La fotogrammetria d'archivio per lo studio della frana di Scascoli (Bologna)

Giorgia Gatta, Alberto Landuzzi, Antonio Zanutta

DICAM - Università di Bologna, viale Risorgimento 2, 40136 Bologna (giorgia.gatta; alberto.landuzzi; antonio.zanutta)@unibo.it

Riassunto

I fotogrammi aerei storici rappresentano una risorsa preziosa al fine di studi multitemporali sul territorio, a supporto di indagini storiche sull'evoluzione di specifici fenomeni ambientali e del confronto con situazioni riferite a periodi storici differenti. A partire dalle informazioni del passato impresse su tali supporti la fotogrammetria digitale, in questo caso "d'archivio", risulta una tecnica molto potente, in quanto permette la ricostruzione di modelli tridimensionali del terreno riferiti a determinati periodi storici.

Il presente studio mostra l'applicazione della tecnica fotogrammetrica d'archivio all'area di Scascoli (frazione di Loiano, provincia di Bologna) e di parte della valle del torrente Savena. L'area di studio risulta di notevole interesse, in quanto è stata soggetta più volte a fenomeni di instabilità, legati più o meno direttamente alla presenza di una grande frana quiescente nel fianco destro della valle.

Allo scopo si sono utilizzati fotogrammi aerei del 1976 in forma di positivi, convertiti in forma digitale mediante scanner metrico. L'orientamento dei fotogrammi è stato ottenuto mediante una procedura iterativa di triangolazione, che si è avvalsa di punti fotogrammetrici di appoggio appositamente rilevati nel 2007. La creazione di un modello digitale del terreno nell'area di interesse e la generazione di prodotti vettoriali (restituzione sul modello stereoscopico) e raster (ortofoto) hanno permesso di analizzare la situazione dell'area com'era nel 1976; in particolare, la creazione del profilo altimetrico del torrente Savena, in corrispondenza del piede della grande frana quiescente, ha permesso di valutare lo stato di avanzamento dell'erosione torrentizia dal momento in cui la stessa frana ha sbarrato il fondovalle. La configurazione plano-altimetrica dell'alveo del Savena, fortemente alterata dalla messa in posto del corpo di frana, non è ancora ritornata alle condizioni di equilibrio in cui si trovava prima di tale evento.

Abstract

Historical air photos are valuable tools for the multi-temporal analysis of landforms. They support investigations on the historical evolution of single environmental phenomena, as well as comparisons between similar phenomena in different historical periods. Powerful techniques of digital "archive photogrammetry" have been developed, in order to reconstruct 3D ground surface models related to different historical periods.

This paper describes an application of archive photogrammetry to the geomorphology of the Savena Valley in the surroundings of Scascoli (Loiano, Bologna, Italy). The study area is peculiarly interesting for the manifold occurrence of slope instability phenomena, more or less directly related to a large dormant landslide in the SE valley side.

For this purpose, four 1976 positive air photographs, converted into a digital form by means of a metric scanner, have been used. An iterative triangulation procedure was made using ground control points surveyed in 2007. The elaboration of a digital terrain model of the study area, with the generation of vector and raster products, allowed us to analyse the Scascoli landscape as it was in

1976. Particular attention was paid to the restitution of the altitude profile of the Savena stream, partly corresponding to the toe of the large dormant landslide. Several knickpoints in this profile display the progress of stream erosion from the time when that landslide dammed the valley floor. The plan-altitude configuration of the Savena riverbed has been deeply altered by the emplacement of the large landslide, and has not yet come back to its primitive balance between erosion and sedimentation.

Introduzione

Applicazioni legate all'analisi di fenomeni ambientali che si evolvono nel lungo periodo necessitano spesso di dati metrici storici. Inoltre, per comprendere appieno tali fenomeni, occorre che i dati storici siano distribuiti in un range temporale sufficientemente ampio (da qualche anno a qualche decade).

