STIMA DI MOVIMENTI FRANOSI TRAMITE SISTEMI LASER SCAN

Giancarlo MASSARI(*), Paolo PAGANINI(**), Michele POTLECA(*),
Maria Teresa TORRESIN(***)

(*) Protezione Civile della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
Via Natisone 43, 33057 Palmanova - UD, Italia – e-mail: protezione.civile@regione.fvg.it
(**)Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 - Sgonico - TS , Italia - - e-mail: ppaganini@ogs.trieste.it
(***)Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
Direzione centrale risorse agricole, naturali, forestali e montagna
Via Caccia 17 - 33100 Udine, Italia - e-mail: mariateresa.torresin@regione.fvg.it

Riassunto: Lo scopo di questo lavoro è stato quello di valutare qualitativamente e quantitativamente l'impatto che un evento franoso ha avuto su un piccolo bacino montano della Carnia (UD). A tal fine si sono utilizzate due scansioni laser aeree, una antecedente ed una successiva l'evento. Tale metodologia di rilievo ha il grandissimo vantaggio di acquisire un rilievo topografico in tempi ridottissimi, in condizioni di estrema sicurezza per gli operatori e con una precisione accettabile per scopi di studio e/o di progettazione di opere di mitigazione del rischio. Nell'analisi multitemporale sono stati utilizzati diversi software che gestitiscono le nuvole di punti generate dai rilievi e /o modelli tridimensionali del terreno (DTM), ottenendo informazioni sul tipo di fenomeno, sulle volumetrie in gioco e sulla distribuzione del materiale lungo tutto il bacino

Abstract: The study is about the assess (in quality and quantity) of a landslide in a little mountain basin in Carnia region. Two different-time aerial laser scans were used, the first surveyed in pre-event, the second in post-event.
The laser scan technology is perfect to have a very fast survey, with high safety, and it gives a good precision in order to analyze the phenomenon and to plan risk-mitigation actions.
Various softwares were used in this multitemporal analysis; with both point-cloud survey data and digital terrain models (DTM) capacity, these softwares give informations about landslide type, volumes and material distribution along the basin.

1.Introduzione

Negli ultimi anni il problema del dissesto idrogeologico del territorio nazionale è venuto alla ribalta in numerose occasioni, spesso anche drammatiche. I fattori che influiscono negativamente sulla fragilità degli ambienti naturali sono molteplici e non sempre immediatamente individuabili. Lo studio stesso di questi fenomeni si presenta estremamente difficoltoso e costoso in quanto si tratta di prendere in considerazione un numero molto elevato di parametri, spesso difficilmente quantificabili, che normalmente rientrano in competenze di discipline diverse.
D'altra parte gli studi sul territorio rappresentano un settore di importanza strategica in quanto la buona conoscenza dell'ambiente naturale e delle sue interazioni con l'antropizzazione è alla base della previsione degli eventi che possono minare l'incolumità della popolazione e delle infrastrutture, pubbliche e private e, ove la previsione non sia stata sufficiente, rappresenta il punto di partenza per la progettazione degli interventi finalizzati al ripristino ed al miglioramento delle condizioni di sicurezza dei siti colpiti.
Recentemente la tecnologia ha fornito un gran numero di soluzioni che permettono di creare e simulare situazioni di rischio in modo decisamente rapido ed efficace. L'utilizzo di *software* ad elevate prestazioni e la diffusione a pioggia dei dati ottenuti ha però spesso indotto i non addetti ai lavori a confondere l'evento con la sua modellizzazione; è invece di fondamentale importanza ricordare che un modello è solamente un sistema di rappresentazione della realtà che deve essere abbandonato o rielaborato nel momento in cui nuove informazioni indichino l'incapacità di descrivere correttamente il fenomeno per il quale era stato predisposto.
Diventa quindi di fondamentale importanza la verifica dei modelli sul campo ed è qui che si incontrano le difficoltà maggiori soprattutto in termini di costi. Si tratta infatti di coinvolgere personale multidisciplinare in verifiche che riguardano porzioni di territorio non sempre di facile e sicuro accesso.

