugno al 13 luglio 2007. Il sistema di classificazione è rimasto invariato rispetto all'edizione del 2003, articolato su quattro livelli con un totale di 83 diverse categorie di uso del suolo.

Abstract

Emilia-Romagna Region administration has updated the land use to new territorial extents, comprehending from July 29th 2009 seven high Valmarecchia municipalities. Updated editions are historical landuse (1850), 1976, 2003 and 2008.

New region extents and expanded boundaries led to finding new photointerpretation sources as close as possible to original ones.

Historical edition has been expanded using topographic maps from "Stato Pontificio" and "Granducato di Toscana" (1851).

The 1976 edition, besides territory updating, underwent major reworking as regards to Corine Land Cover (CLC) European project's legend, relating every twenty nine land use classes to CLC third level legend.

2003 edition has been improved using AGEA 2008 (RGB) color orthophotos, because these imagery were, for example, more useful in mapping little urban areas than original Quickbird 2003. Updated 2008 edition has been produced using AGEA 2008 high definition orthophotos, shot in the brief time lapse June 19th - August 29th 2008, while AGEA 2007 high definition orthophotos shot from 06/24 to 07/13 2007 have been used as source for high Valmarecchia territory. The classification system did not face any change as to 2003 edition, organized on four levels and a total of 83 different land use categories.

Premessa

La Regione Emilia-Romagna nella sua storia ha sempre curato in maniera molto specifica la produzione di cartografia di uso del suolo, ritenendolo uno strumento indispensabile alla pianificazione territoriale e alla conoscenza dell'assetto del territorio.

Particolare importanza riveste la continuità delle edizioni, che consentono confronti nel tempo che restituiscono l'evoluzione del territorio in un arco di 150 anni.

Le edizioni presenti sul territorio della regione, aggiornate ed omogeneizzate rispetto alle direttive del progetto CLC sono:

Edizione storica (1853)

Edizione 1994

Edizione 1976

Edizione 2003

Edizione 2008

Il confronto tra questi database dell'uso del suolo dà un'immagine continuativa delle trasformazioni del paesaggio dell'Emilia-Romagna dalla metà dell'Ottocento ai giorni nostri, fornendo un quadro dei profondi cambiamenti che il territorio ha subito nel corso degli ultimi centocinquanta anni.

Uso del suolo storico

Alla fine degli anni Novanta una collaborazione tra l'Istituto per i Beni Artistici, Culturali e Naturali ed il Servizio Sistemi Informativi Geografici della Regione Emilia-Romagna ha permesso la costruzione di una carta storica sull'intero territorio regionale, derivata dalle produzioni degli stati preunitari negli anni dal 1828 al 1853.

Il territorio regionale è coperto dalla Carta Topografica Austriaca (scala 1:86.400) e, per una piccola porzione, dalla Carta Topografica degli Stati di terraferma di Sua Maestà il Re di Sardegna del 1853 (scala 1:50.000).

Il mosaico delle varie cartografie è stato scansionato a 1016 punti per pollice, georeferenziato attraverso il riconoscimento di punti trigonometrici e di punti noti e infine suddiviso secondo il taglio cartografico dei moderni fogli 1:50.000 dell'Istituto Geografico Militare. Le legende delle varie carte sono piuttosto simili e confrontabili tra loro. Il dettaglio dei segni convenzionali delle legende delle carte storiche ha suggerito l'idea di redigere una carta tematica dell'uso del suolo relativa al 1850 circa, con un'operazione corretta volta alla ricostruzione dell'assetto geografico del territorio in un determinato periodo. Con uno strato storico diventa più facile confrontare il passato con il presente e riconoscere, nel territorio di oggi, oggetti relitti e permanenti che sono rimasti visibili per ricostruire una visione del governo del territorio di quel periodo storico.

