

Modelli digitali del terreno derivati da immagini satellitari a altissima risoluzione: analisi e validazione per applicazioni geomorfometriche

Maurizio Barbarella (^a), Alessandro Di Benedetto (^b), Margherita Fiani (^c), Cesarino Zollo (^d)

(^a) DICAM, Univerdsà di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, maurizio.barbarella@unibo.it

(^b)DI, Università RomaTre, via Vito Volterra 62, 00146 Roma (RM), alessandro.dibenedetto@uniroma3.it

(^c) DICIV, Università di Salerno, via Giovanni Paolo II 132, 84084, Fisciano (SA), tel. 089 964128, *m.fiani@unisa.it* (^d) DF, Università di Salerno, via Giovanni Paolo II 132, 84084, Fisciano (SA), *czollo@unisa.it*

Riassunto

L'elaborazione di dati provenienti da stereo-coppie d'immagini satellitari ad altissima risoluzione è complessa e a oggi non esistono linee guida né tantomeno standard condivisi per la produzione di modelli digitali delle elevazioni (*Digital Elevation Models* - DEMs). Lo scopo del lavoro è definire procedure per ricostruire un modello accurato della morfologia del terreno da dati telerilevati, a fini geomorfometrici e di monitoraggio. Abbiamo testato due stereo-coppie d'immagini satellitari, una GeoEye-1 e una Pleiades-1B, acquisite a distanza di tre anni e mezzo su un'area del Cilento caratterizzata da una morfologia molto variegata per la presenza di aree montagnose, collinari e pianeggianti e diversamente urbanizzata. A partire dal DEM, su un'area di limitata estensione caratterizzata dalla presenza di un complesso di frane, sono state derivate le mappe di pendenza, esposizione, curvatura e rugosità. Sulla base di queste, è stato possibile delimitare i confini dei vari corpi di frana. Nella zona, comune alle due immagini, sono stati confrontati i DEMs prodotti e valutate le variazioni altimetriche occorse nel periodo intercorso tra le acquisizioni.

Abstract

The elaboration of data coming from stereo-pairs of Very High Resolution (VHR) satellite stereo images is complex and there are currently no guidelines nor shared standards for the production of Digital Elevation Models (DEMs). The aim of our study is to outline a general process for assessing a reliable analysis of terrain morphology starting from VHR images, for geomorphological interpretation. We tested two stereo-pairs of satellite images, a GeoEye-1 and Pleiades-1B, acquired three years later, on an area of Cilento with different morphological features (mountains, hills and plains). Maps of morphological features (slope, aspect, curvature and terrain roughness index) were then extracted from the DEM in order to characterize a landslide limited in extent. In the area common to both images, DEMs were compared and we evaluated the altimetric variations occurred in the period between acquisitions.

1. Introduzione

Le variazioni morfologiche subite nel tempo possono essere valutate tramite il confronto di DEMs (*Digital Elevation Models*) costruiti a partire da immagini satellitari ad altissima risoluzione, acquisite in epoche diverse, anche con sensori differenti (Hengl, Reuter, 2009; Dramis, 2009). Pertanto, particolare attenzione deve essere posta nella creazione di un modello numerico affidabile che descrive correttamente la topografia del terreno. Esistono allo scopo diversi pacchetti software, in questo lavoro è stato utilizzato *Socet GXP 4.2.0* per la georeferenziazione e la produzione del DEM. La fase della georeferenziazione è un passo molto importante per garantire l'affidabilità del prodotto derivato (Toutin, 2004). Oltra alla creazione del DEM è possibile estrarre curve di livello e



