

Fotogrammetria digitale terrestre per la realizzazione del modello 3D di un ravaneto storico delle Alpi Apuane

Giacomo FIRPO(*), Riccardo SALVINI(*)

(*) Centro di Geotecnologie - Università di Siena, Via Vetri Vecchi 34, 52027 S. Giovanni Valdarno (AR), tel.+39 055 9119132, fax. +39 055 9119439, e-mail: firpo@unisi.it, www.geotecnologie.unisi.it

Riassunto

Gli agri marmiferi di Carrara, nelle Alpi Apuane, rappresentano l'esempio classico di un territorio interessato da un elevato impatto antropico dovuto all'intensiva attività di coltivazione ed estrazione di marmo. La zona, d'altra parte, è caratterizzata dalla presenza di strutture antiche realizzate dall'uomo di particolare interesse culturale, come "tagliate" (tecniche di lavorazione nelle cave di marmo d'epoca romana) o "ravaneti" (coltri detritiche costituite dal materiale di scarto dell'attività estrattiva), che costituiscono un'importante testimonianza storica delle attività di sfruttamento del bacino marmifero dai tempi più antichi.

Considerata la dinamicità dell'evoluzione morfologica dell'area, talvolta tali antiche strutture possono essere soggette a smantellamento nei casi in cui la loro ubicazione interferisca con l'attività di sfruttamento prevista dagli attuali piani di coltivazione. Da ciò è nata la necessità da parte dell'Autorità Comunale di creare un prodotto che abbia la funzione di "memoria storica" della struttura smantellata e che costituisca non solo un supporto visivo (come una semplice fotografia), ma un supporto informativo più completo, dotato di caratteristiche geometriche esaustive ed in grado di garantire una visualizzazione dell'elemento d'interesse nelle tre dimensioni.

Nel presente lavoro viene presa in esame la costruzione di un modello tridimensionale di un ravaneto storico mediante l'utilizzo di tecniche di fotogrammetria digitale terrestre.

Vengono esaminate le fasi di acquisizione dei fotogrammi mediante barra fissa calibrata, orientamento e triangolazione, estrazione di modelli digitali di superficie (*Digital Surface Model - DSM*), produzione di elaborati ortofotografici e modellazione tridimensionale.

Abstract

The Carrara Marble District (Apuan Alps) represents a typical example of great human impact related to intensive quarry activities. Furthermore, the area is characterized by the presence of ancient anthropical features of particular cultural interest, like "tagliate" (cuttings referred to marble excavation techniques of roman age) or "ravaneti" (debris of masses rejected by the excavation), that are an important historical evidence of the quarry activities since ancient times.

Considering the rapid morphological evolution of the area, sometimes these ancient features can be removed when their presence disturbs the approved actual excavation plans.

When it happens, like in this case study, the Municipal Authority requires functional digital models able to represent the "historical memory" of the feature to be destroyed not only as a simple picture, but as a more complex instrument with three-dimensional information that can be easily visualized.

In this work the realization of a 3D model of an historical mass of rock by the collection of data coming from digital terrestrial photogrammetry has been analysed.

In this paper the all phases of photograph acquisition by means of a calibrated aluminium bar, orientation and aerial triangulation, digital surface model extraction, orthophotos production and 3D model realization have been treated.

Introduzione

In data 15 Settembre 2005 in località “Tagliata Orsini” (Figura 1), nel Bacino Marmifero dei Fantiscritti, nel Comune di Carrara, è stato effettuato un rilievo fotogrammetrico con la finalità di produrre un modello tridimensionale di una zona adibita a ravaneto.



Figura 1 – Particolare della tecnica di lavorazione d’epoca romana nella Tagliata Orsini

La Figura 2 mostra l’ubicazione dell’area di studio caratterizzata dall’affioramento di marmi sia di tipo Ordinario che Nuvolato. L’ordinario, affiorante soprattutto a monte del ravaneto, è un marmo di colore bianco a grana medio-fine con macchie e venature grigie dovute alla presenza di pirite microcristallina allungate secondo i piani di scistosità primaria (Meccheri, 1980).

Il nuvolato ha una grana più fine ed il suo colore, grigio o grigio scuro, è dovuto al maggior contenuto di pirite micronizzata; è solcato da venature chiare, abbastanza regolari disposte sui piani di scistosità primaria che, in questa varietà, è abbastanza marcata.