La tecnica del rilievo mediante scansione laser elitrasportato presenta aspetti di particolare interesse per applicazioni finalizzate al monitoraggio e la conoscenza di fenomeni franosi, e di dissesto idrogeologico in genere, in aree difficilmente accessibili.

2.Inquadramento geografico e geologico

Il bacino del torrente Miozza, ricadente all'interno del comune di Ovaro e per una piccola parte in quello di Raveo (provincia di UD), ha un'estensione areale di 10,55 km^2 con una quota massima di 2075 metri (Col Gentile) e minima all'apice del conoide con 511 metri.
Si trova a ridosso di un importante lineamento tettonico conosciuto come linea di Sauris (la carta geologica più recente ed aggiornata, di quest'area, è la *carta geologica delle Alpi carniche* edita dall'Università di Bologna alla scala 1:25.000, Venturini 2002). Questa faglia rappresenta un sovrascorrimento, appartenente allo stadio principale della fase neoalpina, che porta la successione permiana superiore ad accavallare i terreni carnici. In questa fase la σ_1 ha un orientamento prevalentemente N-S ed i corrispondenti lineamenti tettonici sono orientati E-W. Stesso orientamento presenta il lineamento che attraversa l'intera valle del corso d'acqua principale, in questo caso però si tratta di una faglia inversa ad elevato angolo che disloca ed accavalla le successioni permiane della formazione a Bellerophon sulle litologie scitiche della formazione del Werfen. Queste due formazioni, che rappresentano la litologia predominante dell'intero bacino, contengono altri sistemi secondari di faglie prevalentemente subverticali, talvolta a componente trascorrente.
Oltre il 40% della superficie del bacino è ricoperta da una coltre pluvio-colluviale formata da depositi morenici di fondo misti a detriti sciolti, che rappresenta un tipico materiale per l'innesco di fenomeni franosi superficiali.
Dal punto di vista geomorfologico l'area rivela la sua vocazione al dissesto, sia per le caratteristiche geolitologiche che per la situazione climatica peculiare della Carnia.
La testata del bacino è caratterizzata da rocce della formazione del Werfen, molto disgregate, per la presenza di numerosi piani di discontinuità, e pertanto facilmente erodibili. Sono qui riconoscibili morfologie, come la nicchia di distacco e alcuni lembi a quota 1160 m, riconducibili ad un'antico movimento franoso (AA.VV. 2005). Ed è proprio tale zona che funge da alimentazione con ingenti quantità di materiale lapideo per le colate detritiche (*debris flows*); fenomeni testimoniati dalla presenza di caratteristici depositi lobati e caotici nelle aree deposizionali a quote medio-basse.
Nella parte più elevata del bacino sono presenti numerosi canali, la cui confluenza concorre alla formazione dell'asta principale del torrente Miozza. Dopo un breve tratto a pendenza elevata ma prossimo all'equilibrio tra erosione e deposizione, si trova una lunga sezione con caratteristiche marcatamente deposizionali, con pendenza ridotta e larghezza dell'alveo dell'ordine di alcune decine di metri. Lungo questo tratto è presente una serie di briglie di trattenuta realizzate in tempi diversi e con diverse caratteristiche costruttive, alcune distrutte dalle recenti colate detritiche.

3 Dataset

3.1 Strumentazione

Per l'acquisizione multitemporale sono stati utilizzati due differenti sistemi. Nel 2004 è stato utilizzato un ALTM 3033 (Optech), mentre nel 2005 un ALTM 3100 (Optech).
Entrambi i sistemi si basano su di un laser operante nell'infrarosso vicino (λ= 1063 nm) che invia impulsi di luce alla frequenza di 33 KHz nel primo caso, variabile dai 33 ai 100 kHz a seconda dell'altezza di volo nel secondo, inoltre quest'ultimo sistema è in grado di registrare fino a 4 echi di ritorno.
Gli impulsi laser vengono diretti verso uno specchio oscillante che riflette gli stessi in senso ortogonale alla direzione di avanzamento dell'aeromobile dove l'intero sistema è alloggiato.
La scansione del terreno deriva dalla combinazione dei due movimenti, quello di oscillazione dello specchio e quello di avanzamento dell'aeromobile.