immagini ad alta risoluzione orto-rettificate (Deilami, Hashim, 2011; Capaldo et al., 2012). Partendo da un DEM affidabile e preciso, è possibile estrarre una serie di parametri, che sono utili per delineare e quantificare con precisione le frane e altre caratteristiche simili utilizzando i criteri della geomorfometria (Hengl, Reuter, 2009; Dramis, 2009). I Sistemi Informativi Geografici (GIS) hanno notevolmente contribuito allo studio e alla mappatura delle morfologie (Chacón, Corominas, 2003; Huabin et al., 2005). Tuttavia, una delle problematiche principali è che non esistono ancora delle linee guida e uno standard per la modellazione di immagini satellitari ad alta risoluzione mentre per il rilievo fotogrammetrico tradizionale esistono molte procedure codificate per la produzione di DEM e cartografia (Hugenholt et al., 2013). In questo studio sono state elaborate due diverse immagini provenienti da due diversi sensori in modo da effettuare un confronto e valutare le differenze tra i prodotti; sono stati anche estratti i principali parametri geomorfometrici di un complesso di frane attive e effettuato un confronto nel tempo tra le due stereocoppie nella zona comune alle due immagini.

2. Materiali e metodi

Sono state elaborate due stereo-coppie provenienti da due sensori differenti, Pleiades-1B e Geoeye1. La coppia-stereo GeoEye-1 è stata acquisita nel gennaio 2012 in modalità di scansione inversa nella banda pancromatica e in quattro bande multispettrali. L'analisi è stata effettuata solo con le immagini pancromatiche. L'immagine copre un'area di 110 km², corrispondente a una zona costiera del sud Italia, in provincia di Salerno sulla costa cilentana. La morfologia è molto variabile, l'altimetria va dal livello del mare ad altitudini di oltre 1000 m. Arbusti e grandi alberi isolati coprono la maggior parte della zona, ma vi sono anche diverse zone residenziali e case isolate. All'interno dell'immagine è stata successivamente isolata e studiata un'area in prossimità di un complesso di frane molto esteso e attivo, ripresa nella zona di sovrapposizione delle due immagini elaborate.

La successiva stereo-coppia è stata acquisita nell'agosto 2015 mediante il satellite Plèiades 1B. Il satellite è dotato di quattro bande spettrali (blu, verde, rosso, e IR), è in grado di fornire immagini con una frequenza di rivisitazione di un giorno. Le risoluzioni spaziali ricampionate raggiunte dal sensore sono di 2 m per il canale RGB e per il canale infrarosso e di 50 cm per il canale pancromatico. Le immagini acquisite sono caratterizzate da una precisione nominale plano-altimetrica di 3 m senza GCP e di 1 m con l'utilizzo di GCP. L'immagine copre un'area di circa 130 km², costituita da una zona costiera, pianeggiante e in parte montuosa, adiacente ed in parte sovrapposta con l'immagine Geoeye nella zona Nord-Ovest. La stereo-coppia ricade in una zona molto più residenziale e pianeggiante; per questo è stato possibile misurare in campagna molti più punti per la georeferenziazione. Per entrambe le stereo-coppie la georeferenziazione e l'estrazione del modello digitale di elevazione (DEM) è stato condotto con il software Socet GXP 4.2.0.

L'appoggio a terra è stato fatto con ricevitori GNSS in modalità NRTK. Nell'area in comune tra le due immagini satellitari i *Ground Control Points* (GCPs) sono gli stessi per entrambe.

Al fine di verificare i risultati dei modelli matematici che abbiamo usato per la georeferenziazione dell'immagine (un passo fondamentale se l'immagine deve essere utilizzato per il monitoraggio), è stato utilizzato per l'applicazione del modello matematico un numero di GCPs molto ridondante.

Una volta georeferenziate le immagini sono stati generati i DEMs a risoluzione di 1 m. I DEMs sono stati confrontati tra loro per valutare le deformazioni verificatesi nell'area di interesse in un intervallo di tempo di tre anni e mezzo.

