

RILIEVI MULTI-TEMPORALI CON LASER SCANNER TERRESTRE PER IL MONITORAGGIO DI UNA FRANA

USE OF TERRESTRIAL LASER SCANNER IN LANDSLIDE MONITORING

M. Barbarella^a, M. Fiani^b, A. Lugli^a

^a DICAM, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy -
([andrea.lugli8](mailto:andrea.lugli8@unibo.it), [maurizio.barbarella](mailto:maurizio.barbarella@unibo.it))@unibo.it

^b DICIV, Università di Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano (SA), Italy - m.fiani@unisa.it

PAROLE CHIAVE: Frane, Monitoraggio, Laser Scanner Terrestre, Georeferenziazione, DEM, Geomorfologia

KEY WORDS: Landslides, Monitoring, Terrestrial Laser Scanner, Georeferencing, DEM, Geomorphology

RIASSUNTO

Nella nota si presentano i risultati ottenuti in quattro rilievi successivi effettuati tramite Laser Scanner Terrestre di una frana di circa 10 ha priva di aree stabili all'interno dello scenario rilevato e le elaborazioni finalizzate alla valutazione della variazione di forma subita dalla superficie della frana. A questo scopo sono stati adottati vari metodi tra loro complementari, l'adattamento diretto delle nubi, la differenziazione di grid DEM (Digital Elevation Models), l'estrazione dei profili altimetrici lungo le stesse sezioni alle varie epoche di rilievo. Si è dedicata particolare attenzione alla stima della quantità di materiale mobilitato, calcolata per differenziazione di DEM; la valutazione delle masse mobilitate da un'epoca all'altra di rilievo all'altro è particolarmente significativa se riferita ai diversi corpi di frana nei quali si articola il versante, che possono presentare comportamenti differenti in funzione della generazione alla quale appartengono, della pendenza e della litologia. La delimitazione dei vari corpi di frana è stata eseguita sulla base di carte di caratteristiche geomorfologiche (pendenza, esposizione, curvatura) estratte dal DEM.

Per ottenere questi risultati è necessario superare varie criticità, in particolare la stabilità del riferimento per la georeferenziazione e la interpolazione di un DEM realmente affidabile.

Il Laser Scanner Terrestre può essere impiegato con buoni risultati anche per il monitoraggio di frane purché siano applicate attente procedure per l'esecuzione delle scansioni, la loro co-registrazione e georeferenziazione e la realizzazione del DEM.

ABSTRACT

In this note we present the results obtained in four consecutive Terrestrial Laser Scanner surveys of a landslide of 10 ha, without any stable areas within the detected scenario and the processing aimed at the evaluation of the changes in the morphology of the landslide area. For this purpose, have been adopted several methods which could be considered as complementary to one another: direct adaptation of point clouds, differentiation of DEMs (Digital Elevation Models), elevation profiles along the same sections at different epochs. Particular attention has been devoted to the estimation of the amount of mobilized material, calculated through the differentiation of DEMs; evaluation of mobilized masses is particularly significant if performed considering the different landslide bodies in which it is articulated the slope. As a matter of fact, landslide bodies may have different behaviors, depending on the generation to which they belong, on their slope and on their lithology. The delimitation of the various landslide bodies was performed on the basis of geomorphological maps (slope, aspect, curvature) extracted from the DEM.

To obtain these results it is necessary to overcome various problems, in particular the stability of the reference frame adopted for the geo-referencing and the interpolation of an actually reliable DEM.

Terrestrial Laser Scanner allows to obtain good results in landslide monitoring providing that a set of procedures has been carefully applied for the execution of the scans, their co-registration, georeferencing and for the interpolation of DEM.

1. INTRODUZIONE

La Geomatica fornisce con le sue tecniche un grande contributo alla conoscenza sia della forma della superficie sia della cinematica dei dissesti di versante, fornendo dati che potranno essere utilizzati da geologi, geomorfologi e geotecnici per interpretare il fenomeno in atto. Le tecniche più consolidate che utilizzano stazioni totali (ST) e ricevitori GPS consentono di misurare la posizione di punti ben materializzati sui quali collocare mire, prismi riflettenti e antenne.

Il rilievo può essere attentamente progettato e le precisioni ottenute sono assai elevate ma i punti rilevati devono essere accessibili, sono generalmente pochi e quindi non consentono una descrizione completa dei movimenti delle varie porzioni del

corpo franoso.

Altre tecniche consentono tipicamente l'acquisizione di una grande quantità di dati su aree anche molto vaste ma richiedono maggiore impegno per organizzazione, costo e complessità della post elaborazione. L'Airborne Laser Scanner (ALS) (McKean e Roering, 2004) consente la descrizione altimetrica di aree vaste con precisione decimetrica mentre le immagini satellitari ad alta risoluzione (Kliparchuk e Collins, 2011) permettono di analizzare zone molto ampie con precisioni che dipendono dalla morfologia e copertura vegetale oltre che dalla risoluzione geometrica, peraltro in continuo miglioramento; dal 2014 sono, infatti, commercialmente disponibili immagini con risoluzione di 30 cm.

Altra tecnica utilizzabile è l'interferometria SAR (Synthetic

Aperture Radar), sia quella da satellite (Metternicht et al., 2005), adatta all'analisi di aree vaste ma con i vincoli imposti dalla geometria d'acquisizione delle immagini non sempre favorevole al rilievo di un certo versante, sia quella terrestre GbInSAR (Ground Based Interferometric SAR) (Luzi et al., 2006), utilizzabile in ambiti più ristretti.

Il Laser Scanner Terrestre (LST) consente la possibilità di acquisire una grande quantità di dati mantenendo la semplicità di gestione del rilievo e delle elaborazioni da parte del rilevatore (Prokop e Panholzer, 2009). I LST hanno precisioni strumentali minori delle ST ma forniscono un'enorme quantità di dati in tempi molto brevi e quindi permettono la descrizione molto dettagliata della superficie rilevata.

La tecnologia ha messo a disposizione strumenti sempre più performanti dal punto di vista della velocità di rilievo e sono ormai disponibili strumenti in grado di acquisire più echi (rimandati da ostacoli a diversa distanza lungo la stessa direzione) e anche strumenti che acquisiscono e digitalizzano la forma d'onda di ritorno ("full-wave form") con la possibilità di superare barriere costituite da reti o vegetazione e discriminare tra le diverse superfici riflettenti (Pirotti et al., 2013 a, b).

Le frane sono tuttavia un fenomeno complesso e hanno, generalmente, una forma molto articolata e non modellabile matematicamente. Ciò comporta alcune difficoltà, sia nella fase di esecuzione delle misure col LST sia nel trattamento dei dati grezzi acquisiti, sia infine nell'interpretazione del risultato in termini geomorfologici (Dramis et al., 2011).

In fase di rilievo, una difficoltà che s'incontra di frequente è data dalla limitata visibilità tra strumento e terreno dovuta alla morfologia (ondulazioni verticali e orizzontali, gradoni, ecc.), che non consente una facile individuazione dei punti di stazione. Inoltre, il terreno è frequentemente coperto da vegetazione e alberi: questi ultimi creano zone d'ombra che impediscono il rilievo di porzioni di terreno, mentre la presenza di vegetazione bassa arbustiva e di erba rende molto difficile distinguere l'effettiva superficie del terreno nella nuvola di punti acquisita.