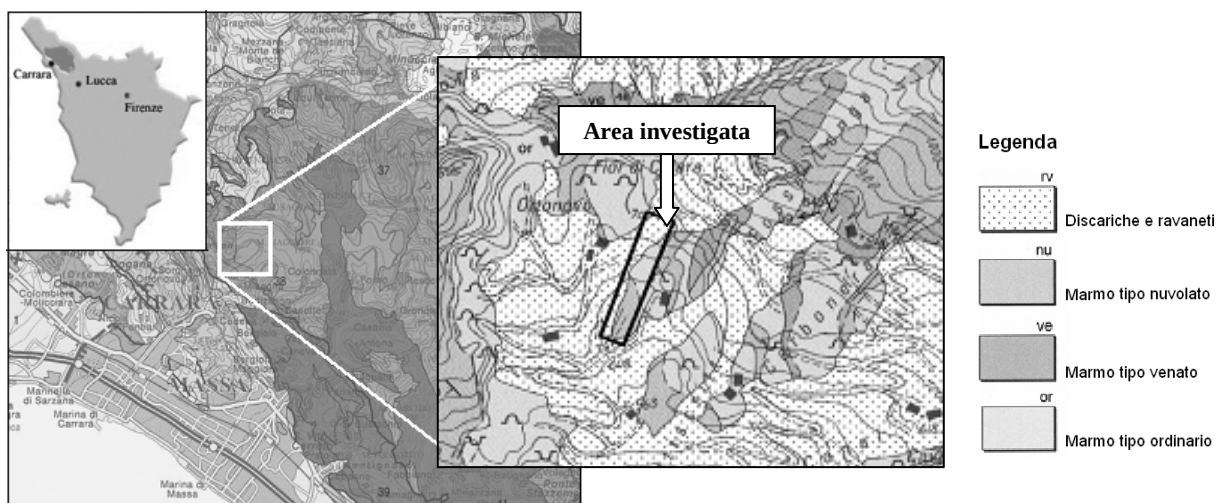


Figura 2 – Area di studio (base cartografica Meccheri, 1996)

La zona di interesse, di natura antropica e risalente al primo ventennio del secolo scorso, si sviluppa in direzione NNE – SSW per circa 200m con un fronte prossimo alla verticalità che si eleva fin’oltre i 50 m (Figura 3).

Il valore storico del ravaneto è legato alla presenza di strutture antropiche peculiari di particolare interesse culturale: nel settore meridionale ed in quello settentrionale sono presenti morfologie

caratteristiche legate alla viabilità ed alle tecniche di trasporto ed accumulo del materiale di scarto oggi non più in uso e difficilmente riscontrabili in tutto l'agro marmifero carrarese. Le evidenti forme ondulate presenti sul lato sinistro delle foto di Figura 3, ad esempio, sottendono ad un'antica via di lizza lungo la quale in passato si caricavano i blocchi di marmo per farli scivolare a valle fino al luogo di caricamento mediante una sorta di slitta di legno.



Figura 3 – Fronte rilevato; il box nero identifica la zona di particolare interesse storico-culturale

Analisi

Le attività svolte allo scopo di rappresentare con il maggiore dettaglio possibile e precisione geometrica la zona di studio si sono così articolate:

- presa fotogrammetrica del ravaneto tramite barra fissa calibrata e camera fotografica digitale;
- rilevamento topografico del ravaneto mediante Stazione Totale Laser e GPS;
- orientamento fotogrammetrico delle strisciate e triangolazione aerea;
- estrazione automatica dei modelli digitali della superficie (DSM) del ravaneto e relativo *editing* in stereoscopia con inserimento delle principali *breaklines*;
- mosaicatura dei DSM;
- costruzione delle ortofoto relative ai singoli fotogrammi e successiva mosaicatura;
- costruzione di modelli 3D mediante sovrapposizione dell'ortofoto al DSM.