Per quanto riguarda l'analisi dell'ultimo secolo, questa informazione può derivare dal grande patrimonio aereofotogrammetrico storico di cui oggigiorno si dispone, a partire dalle prime riprese aeree degli anni Trenta del XX secolo (Bitelli et al., 2006). Sfruttando le potenzialità della tecnica fotogrammetrica, in questo caso detta "d'archivio", i fotogrammi aerei storici permettono di valutare i fenomeni non solo dal punto di vista qualitativo, ma anche dal punto di vista quantitativo (Chandler et al., 2002). Ciò significa la possibilità di estrarre informazioni di tipo metrico dai fotogrammi storici e quindi la possibilità di confrontare, in un'ottica multitemporale, differenti situazioni storiche relative al fenomeno in esame.

In campo ambientale, la Fotogrammetria d'Archivio trova applicazione nello studio delle dinamiche territoriali del paesaggio in generale, nel controllo di movimenti di ghiacciai e nell'analisi multi-temporale di corpi franosi (Zanutta et al., 2006). Il presente studio vuole costituire un esempio di come con la tecnica fotogrammetrica d'archivio sia possibile estrarre informazioni metriche d'interesse per l'analisi storica di un corpo franoso; nel caso specifico la frana risulta di notevole in-teresse non solo per il tipo di fenomeno, ma anche per le condizioni in cui esso s'inserisce nel contesto ambientale della zona.

Inquadramento geologico dell'area di studio

L'area oggetto del presente lavoro è centrata sulla grande frana quiescente che caratterizza il versante SE delle Gole di Scascoli, situate nel comune di Loiano (fig. 1). Si tratta di una frana per scivolamento rototraslativo multiplo, che ha coinvolto circa 20 Mmc di roccia in uno spostamento complessivo variabile tra 200 m e 400 m (Landuzzi & Bernagozzi, 1996). L'età della frana non è nota, anche se può essere stimata in un migliaio di anni. Le unità stratigrafiche interessate dal movimento franoso sono la parte superiore della Formazione di Contignaco, il Gruppo di Bismantova e la parte inferiore della Formazione di Monterumici (fig. 2). I principali fattori geologici responsabili della frana sono: i) la presenza di livelli argillosi particolarmente deboli nella Formazione di Contignaco; ii) la giacitura della stratificazione, a franapoggio meno inclinato del pendio; iii) la presenza di faglie subverticali in corrispondenza degli attuali fianchi del corpo di frana. Le cause preparatorie e scatenanti della frana non sono note. Il movimento franoso ha avuto una velocità di picco sufficientemente elevata da ostruire il fondovalle del T. Savena, formando un vasto lago di sbarramento e spostando l'alveo del torrente verso NW, a ridosso delle incombenti pareti arenacee del Gruppo di Bismantova. Dopo questo evento catastrofico il T. Savena ha profondamente inciso il cumulo di materiali che lo sbarrava, nel tentativo di ripristinare il proprio profilo d'equilibrio. Quest'attività erosiva ha tuttavia reso molto precaria la stabilità del piede di frana, dal quale si sono distaccate numerose frane minori, classificabili come colate e scorrimenti di detrito. Inoltre, grazie alla nuova posizione assunta dall'alveo, l'erosione del T. Savena ha potuto scalzare al piede le pareti arenacee del versante NW, predisponendo gli imponenti crolli di roccia che si sono verificati nel 1992, nel 2002 e nel 2005 (fig. 2). Attualmente, il piede della grande frana si sta muovendo, con una velocità media di 2 cm/a, su una superficie basale di scorrimento che si spinge fino a 5-7 metri sotto il Thalweg del T. Savena. (Gottardi et al., 2004). La mutua interazione tra la grande frana di Scascoli e l'attività erosiva del T. Savena ha determinato due situazioni di grave emergenza e un persistente stato di criticità per il tracciato della Strada Intercomunale di Fondovalle Savena. Per questo motivo, tanto la frana quanto gli ammassi rocciosi prospicienti sono stati e sono tuttora oggetto di monitoraggio con metodi topografici, piezometrici, inclinometrici ed estensimetrici.



Figura 1 – Inquadramento geografico dell'area della frana di Scascoli in comune di Loiano (BO).



Figura 2 – Carta geologica dell'area di Scascoli.