Non è perciò affatto facile estrarre il DTM (Digital Terrain Model) dal DSM (Digital Surface Model) e ciò riduce l'affidabilità e anche la precisione del rilievo. Questa difficoltà può avere effetti negativi sull'attendibilità dei rilievi finalizzati al monitoraggio, che prevedono il confronto di rilievi ripetuti nel tempo per lo studio dell'evoluzione della morfologia della frana e per stimare la quantità di materiale asportato o accumulato.

Il confronto non è tra l'altro eseguito solo direttamente sulle nuvole di punti ma anche sui modelli di superficie derivati da interpolazione delle nuvole stesse, che si suppone rappresentino l'andamento del terreno all'epoca di quel rilievo. Se il filtraggio della vegetazione non ha avuto successo e non si è ricostruito correttamente il DTM, il risultato del confronto non è attendibile perché tiene conto anche della variazione della vegetazione nelle due epoche.

Ai fini del monitoraggio è inoltre necessario adottare un sistema di riferimento assolutamente stabile nel tempo, in cui le posizioni dei punti misurati in rilievi ripetuti siano correttamente inquadrati; in caso contrario il confronto delle superfici ricavate dai due rilievi mostra variazioni non corrispondenti a reali movimenti.

Nonostante tutte le criticità accennate, la tecnica LiDAR (Light Detection And Ranging) è ormai una valida alternativa ai metodi tradizionali per il rilievo di grandi aree in frana finalizzato alla produzione di un modello 3D denso e accurato della superficie del versante.

Si osserva che la tecnica GbInSAR, se pure con i dovuti accorgimenti, consente una notevole accuratezza nel monitoraggio nel tempo delle deformazioni ma è tuttavia caratterizzata da una risoluzione spaziale dell'ordine di mezzo

metro, che la rende meno indicata rispetto al laser scanner terrestre per la generazione di DTM ad alta risoluzione, da utilizzare in analisi morfologiche e geomorfometriche. GbInSAR e TLS rappresentano piuttosto tecniche complementari l'una all'altra; la prima consente di apprezzare deformazioni anche millimetriche lungo la LOS ("line of sight", cioè la congiungente sensore-oggetto) mentre la seconda permette un'accurata descrizione della morfologia dell'oggetto da rilevare. Da considerare inoltre che, mentre nel caso del laser scanner la presenza di vegetazione rappresenta un problema risolvibile in fase di editing, nel GbInSAR ciò comporta una de-correlazione delle scene e di conseguenza l'impossibilità di applicare la tecnica.

Tale caratteristica del GbInSAR di fatto ne limita l'applicabilità alle sole frane in terra o in roccia oppure vincola la possibilità di fare i rilievi nei periodi dell'anno nei quali la vegetazione è meno rigogliosa.

In questa nota descriviamo l'approccio seguito per l'analisi dell'evoluzione di un sistema complesso di frane con strumentazione LST. Il caso di studio presenta molte criticità per il monitoraggio: la presenza di vegetazione, la difficoltà nella scelta delle stazioni per ragioni di visibilità, la stabilità dubbia del pendio da cui è possibile fare le misure, l'assenza di zone "stabili" intorno alla frana.

Lo scopo del lavoro è quindi la messa a punto di una metodologia che consenta di ottenere prodotti numerici e grafici finalizzati all'interpretazione geomorfologica dei fenomeni franosi in atto e di seguirne l'evoluzione nel tempo.

2. AREA DI STUDIO E RILIEVI

L'area di studio è sulla costa cilentana, in Provincia di Salerno, sul versante sinistro orografico del Vallone Fiumicello. Il complesso franoso che la caratterizza è in continua evoluzione e provoca ingenti danni sia a un'importante strada di collegamento tra Ascea e Palinuro sia a un tratto della linea ferroviaria tirrenica.

Il complesso franoso, oltre a causare deformazioni della sede stradale, induce deformazioni distribuite lungo tutto il versante, oltre a rigonfiamenti e frane minori, con apporto di materiali nell'alveo che hanno causato la quasi completa occlusione della sezione fluviale attraversata anche dalla linea ferroviaria. Tale linea nell'area d'interesse corre quasi completamente in due gallerie: il binario verso Nord è quello più vicino al mare e, all'altezza del torrente Fiumicello, corre per un breve tratto sopra un ponte che originariamente era alto circa 7-8 metri rispetto all'alveo mentre dal 2008 è più alto di soli 2 metri. Un grave dissesto si è, infatti, verificato nel dicembre del 2008, a seguito di una piena nell'alveo del Vallone: l'acqua della piena ha sormontato il viadotto ferroviario e si è riversata lungo la galleria del binario verso Nord. Il traffico ferroviario è stato interrotto per circa ventiquattro ore (Fig. 1).

La frana è del tipo "lento" secondo la classificazione di Cruden e Varnes (1996), a scorrimento rotazionale con superfici profonde lungo le quali avviene il lento scivolamento delle rocce verso il Vallone. Le rocce interessate sono rappresentate da alternanze di rocce arenacee, marnose, calcaree e argillose del Flysch del Cilento. La pendenza del versante interessato è elevata per cui vi è la possibilità che il dissesto (finora lento) possa avere un'improvvisa accelerazione che sarebbe catastrofica per la strada e la linea ferroviaria.

La frana si sviluppa in lunghezza per circa 500 m ed è larga circa 400 m. La vastità della zona, l'elevata pendenza del versante, la presenza di vegetazione sul versante opposto alla frana e la difficoltà di accesso sono tutte cause di una notevole complessità nell'esecuzione del rilievo.



Figura 1. La galleria ferroviaria ostruita per l'evento catastrofico del 2008 e il personale di soccorso (FFSS e DPC) al lavoro.

Nel 2005 iniziò, a cura della società Iside S.r.l., un monitoraggio della strada con tecniche topografiche tradizionali e misure geotecniche con vari sensori, come stazioni meteorologiche fisse, piezometri, inclinometri, estensimetri, ecc. (Iside, 2007). Il rilievo topografico, eseguito a cadenza bimensile, consisteva nel controllo della posizione di una cinquantina di micro prismi retroriflettenti montati su aste metalliche materializzate stabilmente a ciglio della strada in frana.

Gli osservabili consistevano in angoli e distanze misurate con la stazione totale da due punti fissi, nominati I1 e I2, materializzati su pilastri sul versante stabile. La posizione di sei vertici non visibili dai due punti fissi era invece misurata con il GPS. Questi rilievi, protratti per alcuni anni, hanno consentito di stimare in modo affidabile i movimenti dei singoli punti osservati e hanno fornito informazioni precise sulla dinamica del fenomeno.

L'entità degli spostamenti planimetrici osservati in un periodo di circa quattro anni è di circa 7 m mentre quella altimetrica è di 2,5 ÷ 3,5 m. La velocità media giornaliera della frana è di circa 0,5 cm al giorno, con picchi fino a 2 cm al giorno in planimetria e di circa 0,2 cm al giorno, con picchi fino a 1,5 cm al giorno in quota. Tale rete di controllo non è però evidentemente sufficiente a descrivere movimenti di massa e cambiamenti nella forma del pendio, né tantomeno a permettere una quantificazione del volume di materiale mobilitato.