3. Metodologia

L'elaborazione delle due stereocoppie di immagini satellitari è stata fatta secondo le solite fasi di georeferenziazione, produzione DEMs e loro confronto. Sia i GCPs sia i CPs (*Check Points*) sono stati misurati a terra con ricevitori GNSS in modalità NRTK. Vista l'importanza di avere una distribuzione omogenea sul terreno dei punti, è stata progettata una rete GPS i cui vertici sono stati scelti in prossimità di una griglia regolare. Le dimensioni della maglia sono state scelte tenendo



conto del numero di punti necessari per la georeferenziazione, funzione del modello matematico di georeferenziazione utilizzato. Grazie alla celerità della misura NRTK, oltre al punto scelto in fase di progettazione, sono stati misurati anche una serie di punti limitrofi in modo tale da avere un set di dati più ampio e scegliere quello maggiormente riconoscibile sull'immagine e con una precisione migliore della misura. La scelta dei punti da misurare è stata fatta in modo che ogni zona avesse sia un GCP che un CP. Sono stati misurati in totale 33 punti per la stereo-coppia Geoeye e 74 punti per la stereo-coppia Pleiades. Il sistema di riferimento adottato è UTM/ETRF00 con quote ellissoidiche. La precisione raggiunta in planimetria è mediamente sub-centimetrica mentre in altimetria si arriva a circa 2.5 cm.

Per la successiva estrazione del DEM, di tipo GRID a passo 1 m, si è usato l'algoritmo *Nex Generation Automatic Terrain Extraction* (NGATE. Per verificare la accuratezza dei DEM prodotti, sono stati analizzati i canali di correlazione (*score channels*), elaborati contemporaneamente alla generazione del DEM. Utilizzando un'opportuna scala cromatica è possibile associare ad ogni colore un diverso grado di correlazione in modo tale da ottenere una mappa da cui è possibile interpretare con facilità la bontà dell'interpolazione.

I DEMs e eventuali altri prodotti elaborati possono essere utilizzati per indagini geomorfologiche e geomorfometriche. Sono stati determinati quattro parametri di base per l'analisi geomorfometrica del territorio. In particolare, per una zona in prossimità di una grossa frana attiva, sono stati analizzati: l'esposizione, la pendenza, la curvatura e la rugosità. Questi aspetti sono necessari per una corretta classificazione e individuazione delle diverse parti omogenee della frana. Considerando l'andamento locale del terreno nell'intorno di un punto espresso da una funzione z=z(x,y), la pendenza e l'esposizione sono esprimibili tramite le derivate prime di questa funzione mentre la curvatura è espressa tramite le derivate seconde della funzione. Queste grandezze sono calcolabili in corrispondenza di ciascuna cella del grigliato del DEM, approssimando l'andamento del terreno tramite un polinomio di secondo o quarto grado e calcolando numericamente le derivate usando un dato neighbourhood (3x3 o 5x5) di ciascun pixel. Numerose sono le formule proposte in letteratura per effettuare il calcolo (Hengl and Reuter, 2009). Il software usato (ArcGIS) utilizza l'algoritmo di Horn (1981) per il calcolo delle derivate prime, e il metodo di Zevenbergen e Thorne (1987) per il calcolo della curvatura tramite le derivate seconde. Inoltre è stato calcolato anche il parametro di rugosità Terrain Ruggedness Index (TRI) (Riley et al.). La mappa delle esposizioni è espressa in gradi, la direzione è in senso orario da nord; i pixel sono ripartiti in 9 classi delle quali 8 indicano le direzioni cardinali (0°-22.5°; 22.5°-45°;...) e la nona è è relativa alle zone pianeggianti dove i pixel sono valorizzati a -1. La mappa delle pendenze è stata determinata mediante la differenza di quota che si verifica nella matrice 3 x 3 centrata sul pixel in esame, i valori sono stati raggruppati in cinque classi, con i valori in gradi. Sono state calcolate le rugosità del terreno mediante l'indice TRI, che calcola delle differenze di quota tra un punto generico e quelli nei suoi dintorni contenuti in un certo raggio di analisi (l'indice è espresso in metri). È stato infine effettuato un confronto nella zona di sovrapposizione dei due DEMs prodotti (con il software Polyworks), tramite il calcolo della differenza di quota dei due modelli digitali, in una zona comune ad entrambi ed in prossimità della frana attiva. Avendo a disposizione due DEMs, provenienti da due epoche differenti, è possibile valutare gli spostamenti subiti dal corpo di frana nell'arco temporale a disposizione.