Per lo studio delle dinamiche ambientali della zona di Scascoli, può risultare di notevole interesse un'analisi multitemporale che investa l'ultimo secolo di storia della grande frana quiescente. A tal fine ci si può avvalere dei numerosi voli fotogrammetrici storici disponibili per l'area, che vengono a descrivere periodi diversi della storia della frana. Il presente studio, prendendo in esame un primo volo fotogrammetrico, si pone come inizio di un'analisi multitemporale del fenomeno in oggetto.

Materiale a disposizione

Ai fini del presente studio ci si è avvalsi di un volo fotogrammetrico eseguito sulla regione Emilia-Romagna nel 1976, alla scala di circa 1:15000. Il formato lastra è un classico 23x23 cm, con emulsione colore. La copertura stereoscopica dell'area di studio (la grande frana di Scascoli e l'alveo del T. Savena nel tratto di maggior interesse) è resa possibile da 4 fotogrammi disposti su 2 strisciate (fig. 3). La zona di frana si trova nella parte centrale della copertura stereoscopica.

I fotogrammi, sotto forma di positivi, sono stati convertiti in forma digitale mediante scanner fotogrammetrico di elevata qualità, ad una risoluzione di 2600 dpi ed una profondità colore di 24 bit. In fase di acquisizione, ci si è avvalsi di strumenti di correzione del colore (luminosità, contrasto e gamma sui singoli canali R, G e B), al fine di ottenere immagini con colori qualitativamente buoni e soprattutto omogenei tra i 4 fotogrammi, e di migliorare la visibilità in alcune zone critiche dei fotogrammi (come quelle rappresentate dalle gole di Scascoli) per facilitare la fase finale di restituzione (De Felicibus, 2010).

Le immagini sono state salvate in formato TIFF e successivamente convertite in JPEG2000 *lossless*, per diminuire le loro dimensioni senza pregiudicarne la qualità.



Figura 3 – I fotogrammi aerei del 1976 per l'area di Scascoli; cerchiata in arancione l'area di frana e delineata in blu la linea di volo.

L'elaborazione dei fotogrammi

L'elaborazione dei fotogrammi è stata effettuata all'interno di una stazione fotogrammetrica digitale di fascia alta. La fase di orientamento esterno è avvenuta mediante un processo di Triangolazione Aerea (TA), con una preventiva fase di orientamento interno che si è avvalsa dei dati di calibrazione forniti da specifico certificato.

Nel 2007 è stata effettuata una campagna di misure, allo scopo di rilevare alcuni punti a terra, da utilizzarsi successivamente come Punti Fotogrammetrici di Appoggio (PFA) in fase di triangolazione aerea. La scelta di quali punti rilevare è stata dettata da due esigenze: da una parte quella di disporre di punti invariati dal 1976 ad oggi, e che siano facilmente individuabili e collimabili sui fotogrammi (come spigoli di tetti di case), dall'altra quella di assicurare una distribuzione il più possibile omogenea dei PFA sull'area di ricoprimento stereoscopico dei fotogrammi, compatibilmente con le necessità logistiche, di trasporto della strumentazione e di buona visibilità del segnale GPS. Per ognuna delle 12 aree di stazionamento individuate (fig. 4), il rilievo dei punti (1-5 per ogni area) è avvenuto per polari, utilizzando una *total station* (per la misura di angoli e distanze verso i punti) integrata ad un ricevitore GPS RTK a doppia frequenza (per il calcolo delle coordinate dei punti di stazione, in modalità N-RTK a partire dalle stazioni GPS di riferimento all'interno della rete). Le coordinate dei punti sono state calcolate mediante compensazione ai minimi quadrati nel sistema UTM-WGS84, e successivamente trasformate nel sistema UTM-ED50, per una miglior integrazione con le basi cartografiche moderne di cui si dispone.



Figura 4 – Distribuzione dei PFA (in giallo) nella zona di ricoprimento stereoscopico dei fotogrammi (la cui impronta è nei colori del blu, da chiaro a scuro in ordine di acquisizione).