Per ottenere un modello 3D denso che descriva numericamente la morfologia del versante in frana e la sua variazione nel tempo, abbiamo quindi usato il Laser Scanner terrestre (Barbarella et al. 2012, 2014).

Per il rilievo di "zero", risalente al Febbraio 2010, abbiamo usato uno strumento a lunga portata, l'Optech ILRIS 3₀D. Circa quattro mesi dopo (Giugno 2010) abbiamo fatto una prima ripetizione delle misure, sempre con il medesimo strumento. La campagna di misura successiva è stata fatta un anno dopo (Giugno 2011), utilizzando due strumenti diversi, uno a lunga portata (Riegl VZ400) e uno a media portata (Leica ScanStation C10). Nell'ultimo rilievo (Giugno 2012) sono stati usati sia l'Optech sia il Leica.

La morfologia accidentata dell'area di studio è un elemento fortemente condizionante nella scelta dei siti in cui sono state messe le stazioni laser. La forte dinamica della frana implica inoltre che le campagne di misura devono essere eseguite in un breve intervallo temporale; le misure con il laser scanner sono perciò contemporanee con le misure GPS necessarie per

l'inquadramento delle scansioni in dato sistema di riferimento. In tutte le campagne e con tutti gli strumenti sono state acquisite molteplici scansioni da un certo numero di stazioni laser; il LST è stato sempre messo in stazione sul versante opposto stabile in modo da coprire tutta l'area in frana. Per acquisire le nuvole di punti nella zona alta, più lontana sono stati utilizzati gli strumenti a maggiore portata (Optech e Riegl) mentre nella parte bassa della frana, vicino al torrente, è stato utilizzato anche lo strumento Leica. In tabella 1 sono riportate alcune informazioni sintetiche sui dati acquisiti nelle campagne di rilievo 2010-12.

Rilievo	Strumento	Stazioni	Scansioni	Target	Punti (milioni)
Febbraio 2010	Optech Ilris 3 ₀ D	2	5	5	27,4
Giugno 2010	Optech Ilris 3 ₀ D	2	4	7	20,4
Giugno 2011	Riegl VZ400	4	4	9	35
	Leica C10	4	5	4	108
Giugno 2012	Optech Ilris 3 ₀ D	3	4	9	25
	Leica C10	4	4	5	108

Tabella 1. Informazioni sintetiche sulle campagne di rilievo.

Per inquadrare i rilievi in un unico sistema di riferimento è necessario che vi sia un certo numero di particolari stabili visibili nelle scansioni. Nel nostro caso, l'unico particolare che da garanzie di stabilità nel tempo è l'ingresso del tunnel verso mare, non sufficiente quindi a garantire una corretta georeferenziazione dell'intera area. Pertanto, abbiamo georeferenziato le scansioni per mezzo di un insieme di target posti nell'area in frana e messi in stazione in posizione opportuna ogni volta in occasione dei rilievi e poi rimossi. Tali target materializzano quindi un sistema di riferimento locale e la loro posizione deve essere misurata da altri punti, situati in zona stabile, abbastanza vicini per semplificare il rilievo e inquadrati nel sistema di riferimento scelto.

A questo scopo, abbiamo usato i due pilastri I1 e I2 materializzati da Iside sul versante stabile opposto a quello in frana. Da essi abbiamo misurato, tramite baseline GPS, la posizione dei target visibili nelle scansioni. Poiché l'intera area intorno alla frana non dava piena garanzia di stabilità, i due pilastri sono stati collegati a due vertici appartenenti alla rete NRTK di stazioni permanenti GNSS della regione Campania, inserite nel frame ITRF05.

Le stazioni permanenti usate distano rispettivamente 26 km (Castellabate) e 38 km (Sapri) dall'area in frana. In considerazione della grande distanza tra la frana e la rete di SP, sui due pilastri sono state fatte osservazioni GPS continuative per due giorni. Si è ritenuto che l'errore derivato dalla loro distanza sia ampiamente compensato dalla garanzia di stabilità nel tempo.

La prima fase dell'inquadramento è consistita quindi nel collegamento tra le due SP della rete NRTK con i due pilastri I1 e I2 che costituiscono il sistema di riferimento "vicino". In seguito le coordinate sia dei target sia delle stazioni LST sono state misurate con il GPS in modalità statica o rapido-statica, tenute fisse le coordinate di due vertici (I1 e I2).

Abbiamo usato diversi tipi di target, sia sferici, di diametro di 15 cm (per le zone più vicine) e 30 cm (per le zone lontane, sul ciglio della strada deformata e sul ponte ferroviario più lungo), per permettere una migliore ricostruzione della forma da tutti i punti di vista, sia del tipo suggerito dai software di elaborazione utilizzati (di forma cilindrica e piana) per il rilievo nella parte bassa della frana.

In figura 2 si mostra lo schema della campagna di misura fatta nel 2011; i triangoli rossi indicano le posizioni dei pilastri che materializzano il sistema di riferimento "vicino", le stelle arancioni i punti di stazione LST e i cerchi verdi i target. Lo

schema delle altre campagne di misura è simile, anche se talvolta è stato usato un differente numero di punti di stazione laser e/o di target.

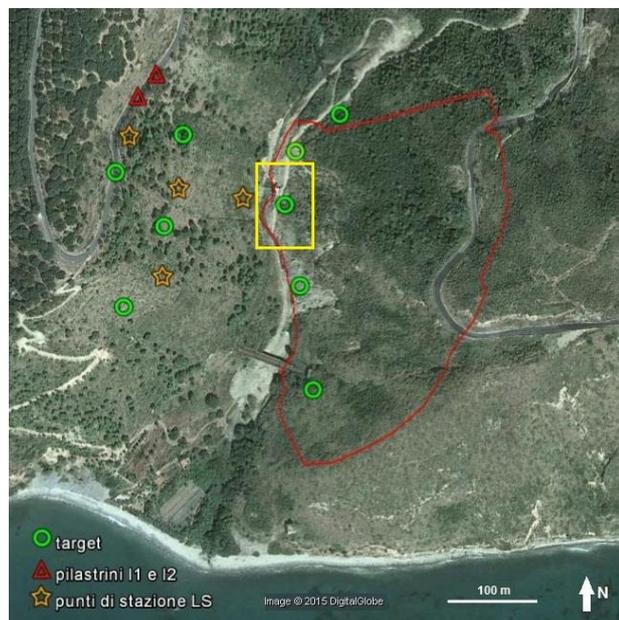


Figura 2. Schema del rilievo di Giugno 2012. Rappresentata in rosso la “frontiera” dell’area comune ai quattro rilievi laser scanner effettuati nei diversi anni. Il riquadro giallo indica l’area rappresentata in figura 3.

3. ELABORAZIONE DEI DATI

3.1 Elaborazione dati GPS e LST

La prima fase di elaborazione dei dati rilevati riguarda le misure GPS. La tabella 2 riporta i valori (in cm) ottenuti per le deviazioni standard delle coordinate geografiche compensate dei due pilastrini I1 e I2. Tali valori sono variabili tra 0,3 e 0,7 cm per le coordinate planimetriche e tra 0,7 e 1,6 cm per la quota. Non si sono rilevate differenze significative delle coordinate dei pilastrini nelle varie campagne di misura.