L'intero sistema è montato rigidamente sull'aeromobile la cui posizione viene determinata mediante soluzione GPS (*Global Position System*) ed unità IMU (*Inertial Movement Unit*).
Il calcolo della traiettoria del sistema avviene mediante misure GPS differenziali cinematiche utilizzando almeno una stazione fissa posizionata su di un punto noto entro 25 km dall'area del rilievo.
I ricevitori GPS utilizzati sono di tipo geodetico e permettono la misura su ambedue le bande L1 ed L2. L'elaborazione non avviene in tempo reale e viene effettuata mediante elaborazione cinematica con una frequenza di campionamento di 1 Hz.

3.2 Acquisizione

Il primo rilievo è stato eseguito con 13 strisciate nel giugno 2004 per conto della Direzione Centrale delle Risorse Agricole, Naturali e Forestali della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia nell'ambito del progetto INTERREG IIIB "Catchrisk", con densità media del rilievo di 2,5 punti per m^3.
Successivamente all'evento franoso del marzo 2005, la Protezione Civile della Regione, mediante il servizio di telerilevamento aereo, ha eseguito il secondo rilievo con una densità minima di 4 punti per m^3 per un'area di oltre 10 km^2.

3.3 Elaborazione dei dati

I dati acquisiti sono stati elaborati presso il gruppo di ricerca CARS (*Cartography and Remote Sensing*) Dipartimento di Geofisica della Litosfera dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS)
E' stata ricostruita la traiettoria assoluta del veivolo mediante GPS, determinando un punto ogni circa 35 metri. I dati di posizione sono stati poi integrati con quelli inerziali acquisiti con una frequenza di campionamento di 200 Hz, ottenendo in pratica una soluzione di posizione ed orientamento del sistema ogni circa 0.15 m. Utilizzando i parametri di posizione ed orientamento, i dati di range sono stati ricollocati spazialmente generando il prodotto base, che è un file vettoriale contenente i dati di tempo GPS, vettore di posizione e valore di intensità di retrodiffusione del laser (ampiezza) per ogni impulso misurato.
L'elaborazione è stata condotta ottimizzando i parametri di elaborazione sino ad ottenere uno scarto quadratico medio atteso inferiore ai 0.06 metri sul modulo del vettore di stato.

3.4 Fonti di errore e calibrazione

In generale, per un rilievo multitemporale o differenziale, risulta di primaria importanza minimizzare tutte le possibili fonti di errore derivate dalla pianificazione e dall'acquisizione.
Il grado di accuratezza dipende infatti da una serie vasta di fattori fra i quali si ricorda:

- la modalità di elaborazione del dato GPS (differenziale con L1, differenziale con L1 ed L2, assoluto, ecc.)
- dalla distanza fra la master ed il GPS montato a bordo del velivolo
- la corretta pianificazione del rilievo in termini di copertura GPS (numero di satelliti, PDOP prevista, comunicazioni NANU)
- dallo stato della ionosfera
- dallo stato della troposfera
- dalla presenza di *jamming* (disturbi)
- dalle modalità di esecuzione del rilievo stesso (esecuzione delle linee, traiettorie di ingresso nell'area del rilievo)

Altri fattori di perdita di accuratezza derivano dal sistema laser stesso:

- possibile indeterminazione della posizione angolare istantanea dello specchio
- errori sistematici nella determinazione del tempo intercorrente fra l'emissione e la ricezione dell'impulso
- possibile asincronia fra il tempo relativo ai dati GPS e quello relativo al dato laser.

Particolare attenzione è stata quindi rivolta alla calibrazione del rilievo:

- una prima calibrazione è stata effettuata mediante ripetuti passaggi su bersagli dimensionalmente noti. Un edificio lungo e piatto per la determinazione delle costanti di pitch e roll; una superficie piana, di lunghezza comparabile alla larghezza della strisciata (*swath*), per le calibrazioni di scala, di elevazione e di ritardo.
- Un'ulteriore calibrazione (*strip calibration*) è stata effettuata in corrispondenza dell'area del rilievo, mediante analisi incrociata fra i dati provenienti da scansioni ortogonali, in modo da affinare i parametri di *roll*, *pitch*, *heading* e scale precedentemente determinati, verificando così la stabilità degli stessi nel tempo

L'utilizzo del software *TerraMatch* ha permesso di determinare i parametri di angolazione dello specchio e il disallineamento tra il laser scanner e l'unità inerziale (IMU): il disallineamento viene espresso in termini di correzioni dei valori angolari (*heading*, *roll* e *pitch*) da apportare ai dati in fase d'elaborazione.