Al fine di validare i punti di controllo a terra, la procedura di triangolazione adottata è stata di tipo iterativo, inserendo i punti ad uno ad uno nel calcolo di TA. Con questo metodo è possibile evidenziare immediatamente i punti problematici, in quanto caratterizzati da residui alti in uscita dalla fase di TA. Occorre quindi stabilire a priori una tolleranza (in funzione della dimensione del pixel a terra, della precisione associata all'acquisizione delle coordinate dei punti, della tipologia del singolo punto, ecc.), al superamento della quale il punto deve essere considerato "critico". Residui alti possono infatti segnalare:

- incorrettezza di posizionamento del punto sui fotogrammi;
- errore di rilevamento a terra del punto;
- modifica del punto nel corso del tempo.

Nel caso in cui non si possa agire sulla posizione del punto per abbassare il residuo, esso deve essere scartato, per effettuare poi un nuovo calcolo di compensazione. In questo caso il valore di tolleranza è stato fissato pari al triplo degli errori calcolabili mediante le formule rigorose valide per acquisizione in assetto normale: circa 1,2 m in planimetria e 1,5 m in quota. Alla fine del processo di validazione, è stato dunque possibile disporre di più punti per 12 a-ree omogeneamente distribuite all'interno della zona di ricoprimento stereoscopico. Per ogni area è stato assunto 1 punto come PFA, 1 punto come controllo a posteriori (*check-point*), per valutare la qualità del calcolo di TA, e i rimanenti come punti di legame (*tie-point*), per irrobustire il modello. In tabella (fig. 5) si riportano i residui sui PFA e sui *check-point* ottenuti in fase di TA, in termini di scarto quadratico medio (RMS, *Root Mean Square*).

		numero	RMS [m]			
			Х	Y	Z	totale
control point error	PFA	12	0,45	0,47	0,55	0,81
	tie-point	46				
check point error	check-point	11	0,54	0,70	0,65	1,10

Figura 5 – Scarto quadratico medio sui control point e sui check-point (la cui distribuzione sui fotogrammi è mostrata in fig.4).

Prodotti ottenuti

Dato che l'evoluzione del corpo di frana risulta strettamente legata a quella del torrente Savena, il principale prodotto digitale ottenuto, a partire dal modello stereoscopico derivante dall'orientamento dei fotogrammi, è la restituzione vettoriale del torrente, con attenzione particolare al tratto di maggior interesse, cioè in corrispondenza del piede di frana. Dalla restituzione, eseguita per punti, è stato possibile ottenere il profilo altimetrico del torrente, riportando in grafico la variazione della quota del pelo libero in funzione della distanza planimetrica (fig. 6). Inoltre, sono stati restituiti vettorialmente in stereoscopia alcuni tratti salienti del corpo di frana (coronamento, scarpata principale, testata, piede, fianchi e scarpate minori).



Figura 6 – Profilo altimetrico del torrente Savena; sul grafico sono evidenziati: A) imbocco SW delle Gole di Scascoli, B) crolli del 2002, C) Mammellone 1, D) Mammellone 2. Gli stessi siti sono indicati nella carta geologica (fig. 2).

Il profilo altimetrico ha permesso di valutare lo stato di avanzamento dell'erosione operata dal fiume da quando la messa in posto della grande frana di Scascoli ne ha sbarrato il corso. Dal punto di vista dell'evoluzione geologica del corpo di frana, la situazione del torrente nel 1976 coincide praticamente con l'attuale: di conseguenza, l'analisi del profilo altimetrico può fornire indicazioni sul tempo che ancora manca al raggiungimento dell'equilibrio morfodinamico.



Figura 7 – Carta a curve di livello per l'alveo del torrente Savena e per la frana di Scascoli, con sovrapposte le restituzioni vettoriali dell'alveo (in blu) e del perimetro di frana (in rosso).



Figura 8 – Vista prospettica del versante di Scascoli nel 1976; il perimetro del corpo di frana quiescente è evidenziato in rosso.

Inoltre, attraverso il modello digitale del terreno che è stato creato, si sono generate le ortofoto sia per l'alveo del Savena, sia per il corpo di frana; esse rappresentano il prodotto cartografico più aderente all'attuale CTR 1:5000, in quanto la CTR è stata elaborata a partire dal volo aerofotogrammetrico del 1976. Infine, altri prodotti digitali correlati, come carte a curve di livello (fig. 7) e viste prospettiche all'interno del modello del 1976 (fig. 8), hanno permesso di simulare la situazione della zona nel 1976, agevolando l'analisi storica dell'area.