Nel rilievo del 2011 si sono avute frequenti interruzioni di segnale sul ricevitore posto sul pilastrino I2, per cui le posizioni dei target sono determinate esclusivamente dal pilastrino I1.

Sempre in tabella 2 è riportata una sintesi dei valori ottenuti per le deviazioni standard sulle posizioni di target. L’analisi statistica dei risultati delle compensazioni a minimi vincoli dei rilievi GPS fatti (Data Snooping) ha evidenziato due errori nel set delle misure del 2012.

Epoca	Dev st (cm)	PILASTRINO			TARGET	
		I1	I2	Media	Dev st	max
Febbraio 2010	σ_N	0,4	0,3	0,2	0,1	0,4
	σ_E	0,4	0,3	0,2	0,1	0,4
	σ_h	0,8	0,7	0,6	0,3	0,9
Giugno 2010	σ_N	0,3	0,2	0,2	0,2	0,6
	σ_E	0,3	0,2	0,2	0,2	0,5
	σ_h	0,7	0,6	0,6	0,5	1,3
Giugno 2011	σ_N	0,4	-	2,1	3,1	10
	σ_E	0,4	-	1,4	1,2	3,4
	σ_h	0,9	-	3,1	2,5	7,3
Giugno 2012	σ_N	0,8	0,9	1,7	1,7	1,6
	σ_E	0,7	0,5	1,5	1,4	1,4
	σ_h	2	1,2	4,9	4,3	4,3

Tabella 2. Deviazioni Standard sui pilastrini e sui target.

I valori di sintesi riportati in tabella mostrano una precisione abbastanza variabile nei vari rilievi. L’errore complessivo di georeferenziazione (a livello locale) è valutabile entro 10 cm.

L’elaborazione dei dati acquisiti con il laser è un’operazione complessa che si articola in più fasi: allineamento delle scansioni, editing e georeferenziazione.

La prima fase di allineamento delle scansioni si realizza attraverso un pre-allineamento grossolano seguito da un allineamento fine. Si deve prestare particolare attenzione alla fase di pre-allineamento delle scansioni, specialmente nella scelta della zona di sovrapposizione tra le nuvole adiacenti e di punti omologhi. Questa fase è matematicamente realizzata da una trasformazione a sei parametri precedente alla fase finale di allineamento vero e proprio, di solito basato sull’algoritmo ICP (“Iterative Closest Point”).

Per elaborare i dati provenienti dai tre diversi strumenti utilizzati, abbiamo usato tre pacchetti software, che usano strategie simili per l’allineamento. Per i dati Optech (Febbraio e Giugno 2010, Giugno 2012) abbiamo usato IMInspect, un tool di Polyworks, per i dati Riegl VZ400 (Giugno 2011) abbiamo usato il software RiscanPro, per i dati della ScanStation C10 infine (Giugno 2011 e Giugno 2012), abbiamo utilizzato il Cyclone.

Una volta che tutte le scansioni appartenenti a un dato rilievo sono state allineate e si è ottenuta un’unica scansione per ogni epoca, questa deve essere editata al fine di rimuovere dal set di dati tutti i punti non appartenenti al suolo nudo; nel nostro caso l’editing è volto essenzialmente a rimuovere la vegetazione.

La fase successiva del processamento è la georeferenziazione delle scansioni in un unico sistema di riferimento. Se, come nel nostro caso, non vi è un sufficiente numero di particolari che possano essere considerati stabili all’interno della nube, è necessario utilizzare dei target.

Tali target vanno riconosciuti, tramite le nuvole di punti che ne descrivono la superficie, nelle scansioni e la loro forma va ricostruita con un procedimento di fitting ai minimi quadrati, per calcolarne il baricentro (nel caso di target sferici) e associare a esso le coordinate rilevate con il GPS.

Per la georeferenziazione tramite le coordinate note dei centri dei target abbiamo fatto una trasformazione a sei parametri (una trasformazione conforme dava in pratica gli stessi risultati). Il calcolo di georeferenziazione ha dato risultati, in termini di residui 3D, variabili da 5 a 6 centimetri.

E’ da notare che solitamente i pacchetti software per l’elaborazione dei dati laser non forniscono una rigorosa analisi della qualità dei residui standardizzati del calcolo di trasformazione.

Alla fine dell’iter di elaborazione descritto dei dati, sono disponibili quattro nuvole di punti che descrivono la superficie della frana in quattro epoche differenti. I punti delle nuvole sono il dato in input per l’elaborazione dei DTM. Poiché tutti i rilievi sono inquadrati nello stesso sistema di riferimento, sarà possibile confrontare i DTM per ricavare informazioni sulla dinamica della frana.

3.2 Realizzazione del DEM

Dalla descrizione della superficie per punti discreti che costituiscono la nuvola di punti, occorre passare a una descrizione “continua”, tramite la realizzazione di modelli digitali delle elevazioni (DEM) di tipo TIN (Triangulated Irregular Network) oppure GRID (a griglia regolare). I DEM prodotti descrivono la forma dell’intero corpo di frana per mezzo di superfici interpolate e consentono di analizzarne l’evoluzione delle variazioni di forma nel tempo.

Per la produzione del DEM occorre definire sia l’algoritmo di

calcolo per interpolare la quota dei punti della nube sui nodi di un grigliato, sia il suo passo; tali parametri influenzano la capacità del DEM di descrivere accuratamente la superficie. Queste scelte non sono immediate nel caso di una frana, che ha per sua natura un andamento molto irregolare con brusche variazioni di pendenza e forti discontinuità. Sono stati fatti numerosi test confrontando diversi algoritmi d'interpolazione tra quelli che più frequentemente sono implementati nei software commerciali.

Il test è stato eseguito su un'area con scarsa vegetazione, di dimensioni ridotte ma rappresentativa delle difficoltà che si sono incontrate sull'area dell'intera frana: discontinuità, morfologia molto articolata, presenza del tunnel ferroviario, ecc.; il set di dati che rappresenta l'area (visibile in Fig. 3) contiene circa quattro milioni di punti.

Il criterio adottato per valutare l'aderenza della superficie interpolata al dato in input consiste in una cross-validazione effettuata estraendo prima di tutto dalla nuvola un campione-test, corrispondente all'1% dei punti e costituito nel nostro caso da circa 40.000 punti (x_k, y_k, z_k). Il restante 99% dei punti è stato poi interpolato per costruire un DEM.

Abbiamo quindi calcolato le differenze tra la quota dei punti del campione-test z_k e quella $Z_k^{int}(x_k, y_k)$, ottenuta dal DEM in corrispondenza della posizione planimetrica degli stessi punti.

Si sottolinea che i punti del campione-test non hanno contribuito alla generazione del DEM.

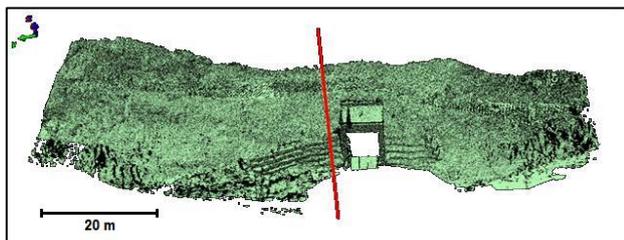


Figura 3. Particolare della scansione di Febbraio 2010 (in rosso è segnata la linea di sezione perpendicolare al muro di contenimento); l'area rappresentata è quella delimitata nel riquadro giallo di fig. 2.