Il territorio interpretato copre una porzione un po' più estesa della regione, perché si è scelto di andare oltre il confine nord, che corre per almeno due terzi della sua lunghezza lungo il corso attuale del fiume Po. L'interpretazione copre perciò il territorio fino alla sponda orografica sinistra del Po ottocentesco, anche se oggi si trova al di fuori della regione; nella porzione mantovana, dove il fiume si allontana è stato utilizzato il tratto di confine odierno. La costa, ovviamente, ha la forma definita dalla topografia storica, che anche in questo caso si differenzia dalla forma attuale. L'interpretazione delle classi dell'uso del suolo è stata svolta direttamente a video sulle scansioni degli originali topografici in bianco nero. Le classi dell'uso del suolo sono state definite a partire dalle cinque legende topografiche originarie.

La redazione di una moderna carta di uso del suolo prevede l'interpretazione di fotografie aeree o da satellite ad alta risoluzione, che contengono la realtà da rappresentare attraverso le classi dell'uso. Nel caso della redazione dell'uso del suolo storico, invece, la presenza delle classi non dipende da una fotografia della realtà investigata, ma da un'interpretazione della realtà che il topografo militare ha effettuato durante il rilevamento e da un'astrazione simbolica che il disegnatore ha usato nel restituire la carta. Questo concetto va sempre tenuto presente, in quanto il riconoscimento delle classi si basa sui simboli che il cartografo ha utilizzato, che diventano in questo caso la «fotografia» della realtà, nonché la verità assoluta, come nel mito platonico delle immagini riflesse sul fondo della caverna.

Nell'impostazione della metodologia di lavoro non si è tenuto conto del concetto di unità minima cartografabile, comunemente usato nelle cartografie tematiche, perché le aree delimitate durante l'interpretazione sono costituite, infatti, da oggetti che il cartografo di allora aveva già rappresentato, rendendole automaticamente da «cartografabili» a «cartografate». Questa scelta ha permesso di salvaguardare il dettaglio dell'informazione originale contenuta nella carta, portando il dettaglio ad un'unità minima di 1000 metri quadrati.

La legenda dell'uso del suolo storico è costruita su tre livelli, con uno schema di tipo Corine Land Cover (CLC), con un criterio di massima somiglianza possibile a quella dell'edizione dell'uso del suolo del 2003, per rendere confrontabili i due prodotti.

Nella classe dei territori artificializzati le zone urbanizzate non sono state ulteriormente suddivise, in quanto il segno topografico non consentiva di riconoscere distinzioni per quanto riguarda l'uso degli edifici. Alcune attività produttive, considerate di interesse strategico, come i mulini, le fabbriche e i porti sono indicati con segni convenzionali specifici. Queste informazioni sono state acquisite in forma puntuale. Nel corso del 2010 è stata aggiunta l'alta Valmarecchia, che fa parte ora del territorio regionale.

Fonte informativa utilizzata	Carta Topografica Austriaca scala 1:86.400
Anni di ripresa	dal 1828 al 1851
Livelli	3
Sistema di classificazione	riclassificato secondo Corine Land Cover
Numero di categorie	20
Area minima	0,1 ettari
Numero poligoni complessivo	218.039
Numero punti complessivo	904
Restituzione di origine	a video

Figura 1 – Scheda riepilogativa del database Uso del suolo storico.



Figura 2 – Esempio del database Uso del suolo storico.

Uso del suolo 1976

La carta di “Utilizzazione reale del suolo” del 1976, in scala 1:25.000, è stata una delle prime cartografie di dettaglio a coprire l'intero territorio regionale. La sua realizzazione si è concretizzata attraverso varie sperimentazioni e successivi perfezionamenti, specialmente per quanto riguarda la legenda. Il metodo di lavoro prevedeva l'interpretazione e la restituzione cartografica di fotografie aeree in formato cartaceo con l'ausilio dello stereoscopio con un ingrandimento dell'ordine del 3x.