Discussione

In fase di restituzione vettoriale del profilo del torrente Savena sono stati individuati alcuni punti facilmente riconoscibili (imbocco SW delle Gole; crollo del 2002; "Mammellone 1"/crollo del 2005 e "Mammellone 2"/rischio di crollo attuale; fig. 2), che sono stati riportati sul profilo altimetrico ricavato (fig. 6). I punti individuati sono stati utilizzati come riferimento per il riconoscimento sul terreno e la successiva interpretazione delle principali caratteristiche geomorfologiche del profilo del T. Savena.

Il profilo restituito è diverso dalla curva ideale che rappresenta le condizioni di equilibrio morfodinamico di un corso d'acqua. La principale irregolarità si manifesta nelle Gole di Scascoli, dove l'acclività media dell'alveo torrentizio è maggiore di quella che si osserva più a monte, nella varice del Molino di Scascoli (fig. 6). Questa variazione di acclività si spiega principalmente col fatto che le Gole sono intagliate nella F.ne di Pantano (Gr. di Bismantova), assai meno erodibile delle unità adiacenti. Tuttavia, nonostante la sua resistenza, la F.ne di Pantano non affiora quasi mai nell'alveo del torrente, che si presenta ingombro di detriti fin quasi allo sbocco N delle Gole. Quest'anomalia dipende dal fatto che il T. Savena è stato molte volte sbarrato da frane. L'evento più importante si è verificato nell'antichità, con la discesa della grande frana dal versante destro delle Gole, ma numerosi eventi minori si sono susseguiti da quel momento fino a oggi. Per esempio, nel 1971 una frana per scorrimento di detrito si è distaccata dal piede della grande frana, mentre nel 1992, nel 2002 e nel 2005 imponenti ammassi rocciosi sono crollati dal versante sinistro delle Gole. I detriti che attualmente ricoprono l'alveo sono quindi in parte materiali di frana e in parte depositi alluvionali, accumulati a monte degli sbarramenti per frana e/o delle opere realizzate per difendere dall'erosione la Strada Intercomunale di Fondovalle Savena.

Analizzando in dettaglio il tratto di profilo che corrisponde alle Gole di Scascoli si osservano tre principali rotture di pendenza, di seguito denominate rp1, rp2 ed rp3 (fig. 6).

- La rottura di pendenza rp1è situata poco a monte del passaggio per faglia dalle F.ni di Montepiano e di Antognola, molto erodibili, alle F.ni di Contignaco e di Pantano (Gr. Bismantova), poco erodibili (fig. 2). Con rp1 inizia la "rapida" del T. Savena nelle Gole di Scascoli.
- La rottura di pendenza rp2 è situata nella zona di più profonda indentazione tra il piede della • grande frana in destra idrografica e il substrato stabile in sinistra idrografica (fig. 2). Con rp2 si entra nel tratto più acclive della "rapida" del T. Savena, che in questo punto sta tuttora erodendo lo sbarramento creato dalla grande frana di Scascoli. Misure inclinometriche condotte tra il 2003 e il 2005 hanno dimostrato che la superficie basale di scorrimento della frana si trova da 5 a 7 m più in basso del *Thalweg*, e che il piede di frana continua ancora oggi ad avanzare di circa 2 cm all'anno. Misure topografiche condotte negli stessi anni hanno inoltre rivelato che l'unghia di frana si solleva di circa 2 cm all'anno. E' ragionevole supporre che questi movimenti siano da molto tempo "in competizione" con l'erosione del torrente. Tra il 1983 e il 1990, per difendere dall'erosione fluviale la nuova Strada Intercomunale di Fondovalle Savena, sono state costruite due briglie: la prima si trova 50 m a monte del Mammellone 1, mentre la seconda si trova 250 m a valle dello stesso. Il profilo longitudinale restituito dall'analisi fotogrammetrica mostra la situazione dell'alveo com'era prima di questi interventi. Dopo i crolli del 1992, del 2002 e del 2005 l'alveo ha subito ulteriori trasformazioni, causate dalle opere di ripristino e di protezione della Strada Intercomunale di Fondovalle Savena.