Abbiamo confrontato alcuni algoritmi d'interpolazione (tra parentesi è riportato l'acronimo usato) noti in letteratura e molto utilizzati nei software commerciali per la generazione di superfici (Mongillo 2011; ArcMap ESRI, 2012; Golden Software, 2013):

- inverso della distanza elevato a una potenza, qui al quadrato (Idw2);
- kriging, con variogramma lineare (Kri);
- funzione polinomiale locale, di I grado (LoPo1°) e di II grado (LoPo2°);
- Natural Neighbor (NatNe);
- Radial Basis Function, multi quadratica, con vari smoothing factor: $c^2=0,0001$ (RBF0001), $c^2=0,0013$ (RBF-sug), $c^2=0,01$ (RBF01). La notazione "sug" indica che il valore indicato è quello proposto automaticamente dal software utilizzato.

Come si vede in Figura 3, la presenza di conci sovrapposti sfalsati e l'imboccatura del tunnel fanno sì che anche modeste differenze in planimetria portino a forti scarti in quota; alcuni punti hanno perciò dato scarti molto alti per tutti gli algoritmi. Per confrontare gli interpolatori non sono stati analizzati gli scarti eccedenti 1 m in valore assoluto, considerati outliers; la loro percentuale varia secondo l'algoritmo utilizzato, andando da un minimo del 3,8% per Idw2 e 3,9% di Kri e RBF0 a un massimo del 5,5% per RBF-sug.

Una volta fatta la reiezione degli outliers, per verificare il livello

di aderenza tra i punti e i diversi DEM interpolati, abbiamo calcolato le frequenze degli scarti a intervalli di 5 cm.

La Figura 4 mostra, per i nove algoritmi che sono stati testati, la curva della frequenza in % degli scarti che ricadono a intervalli di 5 cm (0-5; 5-10; . . . , 95-100 cm); l'andamento è liscio per una migliore valutazione del trend dei vari interpolatori.

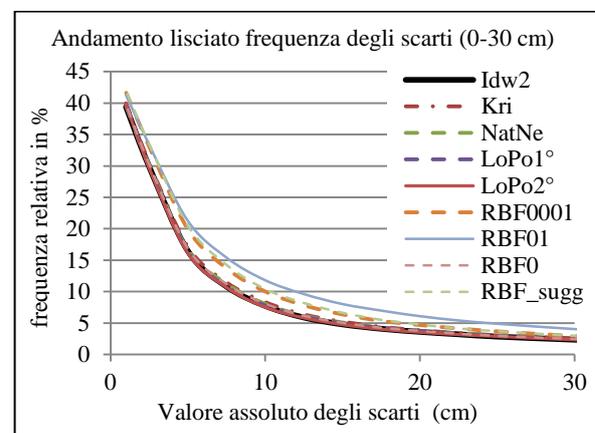
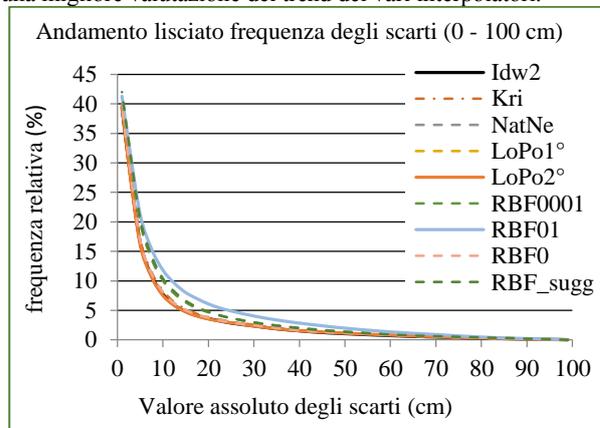


Figura 4. Andamento liscio della frequenza dei valori assoluti degli scarti negli intervalli 0-1 m e 0-0,3 m.

Per gli algoritmi IDW2 e LoPo2 il trend mostra che il 5% degli scarti in valore assoluto eccede circa 15 cm, mentre per l'algoritmo RBF01 la stessa percentuale eccede 25 cm circa; i primi due interpolatori sembrano lavorare quindi meglio nel caso di prova. In letteratura (Yang e Hodler, 2000) lo scarto quadratico medio (sqm) dei residui è indicato come indicatore globale dell'accuratezza dell'adattamento di un DEM alla nube di punti dalla quale è derivato; tale parametro, in caso di una distribuzione normale del campione, definisce completamente, assieme alla media, il comportamento dei dati.

Si noti però che l'istogramma degli scarti relativi al campione-test ha un andamento del tipo di quello rappresentato in Figura 5, relativo all'uso dell'interpolatore Idw2; l'andamento non sembra seguire una distribuzione normale. I trend ottenuti per gli altri algoritmi sono sostanzialmente analoghi.

Per studiare meglio il comportamento del campione abbiamo calcolato alcuni parametri statistici; si sono normalizzati gli scarti e calcolati alcuni dei parametri caratteristici di una distribuzione: media, scarto quadratico medio, asimmetria (g_1), curtosi (g_2), e stimatori robusti come mediana e deviazione media assoluta (mad).

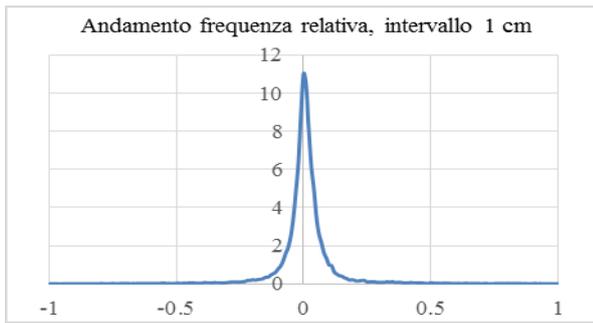


Figura 5. Andamento delle frequenze relative degli scarti ottenuti con l'IDW2, campionati ogni cm.

Le espressioni usate per il calcolo dei parametri statistici utilizzati sono le seguenti:

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad sqm = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2}{(N-1)}} \quad (1)$$

$$mad = \text{mediana}(|x_i - \text{mediana}(x)|) \quad (2)$$

$$g_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^3 / \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2 \right)^{3/2} \quad (3)$$

$$g_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^4 / \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2 \right)^2 - 3 \quad (4)$$

I valori numerici dei parametri calcolati sul set di dati campione per i diversi interpolatori sono riportati in Tabella 3; non si riporta la mediana, costantemente uguale a 0 ma si riporta il rapporto sqm/mad, che nel caso di distribuzione normale risulta costante, pari a circa 1,5.

In confronto ai parametri di una distribuzione normale normalizzata l'asimmetria (g_1) non è nulla ma assai contenuta, mentre la curtosis (g_2) è molto più elevata, com'era prevedibile dal picco centrale, e anche il rapporto delle dispersioni (s_x/mad) è ben lontano dal valore 1,5.

Per quanto attiene le differenze tra i vari algoritmi, i parametri statistici sono tra loro simili, il valore di sqm passa da 13 a 15 cm, quello della mad da 2,9 a 3,7 cm e il valore medio è sempre positivo ma dell'ordine dei mm.