4. Risultati

Le due stereocoppie sono state georeferenziate con i GCPs misurati a terra. In figura 1 sono mostrati i valori dei residui di entrambe le immagini, sia dei GCPs che dei CPs. Nella figura 2 è riportata la distribuzione sulle immagini dei punti utilizzati. I residui sui GCPs sono molto bassi, inferiori ai 50 cm in valore assoluto per la GeoEye e ai 20 cm per la Pleiades. I punti non ben riconoscibili o collimabili sulle immagini non sono stati utilizzati come GCPs; su di essi gli scarti sono ovviamente più elevati, soprattutto per la componente altimetrica.

Dopo la georeferenziazione sono stati prodotti i DEMs. In figura 3 sono mostrati i risultati della correlazione (*score channels*) per entrambe le immagini. Sulla Geoeye la correlazione è peggiore



essendo l'area prevalentemente montuosa con conseguenti ampie zone in ombra (l'acquisizione è avvenuta di inverno, al mattino, quando il sole era ancora basso sull'orizzonte); nelle zone collinari e pianeggianti la correlazione è migliore. Buoni risultati si sono avuti invece per la Pleiades, che comprende aree più pianeggianti ed è acquisita verso mezzogiorno con migliore illuminazione.



Figura 1 – Residui della Georeferenziazione



Figura 2 – Disposizione GCP(a sinistra) e CP(a destra)



Figura 3 – Score Channel Pleiades e Geoeye



Su una parte della zona di sovrapposizione tra le due immagini, in cui è compreso il complesso di frane, è stato effettuato un confronto tra le due immagini (con il software Polyworks), calcolando le differenze di quota dei due DEMs prodotti (Figura 4, a sinistra). Nelle zone dove la correlazione ha dato buoni risultati, le differenze sono risultate mediamente intorno ai 5-10 metri. In corrispondenza della frana la variazione delle quote nel corso dei tre anni e mezzo intercorrenti tra le acquisizioni è congruente, in valore e segno, con il movimento del corpo franoso.



Figura 4 – A sinistra: confronto Pleiades vs Geoeye. A destra: corpi di frana individuati sulla carta a curve di livello dedotta dall'immagine.

Sono state anche elaborate su entrambe le immagini le mappe di pendenza, esposizione, curvatura totale e indice di rugosità del terreno (Terrain Roughness Index - TRI) su una sottoarea di 2,9 x 2,1 km in prossimità della frana (Figura 5). Sulla base di queste mappe è stata fatta un'interpretazione geomorfologica che ha permesso di distinguere i vari corpi di frana, figura 4, a destra. I fenomeni franosi individuati differiscono per tipo, età e fase di attività, così è possibile distinguere tra frane di prima, seconda e terza generazione. La parte superiore è caratterizzata da una deformazione dovuta ad un lento movimento roto-traslatorio che, correndo lungo i lati, si trasforma in una frana "cinematica strike-slip" (Fleming, Johnson, 1989). Il lato destro e sinistro sono caratterizzati da una break-line netta che si allunga nella valle. Il piede della frana ha portato ad un aumento di pendenza nella parte anteriore della frana causando sia l'attivazione di altre frane superficiali e la comparsa del fenomeno noto come processo "denutational", cioè l'insieme di tutti quei processi che causano erosione. Dalla mappa della pendenza è ben visibile il sistema di frane, principalmente in quella prodotta a partire da immagini Pleiades, più dettagliata, dove è possibile individuare anche la viabilità. Nella mappa della curvatura totale è possibile notare come quella elaborata sulla base dell'immagine Geoeye sia più significativa rispetto all'altra elaborata sulla Pleiades; ciò dipende principalmente dal periodo di acquisizione di quest'ultima, in cui la maggiore copertura vegetale nascondeva in parte il terreno. La mappa della curvatura mette in evidenza l'alternarsi di valli e picchi di piccola dimensione circondati da avvallamenti. La mappa dell'indice di rugosità descrive le asperità della zona fornendo informazioni sui confini delle zone di distacco della massa franosa,



tramite il calcolo delle differenze di elevazione tra l'i-esimo punto centrale del grigliato e quelli adiacenti. Nella figura 6 è riportata una stima dei movimenti franosi con l'individuazione di materiale in frana; in particolare la prima immagine descrive la differenza tra il DEM prodotto da immagini Geoeye e il DEM da CTR 2005 (Cartografia Tecnica Regione Campania) mentre l'immagine di destra è relativa al confronto dei due DEMs prodotti (Pleiades 2015-Geoeye2012).