4. Metodologia

Per identificare il campo degli spostamenti, le volumetrie in gioco, gli spessori e le zone di accumulo di fenomeni franosi in generale, a partire dal confronto dei dati ottenuti mediante scansioni multitemporale bisogna, innanzitutto, provvedere ad una corretta e il più possibile precisa classificazione dei dati laser: ossia determinare i punti appartenenti al terreno (*ground*) da quelli appartenenti a vegetazione, edificato od altro.
La seconda operazione da compiere, quando il rilievo supera i 25~30 milioni di punti-terreno, consiste nello "sfoltimento" del dato, per permettere al calcolatore di effettuare la comparazione nonchè la creazione di un modello tridimensionale del terreno (o due, secondo il tipo di analisi scelta).
A questo punto, avendo dei validi e coerenti modelli digitali del terreno, si effettua la comparazione secondo 2 modalità:

1. fra due modelli digitali del terreno
2. fra un modello digitale ed una nuvola di punti

4.1 Classificazione

Una prima e grezza classificazione dei due rilievi è stata eseguita sull'analisi dall'eco e dell'intensità dei ritorni laser, individuando in tal modo oltre il 70% della vegetazione.

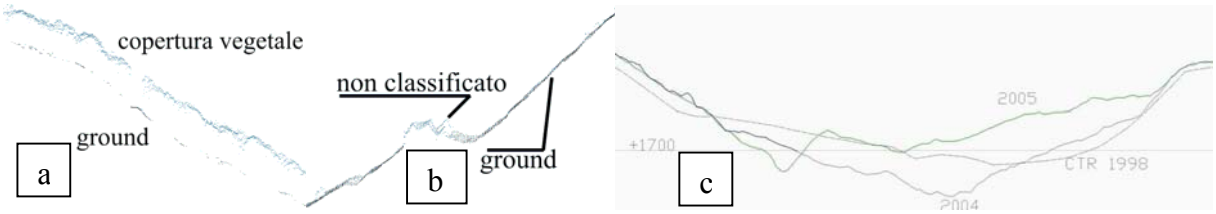

Figura 1 - a) Sezione con folta coperture vegetale nella zona di distacco della frana; b) Morfologie articolate nella parte alta del bacino c) Sezione della frana a quota 1700 metri.

Le classificazioni *unsupervised* sono certamente di estremo aiuto, ma in terreni morfologicamente articolati, come nello specifico caso studio, sono utili solamente per una prima e generale classificazione. Per tale motivo è necessario compiere una importante correzione da parte dell'operatore mediante lo studio di centinaia di sezioni lungo la massima pendenza ed il successivo affinamento della classe ground laddove l'algoritmo non riesca a risolvere correttamente la superficie del terreno.
Per ottenere il modello digitale del terreno è stato utilizzato quindi il filtro ground del programma *Terrascan* della *Terrasolid*, ad oggi considerato uno dei più completi per la gestione ed elaborazione di dati laser. Questo permette di classificare i punti appartenenti al terreno utilizzando la densificazione progressiva proposta da Axelsson (Axelsson 1999)
Utilizzando l'algoritmo di Axelsson in aree pianeggianti, con discreta copertura vegetale si ottengono eccellenti risultati anche in modalità *unsupervised*, ma il territorio in esame

presenta una topografia alquanto articolata, con pendenze elevate e una copertura vegetale in alcuni tratti così fitta da non permettere l'arrivo di parte del raggio laser anche per decine di m^2 (fig.1b). Si è visto che utilizzando tali filtri in maniera automatica le porzioni di territorio fortemente vegetate e quelle che presentavano accentuate convessità e ondulazioni non venivano classificate come terreno (fig.1a).
Per ottenere un miglior risultato si è resa indispensabile una classificazione manuale in porzioni di tali aree, imponendo poi, per un arricchimento dei punti terreno, un ulteriore filtraggio *ground*, usando come *seed points* i punti appartenenti al terreno precedentemente classificati.