La presa terrestre è stata eseguita mediante l'utilizzo di una barra fotogrammetrica in alluminio collocata su un cavalletto topografico. La sovrapposizione laterale dei fotogrammi è stata garantita per un minimo del 70% mediante il calcolo del "piano di volo" considerando la distanza dei punti di presa dal ravaneto e la lunghezza focale della camera digitale utilizzata (Nikon® Coolpix 5000). Per questo lavoro sono state realizzate 2 strisciate distinte che hanno determinato la copertura fotografica completa del ravaneto; le strisciate sono state eseguite secondo direzioni diverse, la prima a 192° e la seconda a 217° rispetto al Nord, con la strumentazione posizionata in un gradone artificiale posto nel fronte antistante il ravaneto. Al fine di non rinunciare alla visione stereoscopica d'insieme né a quella di dettaglio, per ogni strisciata sono state scattate foto con 3 diverse lunghezze focali (21.4 mm; 13.6 mm; 7.1 mm). Per risolvere le equazioni di orientamento dei fotogrammi, nella ricostruzione dei modelli stereoscopici di foto aeree attraverso tecniche fotogrammetriche convenzionali, si utilizzano solitamente come punti di appoggio le coordinate di punti notevoli riconoscibili sulle foto. Nel caso di una parete di cava o di un ravaneto sub-verticale come quello in esame, la rappresentazione cartografica convenzionale purtroppo è molto limitata, in quanto, questi fronti sono rappresentati da linee simboliche come scarpate, linee di cresta o dirupi, anche in caso di basi topografiche dettagliate. Per ovviare all'assenza d'informazioni topografiche di dettaglio è

quindi indispensabile modificare il piano di rappresentazione cartografica; questo non sarà più orizzontale ma verticale e, preferibilmente, circa parallelo all'andamento del fronte roccioso ed alle camere fotografiche (Kasser, Egels, 2002). E' stato quindi effettuato un rilievo topografico locale di dettaglio, collimando marker naturali ed artificiali traggurati con una Stazione Totale Laser Leica® (*reflectorless*) TCRP 1202 R300. Tale rilevamento ha permesso la misura di 57 GCP (*Ground Control Point*), aventi una terna di coordinate X, Y, Z note sia nel sistema di riferimento locale che assoluto, da utilizzare per la risoluzione delle equazioni di orientamento. Le coordinate terreno sono state ricavate dal rilievo mediante tecnica GPS differenziale del punto di origine delle misure topografiche effettuato in modalità statica e opportunamente post-processato rispetto alla stazione più vicina (Lucca) distante 40 km circa in linea d'aria che, essendo nelle condizioni limite di *baseline*, garantisce una precisione di $\pm 5-10$ cm. Alla fase di rilevamento in campagna sono seguite le operazioni di laboratorio che prevedono inizialmente l'orientamento interno dei fotogrammi; nel presente lavoro è stato utilizzato per tutte le operazioni di orientamento il modulo *LPS* del software ERDAS® *IMAGINE* 8.7. Per l'orientamento interno, non disponendo della calibrazione della camera fotografica, sono stati utilizzati solamente i dati relativi alle varie lunghezze focali ed i valori di dimensione del *pixel* ($3.44\mu\text{m}$). Eseguito l'orientamento interno si è proceduto all'orientamento relativo ed esterno tramite l'utilizzo di *Tie Point* e di GCP determinati durante il rilievo topografico, entrambi il più possibile omogeneamente distribuiti nelle foto. I *Tie Point* sono stati inseriti manualmente e in automatico mediante gli algoritmi di autocorrelazione d'immagine presenti nel software; per i punti generati secondo questa metodologia, considerata la complessità radiometrica e morfologica del soggetto fotografato, si è resa necessaria un'accurata verifica da parte dell'operatore. La procedura di triangolazione aerea ha consentito di orientare rispetto al sistema di riferimento locale i fotogrammi e di valutare l'RMSE (*Root Mean Square Error*) di entrambe le strisciate. Nel presente lavoro vengono prese in considerazione le strisciate relative agli scatti effettuati solamente con lunghezza focale pari a 13.6 mm, perché nell'analisi d'immagine sono stati valutati adatti alla contemporanea conservazione della visione d'insieme e di un buon dettaglio. Per il blocco relativo alla strisciata N192° si è ottenuto un RMSE di 0.3411 pixel corrispondente, per un valore medio di scala di 1:200, a circa 1 cm a terra, mentre per quello relativo alla strisciata N°217 si è ottenuto un RMSE di 2.2835 pixel corrispondente a circa 7 cm. Accettato il risultato della triangolazione aerea, si è proceduto con le operazioni di costruzione del modello 3D del ravaneto in studio. Per questo si è operato secondo *steps* successivi che, in primo luogo, hanno riguardato la creazione dei DSM relativi alle due strisciate precedentemente orientate. I DSM per le zone in stereoscopia sono stati estratti in modo automatico, sempre mediante algoritmi di autocorrelazione d'immagine in formato vettoriale puntuale *3D Shape*; l'*output* dell'operazione è costituito da una nuvola di punti uniformemente distribuiti sul fronte contenenti l'attributo Z rappresentativo della quota sul piano di riferimento verticale (profondità di campo fotografico). A partire dai DSM generati in formato puntuale, per entrambe le strisciate si è costruito il relativo TIN (*Triangular Irregular Network*) utilizzando algoritmi di interpolazione lineare disponibili nel software ESRI ArcMAP® 9.0.