Le fotografie utilizzate, di tipo aerofotogrammetrico, con pellicole in bianco/nero, sono degli anni dal 1971 al 1973, mentre quelle a colori, su cui è stata realizzata la fotointerpretazione e restituzione cartografica della gran parte del territorio regionale, sono state riprese negli anni dal 1976 al 1978 ad una scala media di 1:13.500 circa. La restituzione è stata fatta sulla vecchia base topografica dell'IGM in scala 1:25.000 che a quel tempo era l'unica base topografica disponibile a quella scala per tutta la Regione. Per convenzione si è deciso di utilizzare come data di riferimento il 1976, sia perché è l'anno in cui è stata effettuata la maggiore quantità di riprese aeree, sia perché si tratta di un anno abbastanza centrale al periodo complessivo delle riprese.

Negli ultimi anni si è deciso di digitalizzare la carta, ma questo processo è stato molto complesso e articolato sia per il tematismo sia per la georeferenziazione.

Per il tematismo è stato fatto un lavoro di omogeneizzazione delle varie versioni della legenda che erano state utilizzate nel tempo e delle relative sigle. Sulle circa 300 tavolette sono poi stati corretti più di 1000 poligoni che erano sprovvisti di sigla sull'originale cartaceo ed alcune centinaia di poligoni che presentavano una doppia siglatura. Inoltre si sono presentati molti problemi riguardanti la congruenza degli attacchi fra le varie tavolette, che erano state realizzate da soggetti diversi, in periodi diversi, utilizzando riprese di anni differenti.

Nell'impostare la legenda originale erano stati seguiti principalmente due criteri: limitare il più possibile il numero delle classi, per facilitare la lettura delle carte da parte di una vasta utenza, e dare risalto a certe categorie di grande interesse a livello regionale.

Nella versione digitale la legenda è stata riorganizzata, per quanto possibile, secondo le direttive del progetto europeo Corine Land Cover (CLC).

I manufatti autostradali, assenti sulle basi topografiche IGM, ma mappati dagli autori delle carte di utilizzazione del suolo attraverso le fotografie aeree, sono stati ridisegnati e adattati alla base topografica regionale alla scala 1:25.000.

La georeferenziazione delle basi IGM ha presentato una serie di problemi, perché le tavolette sono inquadrare in due sistemi di riferimento diversi a seconda della loro età di costruzione: Bessel per le più antiche ed Hayford per le più recenti. La distribuzione dei due sistemi è variegata all'interno del territorio regionale, questo comporta che le tavolette originarie di confine fra i due sistemi non si “tocchino” fra di loro, mancando fisicamente porzioni del territorio cartografato con scostamenti fino a 150 metri terreno rispetto alla CTR. Attraverso operazioni di spostamento e successivo adattamento le tavolette sono state sistemate al meglio, portando il massimo scostamento, rispetto alla base topografica regionale, attorno ai 30 metri terreno.

Nel corso del 2010/11 è stata aggiunta l'alta Valmarecchia, che fa parte ora del territorio regionale.

Fonte informativa utilizzata	in prevalenza fotografie aeree a colori scala media 1:13.500
Anni di ripresa	dal 1971 al 1978, in prevalenza 1976
Livelli	3
Sistema di classificazione	riclassificato secondo Corine Land Cover
Numero di categorie	29
Area minima	0,375 ettari
Dimensione minima	37,5 m
Numero poligoni complessivo	218.657
Restituzione di origine	tavolette IGM scala 1:25.000

Figura 3 – Scheda riepilogativa del database Uso del suolo 1976.



Figura 4 – Esempio del database Uso del suolo 1976.

Uso del suolo 1994

L'edizione 2010 del database dell'uso del suolo del 1994 è stato riorganizzato, per quanto possibile, secondo le direttive del progetto europeo Corine Land Cover (CLC).

Per raggiungere questo risultato sono stati riclassificati tutti i poligoni appartenenti alla categoria "zone non fotointerpretabili", attività resa possibile dalla liberalizzazione delle servitù militari delle immagini più recenti, sia rilevate da satellite, sia riprese da aereo. Le sigle originali sono state affiancate dai livelli gerarchici espressi da numeri propri del CLC, per permettere un confronto diretto, sia con i database degli anni successivi, sia con quelli degli anni precedenti, che sono stati tutti riclassificati secondo le direttive CLC.