• La rottura di pendenza rp3 è situata al passaggio tra la F.ne di Pantano (Gr. Bismantova), poco erodibile, e la F.ne di Monterumici, molto erodibile. Nella F.ne di Monterumici il T. Savena ha modellato la varice del Molino di San Ansano (fig. 6), allargando il proprio fondovalle e ricoprendolo interamente di depositi alluvionali. Come si evince dalle foto aeree, tra 1971 e 1976 questi depositi sono stati in gran parte asportati da cave d'inerti. La ripresa d'erosione provocata da queste cave ha fatto affiorare nell'alveo del T. Savena il contatto tra la F.ne di Pantano e la F.ne di Monterumici, dando l'avvio al rapidissimo sviluppo di rp3.

In corrispondenza del corpo di frana, la sovrapposizione alla carta a curve di livello della restituzione vettoriale dei tratti salienti (fig. 7), ha permesso di evidenziare la forma del corpo di frana nel 1976. Tale forma è rimasta sostanzialmente invariata fino ad oggi, data la piccola entità dei movimenti annuali rilevati dalle misure inclinometriche e topografiche effettuate dal 2003 in poi.

Conclusioni

Il presente studio ha voluto mostrare ancora una volta come la tecnica fotogrammetrica d'archivio permetta di estrarre informazioni metriche relative a uno specifico periodo della storia evolutiva di un fenomeno ambientale. Nel caso specifico della grande frana di Scascoli, la creazione del profilo altimetrico del torrente Savena ha permesso di valutare lo stato di avanzamento dell'erosione torrentizia dal momento in cui tale frana ha sbarrato il fondovalle. L'interpretazione geomorfologica del profilo prodotto ha confermato che la configurazione plano-altimetrica dell'alveo del Savena, fortemente alterata dalla messa in posto del corpo di frana, non è ancora ritornata alle condizioni di equilibrio in cui si trovava prima di tale evento.

L'analisi finora condotta riguarda solo un particolare momento della storia evolutiva dell'area in esame. Ai fini di un'analisi multitemporale si prevede di procedere al trattamento di altri voli aerofotogrammetrici storici, per la restituzione di caratteri geomorfologici confrontabili con quelli del 1976. In quest'ottica bisogna comunque considerare che gli spostamenti medi annui della frana sono tali da comportare cambiamenti, su un arco temporale di 40-50 anni, di un ordine di grandezza paragonabile alle precisioni raggiungibili col metodo fotogrammetrico applicato a questo caso.

Ringraziamenti

Si ringrazia Jonathan De Felicibus per la realizzazione della tesi di laurea da cui ha preso spunto il presente articolo.

Riferimenti bibliografici

Bitelli G., Gatta G., Giorgini G., Minghetti A., Mognol A., Paselli E. (2006). *Recupero a Fini Metrici di Fotogrammi Aerei Storici per lo Studio delle Dinamiche Territoriali in Ambito Urbano: un caso di Studio. Atti della 10^a Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 355-360*

Chandler J., Ashmore P., Paola C., Goock M., Varkaris F. (2002). Monitoring River- Channel Using Terrestrial Oblique Digital Imagery and Automated Digital Photogrammetry. Annals of the Association of American Geographer, 92(4), 631-644

De Felicibus J. (2010). *Uso metrico di fotogrammi storici, il caso di studio della frana di Scascoli*. Tesi di laurea specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Università di Bologna

Gottardi G., Landuzzi A., Marchi G., Benedetti G. (2004). Sui complessi fenomeni di instabilità presso le Gole di Scascoli (Appennino settentrionale, Bologna). Atti del Simposio internazionale INTERPRAEVENT 2004, Riva, Trento, 25-36

Landuzzi A., Bernagozzi G. (1996). Geologia e geomorfologia della frana di Scascoli (Appennino settentrionale, Bologna, Italia). V Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Cagliari

Zanutta A., Bitelli G., Baldi P., Cardinali M., Carrara A. (2006). *Qualitative and quantitative pho*togrammetric techniques for multi-temporal landslide analysis. Annals of Geophysics, vol. 49, N 4/5