Figura 5 – Mappe geomorfometriche sulla zona di sovrapposizione





Figura 6 – Stima movimenti franosi, a sinistra confrondo del DEM da Geoeye 2012 e CTR 2005, a destra confronto tra DEM Pleiades 2015 e Geoeye 2012.

5. Conclusioni

Le immagini stereo acquisite da sensori satellitari ad alta risoluzione svolgono un ruolo importante nelle applicazioni cartografiche e geomorfologiche, a condizione che tutte le fasi di elaborazione seguino procedure rigorose e che il risultato di ogni passo sia attentamente valutato dato che al momento non esistono linee guida e standard. La mancanza di norme specifiche ha richiesto lo studio di una metodologia operativa che è stata applicata utilizzando due immagini satellitari ad alta risoluzione provenienti da due sensori diversi a distanza di circa tre anni, in modo da valutare anche le variazioni morfologiche di un sito dove vi è una frana attiva molto vasta. La fase di georeferenziazione è molto delicata per la precisione del prodotto, particolarmente nel caso di monitoraggio. L'uso dei servizi NRTK per la misura dei GCPs ha dato ottimi risultati sia in termini di velocità operativa che per la possibilità di misurare la posizione di più punti vicini; tra questi si può scegliere il migliore in termini di collimabilità e individuazione sull'immagine. La valutazione dei parametri con cui vengono costruiti i DEMs non è un compito semplice, soprattutto per quanto riguarda la scelta della risoluzione e degli algoritmi; particolare attenzione deve essere fatta in zone con forte pendenza. Una valutazione della bontà del DEM è fornita dal canale di correlazione, associato ai valori di elevazione, il quale mette in evidenza le zone con buona correlazione (in genere zone pianeggianti e prive di ombre) e le zone con cattiva correlazione o addirittura nulla (zone d'ombra, vegetazione molto folta e bacini idrici). I DEMs ottenuti possono essere utilizzati per analisi geomorfologiche, producendo indici che permettono di caratterizzare un corpo franoso. Inoltre, disponendo di DEMs in epoche diverse è possibile valutare i movimenti franosi.

Bibliografia

Capaldo P., Crespi M., Fratarcangeli F., Nascetti A., Pieralice F. (2012) "DSM generation from high resolution imagery: applications with WorldView-1 and Geoeye-1", *Italian Journal of Remote Sensing*, 2012(44): 41-53

Chacón J., Corominas J. (2003), *Special issue on Landslides and GIS. Natural Hazards*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2003(30:3): 263-512

Deilami K., Hashim M. (2011), "Very high resolution optical satellites for DEM generation : a review", *European Journal of Scientific Research*, 2011(49): 542-554

Dramis, F. (2009), "Geomorphological Mapping for a Sustainable Development", *Journal of Maps*, 2009(5): 53-55

Fleming R.W., Johnson A.M. (1989), "Structures associated with strike-slip faults that bound landslide elements", *Engineering Geology*, 1989(27): 39-114



Hengl T., Reuter H. I. (2009), *Geomorphometry*: Concepts, Software, Applications; Developments in Soil Science, Elsevier, 2009, Vol. 33

Huabin W., Gangjun L., Weiya X., Gonghui W. (2005), "GIS-based landslide hazard assessment: an overview", *Progress in Physical Geography*, 2005(29): 548-567

Hugenholtz C.H., Whitehead K., Brown O.W., Barchyn T.E., Moorman B.J., Le Clair A., Riddell K., Hamilton T. (2013), "Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model", *Geomorphology*, 2013(194): 16-24

Toutin T. (2004), "Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods", *International Journal of Remote Sensing*, 2004(25): 1893-1924