Il database deriva dalla digitalizzazione delle carte dell'uso del suolo prodotte alla fine degli anni '90. Le carte dell'uso del suolo del 1994 furono realizzate mediante fotointerpretazione delle fotografie aeree del "VOLO ITALIA '94", realizzate su pellicola ad alta definizione in bianco e nero, alla scala 1:75.000 circa. Sul materiale fotografico è stata eseguita la fotointerpretazione, utilizzando stereoscopi professionali ad elevata capacità d'ingrandimento.

Nella fotointerpretazione e restituzione è stato tenuto conto fra l'altro, del criterio della prevalenza, con un'unità minima di 2,25 ha.

In un secondo tempo le carte dell'uso del suolo del 1994 sono state tutte acquisite in formato digitale e sono state unite in modo da formare una copertura unica su tutto il territorio regionale, particolare cura è stata dedicata alla chiusura dei poligoni, alla congruenza geometrica fra le diverse entità, agli attacchi fra le carte e alla precisione geometrica. Il database non copre i sette comuni dell'alta Valmarecchia.

Fonte informativa utilizzata	fotografie aeree in bianco/nero del "Volo Italia '94" scala media 1:75.000
Anni di ripresa	1994
Sistema di classificazione	riclassificato secondo Corine Land Cover
Livelli	3
Numero di categorie	31
Area minima	2,25 ettari
Dimensione minima	100 m
Numero poligoni complessivo	41.805

Figura 5 – Scheda riepilogativa database Uso del suolo 1994.

Fonte informativa utilizzata	immagini pancromatiche satellitari “Quickbird” con pixel 60 cm
Anni di ripresa	dal 2002 al 2005, in prevalenza 2003
Livelli	4
Sistema di classificazione	Corine Land Cover per i primi 3 livelli specifiche CISIS per il 4° livello
Numero di categorie	83
Area minima	1,56 ettari
Dimensione minima	75 m in generale, 25 m per le categorie 1.2.2.1, 1.2.2.2, 5.1.1.1, 5.1.1.2, 5.1.1.3 e 5.1.1.4
Numero poligoni complessivo	84.571
Restituzione di origine	a video

Figura 7 – Scheda riepilogativa del database Uso del suolo 2003.

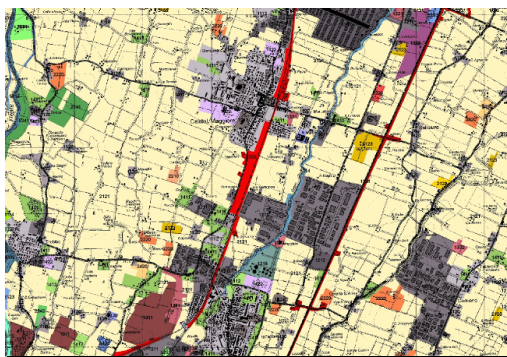


Figura 8 – Esempio del database Uso del suolo 2003.

Uso del suolo 2008

Il database 2008 è stato fotointerpretato sulle ortofoto AGEA 2008, riprese nel breve intervallo che va dal 19 giugno al 29 agosto del 2008. Fa eccezione la zona dei sette comuni dell'alta Valmarecchia per la quale sono state utilizzate le ortofoto AGEA 2007 riprese dal 24 giugno al 13 luglio 2007.

Questo ha permesso di rappresentare la situazione dell'uso del suolo dell'intero territorio regionale in un periodo molto ristretto. Le ortofoto sono ad alta definizione con pixel di 50 centimetri, disponibili sia nella versione a colori (RGB) sia in quella all'infrarosso.

La costruzione del nuovo database è avvenuta attraverso modifiche della copertura poligonale del database 2003. Questa metodologia ha permesso di mantenere inalterati tutti gli archi che delimitavano poligoni invariati nella forma ed ha interessato solo gli archi ed i poligoni che hanno subito variazioni. Il sistema di classificazione è rimasto invariato, articolato su quattro livelli con un totale di 83 diverse categorie di uso del suolo. I primi tre livelli derivano dalle specifiche del Progetto europeo Corine Land Cover (CLC) mentre il quarto livello è stato elaborato in riferimento alle specifiche definite a scala nazionale dal gruppo di Lavoro Uso del Suolo del CISIS ed è incentrato su tematiche specifiche d'interesse regionale.