Analizzando i TIN così ottenuti, si sono potute mettere in evidenza le zone in cui la carenza di informazioni altimetriche corrette, derivanti dalla procedura fotogrammetrica automatica, si manifestava sul modello con errori morfologici non tollerabili (questo è avvenuto soprattutto nelle zone caratterizzate dalla presenza di vegetazione ed in quelle che mostravano importanti variazioni di quota lungo distanze ridotte).

Al fine di operare un miglioramento della rappresentazione, sono stati quindi eliminati e nuovamente restituiti dei punti e introdotte manualmente delle "linee di rottura" del pendio (*breaklines*) restituite dall'operatore in stereoscopia (Figura 4). Trattandosi di elementi lineari generalmente usati per definire e controllare l'andamento e l'attendibilità delle superfici generate dal TIN anche in zone morfologicamente irregolari, per questo lavoro sono state inserite antiche vie di lizza, scalini, e tutte le forme irregolari e/o radiometricamente complesse difficilmente

individuabili dagli algoritmi di autocorrelazione. I nuovi elementi puntuali e le *breaklines* sono stati restituiti utilizzando il modulo *Stereo Analyst* di ERDAS[®] IMAGINE 8.7.

Tutti gli elementi vettoriali restituiti sono stati utilizzati per la costruzione di nuovi TIN insieme alle informazioni altimetriche correttamente estratte dagli algoritmi di autocorrelazione. I DSM così ottenuti sono risultati più attinenti al reale andamento della morfologia come dimostrato dal collaudo effettuato mediante confronto tridimensionale con punti topografici misurati durante il rilievo (RMSE di circa 5 cm sul piano orizzontale e 7 cm su quello verticale).

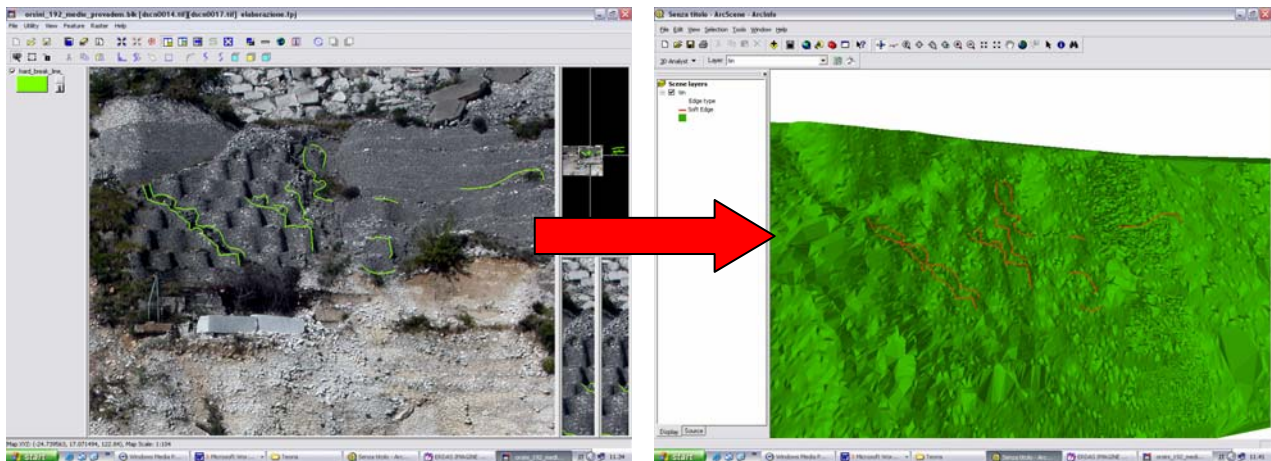


Figura 4 – Stereorestituzione delle *breaklines* e loro integrazione nella costruzione dei TIN

A partire dai DSM creati indipendentemente per ogni strisciata, al fine di ottenere una rappresentazione unica della porzione di territorio di cui creare il modello, si è prodotto un unico TIN della zona mediante operazioni GIS di *mosaicing*. A partire dal DSM così creato e dall'orientamento delle strisciate fotografiche è stato possibile produrre le ortofoto digitali dell'intero ravaneto (*pixel size* 1 cm) che opportunamente mosaicate hanno consentito di rappresentare in modo geometricamente corretto il ravaneto in studio; mediante il software ESRI ArcScene[®], sovrapponendo il mosaico di ortofoto creato alla versione finale del DSM corretto, si è ottenuto il modello tridimensionale di Figura 5.