4.2 Comparazione

L'analisi multitemporale o comparazione è l'operazione che misura la differenza fra 2 o più oggetti. La stima del movimento franoso viene quindi effettuata comparando il modello digitale pre-evento con il rilievo post-evento.
La comparazione fra il modello digitale del terreno del rilievo 2004 con la nuvola di punti 2005 è stata elaborata con *Iminspect* di *Polyworks* modulo per la comparazione e manipolazione dati laser. L'operazione risulta molto interessante in quanto il *software* permette di stimare il movimento non solo altimetricamente (z), lungo la direzione E-O (x), lungo la direzione (y), lungo la minima distanza (shortest) o lungo una direzione definità dall'utente che ragionevolmente per una frana sarà quella della massima pendenza.
Nella figura 2a è rappresentata la comparazione, nella zona di accumulo, fra il modello triangolato (rilievo 2004) e la nuvola di punti della scansione 2005. Sono ben evidenti i depositi della colata detritica che in alcuni punti superano abbondantemente i 5 metri. Per ulteriori analisi l'*error map* può venir esportato in formato ascii dove oltre l'informazione spaziale (tripletta x,y,z) viene associata l'informazione dello spostamento con le modalità precedentemente descritte (*shortest* nel caso della figura 2a), possono essere altresì visualizzati ed esportati in ambiente CAD i vettori spostamento.

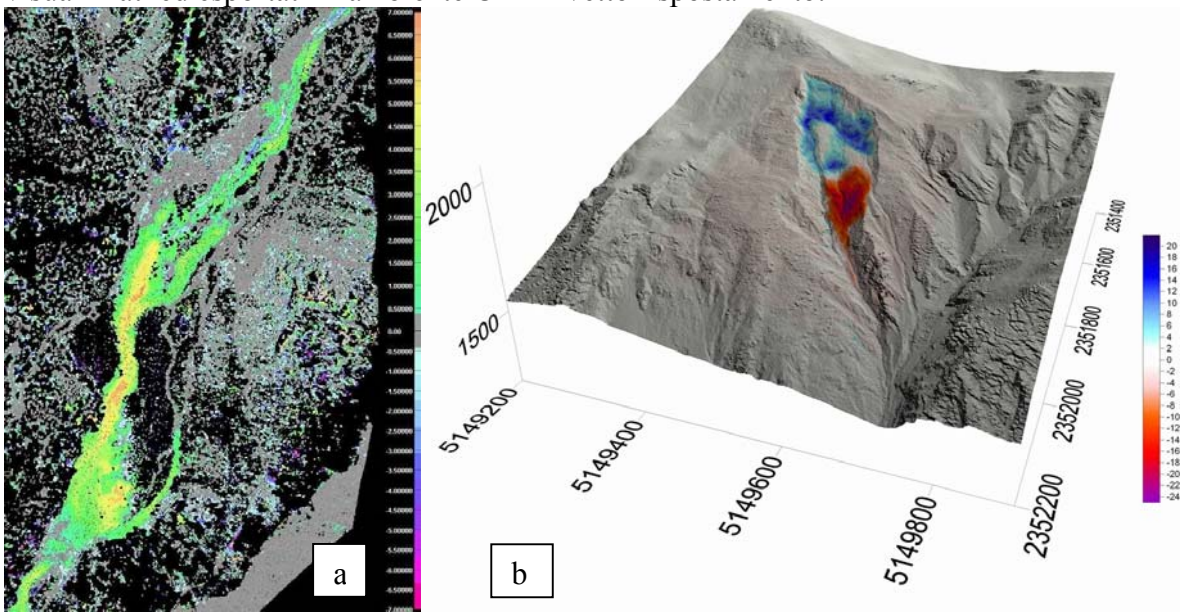

Figura 2 - a) Spessori dei depositi di colata nella parte bassa del bacino. b) Spostamenti nella zona di distacco della frana.