Questa metodologia ha permesso di mantenere inalterati tutti gli archi che delimitavano poligoni invariati nella forma ed ha interessato solo gli archi ed i poligoni che hanno subito variazioni.

L'aggiornamento è stato effettuato a video con interpretazione delle ortofoto e restituzione delle variazioni in ambiente GIS. Per mantenere il più possibile la confrontabilità con il 2003 per il database 2008 è stata mantenuta l'area minima di 1,56 ettari e la dimensione minima di 75 metri mentre le variazioni sono state prese in considerazione quando superavano la soglia di 0,2 ettari.

Le attività di fotointerpretazione e la costruzione della banca dati sono state svolte in ambiente GIS. Il sistema per la fotointerpretazione a video utilizzato contiene specifiche funzionalità per il trattamento delle immagini digitali e consente di elaborare dinamicamente vari tipi di miglioramento del contrasto, particolarmente utili nella visualizzazione del *range* dell'infrarosso.

La fotointerpretazione dell'uso del suolo si basa sulla definizione preliminare delle chiavi interpretative, un processo che prevede le seguenti fasi:

- l'approfondita conoscenza di tutte le tipologie territoriali previste nella legenda;
- i criteri per il disambiguamento delle tipologie classificabili con minore facilità o apparentemente non riconoscibili;
- la conoscenza delle specificità del territorio in oggetto;
- le strategie per la ricerca e l'impiego dei dati ausiliari;
- il confronto con abbondanti dati a terra;
- la definizione delle tecniche di elaborazione e visualizzazione del dato aereo in funzione delle varie tipologie di territorio.

La costruzione del nuovo database 2008 è avvenuta attraverso la produzione di oltre 70 unità di lavoro, di dimensione media di 30.000 ettari, costituite in genere da raggruppamenti di comuni.

La metodologia di realizzazione è stata impostata a livello regionale, dove sono state effettuate anche le verifiche di collaudo: per ogni unità di lavoro sono stati fatti sia i controlli sulla fotointerpretazione sia quelli sulla congruenza della banca dati.

Nel corso dell'esecuzione dei lavori e a conclusione degli stessi, sono stati eseguiti controlli sulla qualità del prodotto, finalizzati, da un lato, a verificarne la corrispondenza con le specifiche desiderate e dall'altro ad evitare l'accumularsi di errori.

La copertura dell'intera superficie regionale è stata verificata attraverso controlli a video e sopralluoghi di campo atti ad approfondire la verifica della corretta classificazione nei casi dubbi o di particolare rilevanza.

La verifica della fotointerpretazione ha mirato ad evidenziare in particolare la presenza di eventuali errori riguardanti le classificazioni, le omissioni, la delimitazione dei poligoni, la conformità all'unità minima cartografabile e la corrispondenza degli attacchi tra unità di lavoro adiacenti.

Fonte informativa utilizzata	Ortofoto "AGEA 2008" a colori ed infrarosso con pixel 50 cm – Ortofoto "AGEA 2007" a colori per la zona della Valmarecchia
Anni di ripresa	2007 - 2008
Livelli	4
Sistema di classificazione	Corine Land Cover per i primi 3 livelli specifiche CISIS per il 4° livello
Numero di categorie	83
Area minima	1,56 ettari
Dimensione minima	75 m in generale, 25 m per le categorie 1.2.2.1, 1.2.2.2, 5.1.1.1, 5.1.1.2, 5.1.1.3 e 5.1.1.4
Numero poligoni complessivo	84.358
Restituzione di origine	a video

Figura 9 – Scheda riepilogativa del database Uso del suolo 2008.