Figura 5 – Veduta prospettica del modello tridimensionale dell'area investigata (sovrapposizione dell'ortofoto al DSM)

Conclusioni

Attraverso le metodologie utilizzate in questo lavoro, è stato possibile dar luogo ad un modello che ha funzione sia di supporto visivo, quindi un elemento che può essere archiviato ed utilizzato come “memoria storica” del ravaneto (considerato il suo imminente smantellamento per fini commerciali

destinato alla macinazione del pietrame ai fini della produzione di carta e cosmetici), sia di supporto informativo, in quanto, avendo caratteristiche geometriche ben definite, può essere utilizzato per operare misurazioni nelle 3 dimensioni. Il modello è al momento inquadrato in un sistema di riferimento locale, quello cioè utilizzato per le operazioni di orientamento ed ortorettifica delle foto, scelto e mantenuto in continuità con gli scopi dello studio; questo aspetto, però, non costituisce un limite, poiché, considerata la disponibilità del dato GPS, mediante semplici operazioni di roto-traslazione, esso è facilmente riferibile al sistema assoluto.

Un doveroso approfondimento merita il grado di precisione del rilievo fotogrammetrico del fronte, ovvero l'operazione di acquisizione dei punti che costituiscono il DSM; nel caso in questione, visto il grado di dettaglio informativo richiesto, si è ritenuto sufficiente l'utilizzo di tecniche fotogrammetriche che consentono sia l'osservazione dell'oggetto di studio mediante ortofoto, sia il rilievo di un elevato numero di punti necessari alla ricostruzione tridimensionale del ravaneto. Deve essere però considerato che le tecniche fotogrammetriche d'estrazione automatica del DSM trovano ostacolo in aree radiometricamente complesse quali zone vegetate e aree con grande variabilità di esposizione alla luce solare come il marmo. Il rimedio a queste lacune in fotogrammetria è posto solamente da un accurato *editing* da parte dell'operatore, operazione quest'ultima che richiede molto tempo e che dipende da una buona visione stereoscopica ottenibile soltanto con una grande distanza tra gli scatti (cosiddetta "base aerea"). Questa condizione è difficilmente disponibile in un piazzale di cava e ancor più in una postazione di scatto come quella in esame, ridotta di estensione e situata alcune decine di metri al di sopra del piazzale stesso.

Qualora, invece, vi fosse stata la necessità di una maggiore precisione, ricercando dettaglio e fedeltà più spiccati nella riproduzione di ben distinti elementi presenti sul fronte, di dimensioni anche sub-centimetriche, si sarebbe ricorso all'utilizzo di strumentazione *Laser Scanner*. Questa soluzione avrebbe permesso la creazione di un DDSM ("*Dense*" *Digital Surface Model*) la cui precisione e abbondanza di informazioni legate alla maggiore densità di punti costituenti la nuvola rilevata, avrebbe consentito la produzione di ortofoto di maggiore dettaglio a partire dal rilievo fotogrammetrico effettuato (Ravelli et al., 2005; Salvini et al., 2005).

Riferimenti bibliografici

Kasser M, Egels Y. (2002), *Digital Photogrammetry*, Taylor & Francis, 300-310.

Meccheri M. (1980), *I marmi del carrarese: carta geologico-strutturale e varietà merceologiche*, Università di Siena.

Meccheri M. (1996), *Carta Geologico-Strutturale delle varietà merceologiche dei Marmi del Carrarese*, Università di Siena.

Ravelli M, Clerici A, Sgrenzaroli M, Vassena G. (2005), "L'impiego del Laser Scanner Terrestre nel rilevamento geologico-tecnico: dallo studio dell'ammasso roccioso al monitoraggio delle attività estrattive". 9° *Conferenza Nazionale ASITA*, 2:1727-1732.

Salvini R, Anselmi M, Fantozzi P.L. (2005), "Fotogrammetria digitale terrestre e laser scanner per lo studio della stabilità dei fronti nelle cave di Marmo di Carrara". 9° *Conferenza Nazionale ASITA*, 2:1805-1810.