Algoritmo	m_x	s_x	mad	g_1	g_2	s_x/mad
	(cm)	(cm)	(cm)			
Idw2	0,3	13,1	2,9	0,4	17,8	4,5
Kri	0,5	13,5	2,9	0,5	17,8	4,7
LoPo1	0,5	13,3	2,9	1,0	18,3	4,6
LoPo2	0,5	13	2,8	0,8	18,8	4,6
NatNe	0,5	13,5	2,9	0,6	18,0	4,7
RBF0	0,5	14,7	3,3	0,6	22,2	4,5
RBF-sugg	0,3	15,2	3,7	0,2	13,3	4,1

Tabella 3. Valori di alcuni parametri statistici per gli interpolatori considerati: media (m_x), scarto quadratico medio (s_x), deviazione media assoluta (mad), asimmetria (g_1), e kurtosis (g_2); rapporto tra sqm e mad.

In termini di capacità di descrivere in maniera appropriata la morfologia del terreno, i risultati migliori possono essere considerati quelli ottenuti con Idw2 e LoPo2°. Fermo restando che le differenze tra gli algoritmi sono molto contenute, a conclusione dei test si è scelto l'Idw2, anche perché questo interpolatore consente l'introduzione delle "breaklines", molto utili per caratterizzare in maniera corretta l'andamento del terreno in corrispondenza di discontinuità, in particolare nel caso di manufatti (Lichtenstein e Doytsher, 2004).

In sintesi, si sono generati i DEM che sono stati utilizzati nel seguito per l'analisi dei movimenti, adottando come interpolatore l'Idw2 e inserendo alcune breaklines in

corrispondenza dell'imboccatura del tunnel ferroviario a monte (molto meglio visibile rispetto a quello a valle per via della geometria delle prese laser).

4. RISULTATI

La morfologia presa come riferimento è quella ottenuta nel primo rilievo; in genere le valutazioni quantitative sono fatte facendo la differenza tra i valori del rilievo più recente e quello precedente. Per valutare le variazioni di morfologia sono stati usati tre metodi: la "comparison", cioè l'adattamento di una nube sulla mesh ottenuta dall'altra, la differenziazione dei grigliati dei DEM e il confronto di profili relativi alla stessa linea di sezione.

4.1 Adattamento delle nubi di punti laser

Per ricostruire un modello della superficie della frana dalla nube di punti che rispetti il più possibile i dati in input, quindi con il minimo livello possibile di "manipolazione", il tipo di DEM migliore è il TIN, che è strutturato in mesh costruite per mezzo di una triangolarizzazione, in genere realizzata secondo il criterio di Delaunay; in questo caso i punti sono rispettati e non vengono interpolati sui nodi di un grigliato.

Un confronto tra due nubi può essere realizzato mediante la misura della distanza di ciascun punto di una nube rispetto alla mesh ottenuta dalla nube che si è assunta come riferimento. Tra le possibili distanze calcolabili, si è scelta la distanza euclidea tra punto e mesh. Il segno algebrico attribuito alla distanza è positivo quando il punto della prima nube è sopra la mesh della seconda; ciò corrisponde a un accumulo di detriti da un'epoca a quella successiva. Il segno è viceversa negativo quando il punto è sotto la mesh e si ha quindi "erosione" (l'accezione di erosione sarà spiegata in seguito). Tale confronto è stato fatto con la procedura "Compare" presente nel software PolyWorks.

Il risultato della comparazione è visualizzato tramite una scala cromatica legata ai valori della distanza calcolata, che bene si presta a una prima identificazione delle aree instabili, sia sull'intero versante (Fig. 6) che, con maggior dettaglio, in aree più ristrette. La scansione di Febbraio 2010 copre un'area leggermente più estesa rispetto a quella di Giugno 2012; è per questo motivo che in figura vi sono anche delle porzioni di mesh rappresentate in grigio, indice di assenza di dati per il confronto.

Si noti che il risultato di questa procedura di confronto non consente il calcolo diretto della variazione di volume, che può essere tuttavia ottenuta in altro modo, seguendo più step:

- si genera un piano orizzontale da assumere come superficie di riferimento;
- per ognuna delle due superfici si calcola il volume rispetto a questo piano di riferimento, utilizzando il tool "Surface-to-Plane Volume", il cui output è rappresentato da una finestra pop-up con il risultato del calcolo;
- si calcola fuori linea la differenza tra i valori ottenuti per le due nubi.

Con questi criteri sono stati fatti i confronti tra le altre tre nuvole di punti rispetto alla mesh interpolata dalla scansione acquisita nel Febbraio 2010. Poiché PolyWorks lavora nel dominio vettoriale, non consente di fare direttamente operazioni di algebra matriciale. Utilizzando un software GIS è invece possibile lavorare direttamente nel dominio raster e calcolare direttamente i volumi usando un "raster calculator".

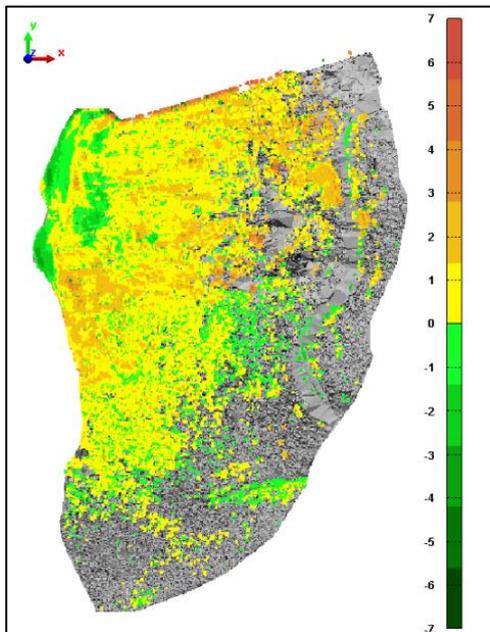


Figura 6. Risultato della "Comparison" tra i punti della scansione di Giugno 2012 rispetto alla superficie di riferimento ottenuta dalla nuvola di punti di Febbraio 2010 (in grigio); i valori della scala sono espressi in metri, i punti dal verde scuro al verde chiaro corrispondono alle aree in erosione, quelli dal giallo al marrone a aree di accumulo. L'area rappresentata è quella comune ai tre rilievi delimitata in fig. 2.

4.2 Differenziazione di DEM

Il secondo approccio seguito per fare il confronto delle superfici passa attraverso la realizzazione di un modello numerico tramite l'interpolazione dei punti della nube su un grigliato a passo regolare. Per quanto detto in precedenza, l'algoritmo utilizzato per l'interpolazione è l'"inverse distance to a power" (Idw2), scelto anche per la possibilità di gestire breaklines; tenendo conto della densità e quindi della spaziatura variabile dei punti sulla superficie si è fissato un passo della griglia di 0,5 m. Per ottenere una stima dei volumi mobilitati, in termini di erosione e accumulo, si è scelto di fare i calcoli in ambiente GIS, utilizzando il software ArcMap 10.1 (ESRI, 2012).

I grigliati ottenuti interpolando le diverse scansioni sono stati differenziati ottenendo l'andamento delle variazioni di quota della stessa cella tra le varie coppie di epoche consecutive.

Alcuni risultati ottenuti sono riportati nelle figure che seguono; le differenze in quota tra l'ultimo rilievo e il primo sono mostrate in Figura 7 mentre in Figura 8 sono rappresentate le differenze di DEM nei periodi intermedi.