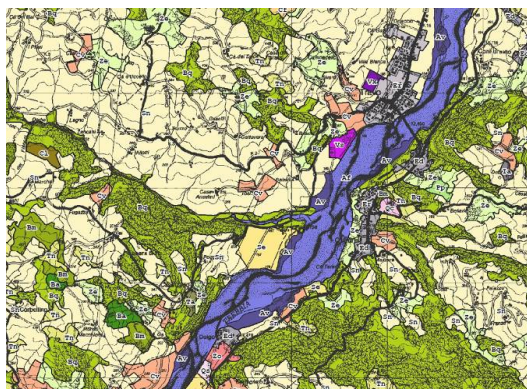


Figura 10 – Esempio del database Uso del suolo 2008.

Conclusioni

L'arco di tempo coperto dalle cinque edizioni, come già detto in precedenza, permette di effettuare dei confronti sul lungo periodo, che quantificano in modo inequivocabile le trasformazioni che il territorio della regione ha subito. Lo sforzo economico fatto, nei quarant'anni di attività della Regione, per costruire questi database è ampiamente giustificato dalle risposte che i confronti forniscono:

- l'artificializzazione del suolo, edificato alla metà dell'Ottocento per poco più dell'1% oggi si avvicina al 10%,
- il territorio boscato e seminaturale che al tempo raggiungeva il 47% oggi è poco più del 28%
- le zone umide che da quasi il 6% si sono contratte a poco oltre l'1%.
- i territori agricoli incrementati dal 44% al 58%, ma completamente trasformati, con la scomparsa del seminativo intervallato da alberi (piantata padana) che 150 anni fa raggiungeva quasi il 26% della superficie regionale sostituito dalle coltivazioni intensive.

Queste trasformazioni sono, ovviamente, sotto gli occhi di chiunque osserva una vecchia foto di un centro urbano, della pianura o dell'Appennino emiliano-romagnolo. La mappatura in database confrontabili non serve per effettuare la scoperta clamorosa, sfuggita alle osservazioni, ma per quantificare i fenomeni, dare loro delle misure inequivocabili, fare previsioni sugli andamenti e, volendo, pianificare politiche sia di salvaguardia che di riqualificazione del territorio.

Bibliografia

- Belvederi G., Bocci M., Campiani E., Corticelli S., Garberi M.L., Guandalini B., Mariani M.C., Masi S., Salvestrini L. (2010) Il nuovo database dell'uso del suolo della Regione Emilia-Romagna - Atti della 14ª Conferenza Nazionale ASITA, Brescia, 229-233.
- Bologna S., Chirici G., Corona P., Marchetti M., Pugliese A., Munafò M. (2004) - Sviluppo e implementazione del IV livello Corine Land Cover 2000 per i territori boscati e ambienti seminaturali in Italia. Atti della 8ª Conferenza Nazionale ASITA, Roma, 1: 467-472.
- Bossard M., Feranec J., Otahel J. (2000) - Corine land cover technical guide - Addendum 2000.
- Büttner G., Feranec G., Jaffrain G. (2006) - Corine land cover nomenclature illustrated guide. - EEA Technical report No 89.
- Campiani E., Corticelli S., Garberi M. L., Gavagni A., Guandalini B. (2006) - Uso del suolo 2003 - Regione Emilia-Romagna, Servizio Sistemi informativi geografici.
- Corticelli S., Campiani E., Garberi M.L., Guandalini B. - Tendenze dinamiche dell'uso del suolo nell'area di Modena nel periodo dal 1976 al 2003 - Atti 10ª Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 14-17 Novembre 2006, Vol. I, 777-778

European Environmental Agency - European Topic Center - Terrestrial Environment (2002) – Corine 10 land Cover update. I&CLC2000 project. Technical Guidelines - European Environmental Agency.

Garberi M.L., Campiani E., Vigilante E. (2007) - Il database dell'Uso del Suolo "Storico" della Regione Emilia-Romagna derivato dalla cartografia preunitaria (1828 -1853) - Atti 11 ° Conferenza Nazionale ASITA, Torino, 6-9 Novembre 2007, Vol. II, 1169-1174

Marchetti M. (2002) - Metodologie per una cartografia del suolo multilivello e multiscala: analisi e sperimentazioni applicative - Documenti del Territorio, 49: 33-51.