Per i calcoli volumetrici sono stati creati con *Surfer* modelli digitali 2D e mezzo delle due scansioni, tramite maglia regolare a passo 0.5 metri in modalità *kriging*, dei rilievi. Attraverso l'operazione *Math* è stata eseguita una sottrazione tra i due DTM che a portato le seguenti valutazioni: nella zona di distacco il volume positivo ossia il materiale depositato nella parte superiore è di 84.300 m^3 (fig.2b), il volume movimentato risulta essere di 204.200 m^3 . Nella parte inferiore del bacino la volumetria dei depositi risulta essere di poco inferiore a 245.000m^3, contributo anche della mobilitazione di terra e detriti dell'intero bacino. Analisi

simili sono state eseguite anche con l'applicativo *TerraModeler* con la funzione matematica più accurata *compute prismoidal quantity* ed ha prodotto risultati paragonabili.
Recentemente sono stati effettuati diversi rilievi topografici di dettaglio, con stazione totale e GPS topografico, per scopi relativi alla progettazione di interventi di sistemazione dell'are compresa tra il guado di quota 674 m slm e la briglia di quota 620. Un confronto tra questi rilievi ed il primo rilievo laserscan ha portato ad evidenziare che i depositi dell'evento franoso ha superato i quattro metri di spessore in perfetto accordo con la comparazione fra le due scansioni.
Sono stati, inoltre, estratti i profili lungo l'asta torrentizia e sezioni ogni 50 metri in maniera automatica, riportate quindi in elaborati CAD fruibili e leggibili dai tecnici operanti sui futuri cantieri per la messa in sicurezza e ripristino del bacino.

Conclusioni

Tale approccio, allo stato attuale, non può considerarsi come monitoraggio di fenomeni franosi in senso stretto in quanto sia la risoluzione e la metodologia del rilievo che i lunghi tempi per una corretta classificazione ed elaborazione della nuvola di punti non permettono di dare risposte tempestive e segnalazioni di allerta per qualsiasi tipo di dissesto. Inoltre i costi relativamente elevati, che comunque non potranno scendere più di tanto considerando la necessità di supporto di elicotteri o aeroplani, non consentirebbero un'elevata frequenza nei rilievi.
Tale articolo vuol però sottolineare come la comparazione multitemporale di dati laser scan elitrasportate permetta una elevata precisione qualitativa e quantitativa, vincente rispetto a qualsiasi altro metodo di rilievo, permettendo:

- analisi geomorfologiche accurate su modellazioni delle singole scansioni
- stima di spostamenti
- calcoli volumetrici
- verifica di movimenti su interi bacini in aree inaccessibili o comunque che presentano difficoltà per rilievi topografici tradizionali e aereofotogrammetrici (tipologia del terreno, copertura vegetale, ecc.).

L'operazione dove bisogna prestare maggior cura e attenzione è quella della classificazione del dato in quanto un buon *dataset* di punti-terreno risulta essenziale per tutte le successive analisi multitemporale del fenomeno franoso, l'operazione sarà giocoforza semiautomatica e condotta da un geologo o da un operatore con spiccata sensibilità geomorfologia. La metodologia risulta così vincente, oltre che per le straordinarie analisi geomorfologiche
Durante la stesura del presente articolo si avuta la possibilità di testare la metodologia sulla recente colata lavica dell'Etna, con risultati eccellenti sia dal punto di vista dell'analisi multitemporale sia delle tempistiche di elaborazione, particolarmente rapide (meno di 30 minuti), dovute alla completa assenza di vegetazione che ha permesso di evitare completamente il gravoso passaggio della classificazione manuale.
Quest'ultima esperienza apre sicuramente nuove ed ulteriori prospettive nel campo del monitoraggio e modellazione di colate laviche.

Bibliografia

AA.VV. (2005), *La prevenzione del rischio idrogeologico nei piccoli bacini montani della regione: esperienze e conoscenze acquisite con il progetto CATCHRISK*, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, pp. 206
Axelsson P. (1999), *Processing of laser scanning data - algorithms and applications*. ISPRS Journal of Photogrammetry & RemoteSensing, vol. 54, pp. 138-147.
Venturini C. Pondrelli M., Fontana C., Delzotto S. & Discenza K., (2002), *Carta geologica delle alpi carniche*, scala 1:25.000, S.EL.CA Firenze, 990 kmq