Il risultato visibile nella Figura 7 può essere confrontato con quello di Figura 6, tenendo conto non solo che nella rappresentazione si sono adottate scale grafiche differenti (per via dell'utilizzo di software diversi) ma soprattutto che le direzioni rispetto alle quali si sono calcolate le differenze sono diverse: la distanza euclidea tra i punti e la mesh di riferimento in un caso, la verticale in corrispondenza dei nodi del grigliato nell'altro. La linea nera indica la posizione della linea di sezione usata per il calcolo e il confronto dei profili (si veda il paragrafo 4.3).

L'informazione più interessante nel monitoraggio di una frana è senz'altro quella relativa alle variazioni di volume ed è quindi consigliabile fare i calcoli considerando aree omogenee rispetto alla posizione relativa (sotto/sopra) delle due superfici messe a confronto.

Per distinguere le aree in erosione da quelle in accumulo si è classificato il grigliato ottenuto dalla differenziazione dei DEM in tre classi, considerando che in una ristretta fascia, compresa tra i valori -30 cm e +30 cm, si ha una sostanziale invarianza.

Tali valori sono considerati i limiti che servono a caratterizzare le aree con materiale mobilitato; le classi sono quindi:

- 1- differenze comprese tra -0,3 m e +0,3 m: aree che possono essere considerate come caratterizzate da una sorta di compensazione tra erosione e accumulo (solo per brevità di seguito questi punti saranno definiti come "stabili");
- 2- differenze $\geq +0,3$ m: aree che dal primo all'ultimo rilievo presentano un accumulo di materiale;
- 3- differenze $\leq -0,3$ m: aree in erosione.

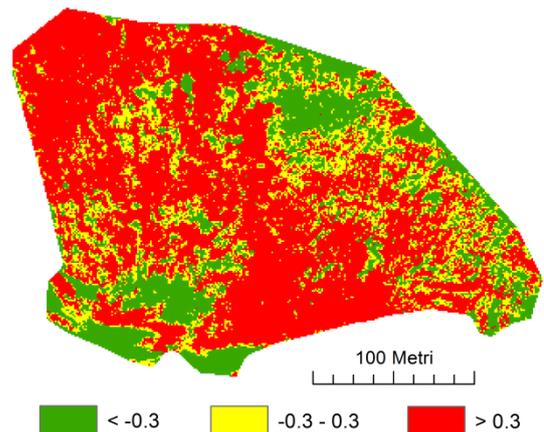


Figura 7. Carta delle differenze di quota (m) ottenuta con il metodo della differenziazione dei DEM; Giugno 2012 vs Febbraio 2010.

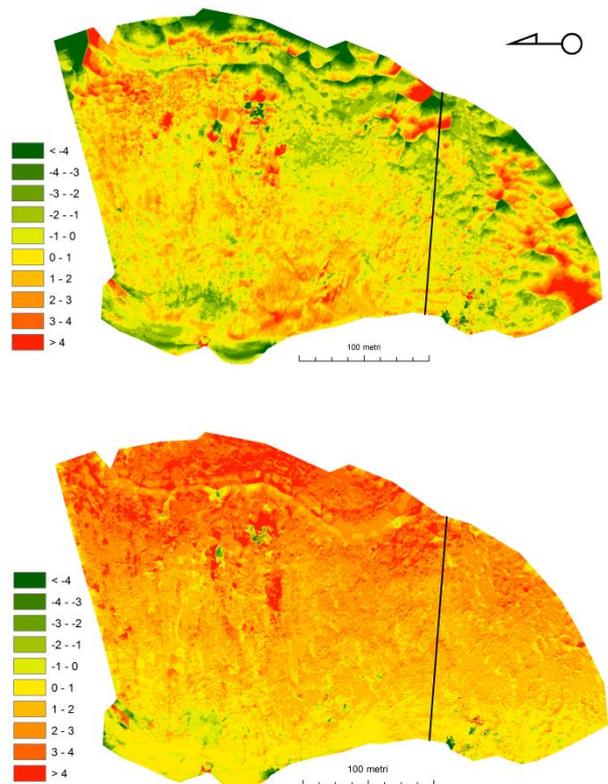


Figura 8. Differenziazione di DEM; dall'alto in basso: Giugno 2010 vs Febbraio 2010, Giugno 2011 vs Giugno 2010. L'area rappresentata è quella delimitata dalla linea rossa in figura 2.

I volumi mobilitati negli anni sono stati calcolati rispetto all'intera porzione dei frana comune ai quattro rilievi, corrispondente all'intersezione dei diversi limiti (Fig.9).

In verde sono rappresentate le celle corrispondenti all'accumulo di materiale, in rosso quelle corrispondenti a erosione e in giallo quelle che possono essere considerate "stabili".

Applicando questa procedura, risulta che, nel periodo analizzato, i volumi di terreno mobilizzati ammontano complessivamente a 63.866 m³ di accumulo e a 44.875 m³ di erosione; tra questi ultimi, gran parte è dovuta ai lavori di scavo fatti dall'uomo per rimuovere i detriti che avevano invaso la strada e sbarrato il torrente.

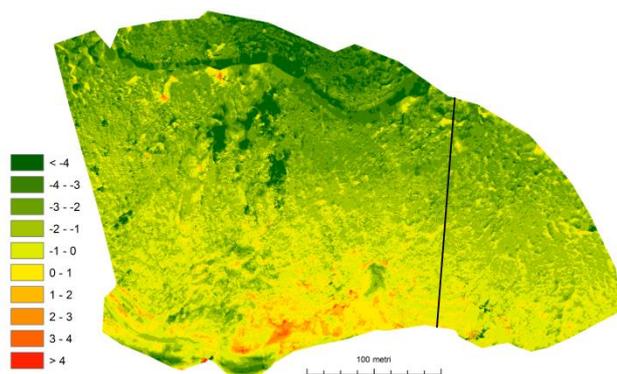


Figura 9. Segmentazione automatica in tre classi del grigliato ottenuto dalla sottrazione del DEM di Febbraio 2010 da quello di Giugno 2012.

Complessivamente il volume dei punti considerati "stabili" è di circa 1.941 m³. E' da precisare che il termine "erosione" usato in questa nota non deve essere inteso in senso stretto come fenomeno collegato solo a dilavamento e franamento del terreno ma anche come effetto della rimozione dei detriti, resa necessaria per evitare lo sbarramento del letto del torrente e l'interruzione della vicina strada ghiaiaata.

La suddivisione in tre classi di tutta l'area non è comunque soddisfacente ai fini dell'interpretazione del fenomeno perché è un'informazione che riguarda volumi aggregati e non consente perciò una descrizione degli spostamenti relativi intercorsi tra le singole parti del versante in frana; il complesso franoso va invece considerato nella sua articolazione in separati corpi di frana, ognuno con una storia propria.

4.2.1 Identificazione dei corpi di frana.

Per avere una classificazione della frana in corpi omogenei si è ricorsi al parere esperto di un geomorfologo che, sulla base anche della sua profonda conoscenza della zona, ha identificato sulle carte a curve di livello prodotte a partire dai DEM da TLS e con l'ausilio di carte derivate, i diversi poligoni (Guida, 2013). In particolare sono state fornite carte a curve di livello con equidistanze ravvicinate, fino a 25 cm, carte di pendenza e di esposizione (celle del grid di 50 cm) (Fig. 10).

L'interpretazione geomorfologica ha consentito di riconoscere i corpi di frana rappresentati in Figura 11. Quest'analisi ha evidenziato come il versante in frana (in sinistra idrografica) sia interessato da fenomeni che differiscono per tipologia, generazione e stato di attività.

Nel corpo principale della frana è possibile riconoscere frane di seconda e terza generazione. In dettaglio, è possibile identificare sei poligoni che rappresentano:

- una frana di seconda generazione, indicata in figura con

l'abbreviazione "1.3";

- due frane di terza generazione, indicate con le abbreviazioni "1.1.2" e "1.1.3";
- tre frane di quarta generazione, indicate come "1.1.0.1", "1.1.2.1" e "1.1.3.1".

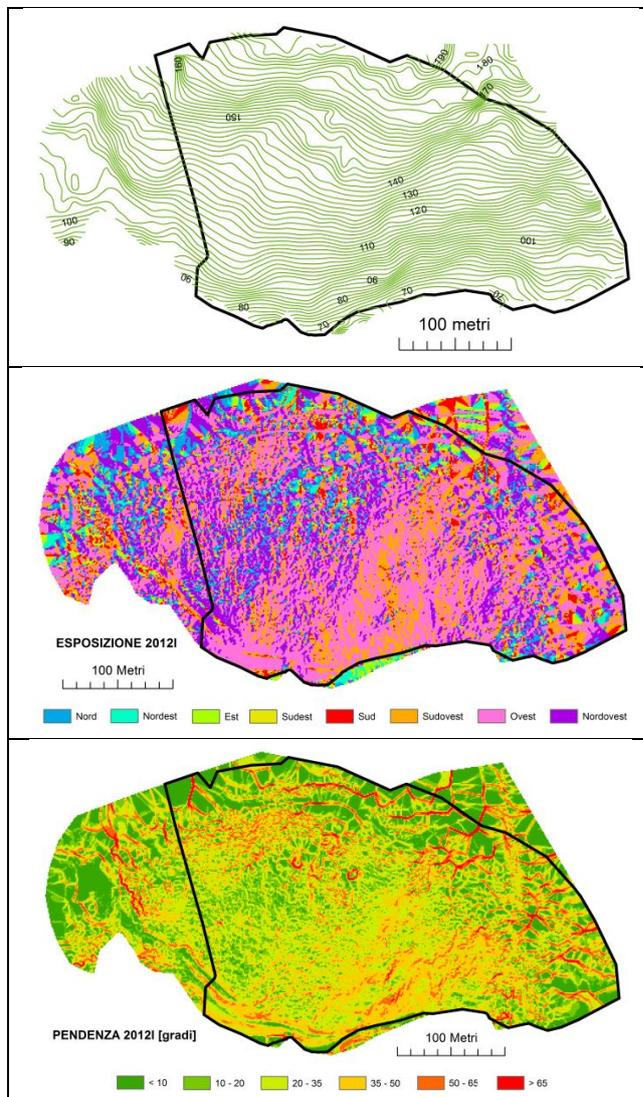


Figura 10. Dall'alto in basso: carta a curve di livello (equidistanza 2 m), carta delle pendenze, carta dell'esposizione; Le carte sono derivate dal DEM dell'ultimo rilievo.

Il corpo principale della frana, identificabile con l'abbreviazione "1", non è rappresentato in figura, così come il corpo di frana di terza generazione, classificato come "1.1.0", perché la loro estensione eccede l'area scansionata in alcuni dei rilievi LST fatti. I calcoli di volume dei differenti corpi di frana identificati nel versante sono stati fatti considerando due sole classi: erosione e accumulo. I risultati di tale analisi sono riportati in Tabella 4.

In generale, si osserva una buona corrispondenza tra le aree di erosione e di accumulo nei diversi corpi di frana. Ad esempio, la nicchia di distacco "1.1.2" è caratterizzata da un equilibrio tra erosione e accumulo che potrebbe essere messo in relazione con il volume accumulatosi nelle aree sottostanti.

Inoltre, l'intervento antropico del 2011, fatto per stabilizzare il piede della frana, impedisce una chiara interpretazione: l'area "1.1.2.1" mostra una perdita complessiva di circa 400 metri cubi

nonostante anche i corpi di frana sovrastanti presentino significative perdite di volume.

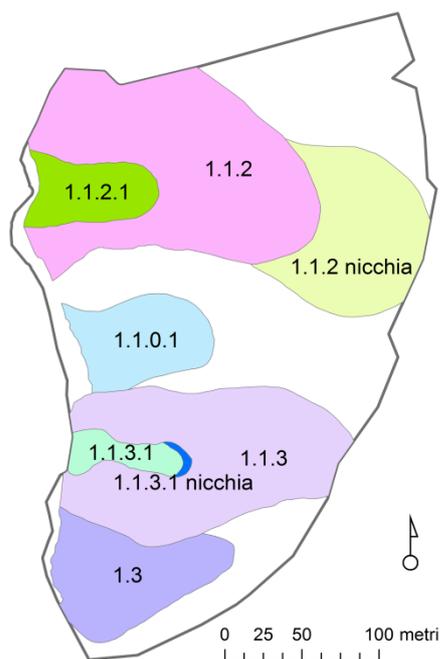


Figura 11. Corpi di frana che è stato possibile identificare (primo rilievo); le aree dei corpi di frana sono state ritagliate rispetto alla “frontiera” comune ai quattro rilievi, delimitata dalla linea rossa in figura 2.

Corpo di frana/volume (m ³)	10G_10F	11_10G	12_11
1.1.0.1	5.720	-1.350	440
1.1.2	22.192	-19.680	6.660
1.1.2.1	1.392	-2.080	530
1.1.2.nicchia	26.000	-24.220	-2.210
1.1.3.1	1.580	-650	-230
1.1.3.1.nicchia	2.70	-90	-60
1.3	6.890	-5.900	4.880
1.1.3	24.850	-19.240	-3.860

Tabella 4. Volumi mobilitati da Febbraio 2010 a Giugno 2012, espressi in metri cubi; i valori positivi significano accumulo di materiale, quelli negativi erosione.

4.3 Analisi dei profili

Per un’analisi quantitativa delle variazioni della superficie del terreno nel tempo è anche possibile confrontare sezioni ottenute dall’interpolazione di nuvole di punti acquisite in epoche differenti.

Nel confrontare tra loro sezioni tracciate in posizioni differenti della frana, è necessario considerare che nell’intervallo di tempo intercorso tra i rilievi l’esposizione del versante potrebbe essere cambiata.

Si è scelto di tracciare i profili lungo gli assi dei corpi di frana e di misurarne le differenze lungo la direzione della verticale tra i diversi profili. Da Febbraio 2010 a Giugno 2012 in alcuni punti si è misurata una variazione in quota (potenza) fino a quasi 3,5 m, come mostrato in Figura 12a, b.

Per descrivere in maniera esaustiva l’intera frana è utile fare molte sezioni e scegliere di volta in volta la posizione e l’orientazione del profilo. Poiché questa procedura non si presta a un automatismo, è di fatti poco applicabile e si è quindi limitata l’estrazione delle sezioni a piccole aree ove era

necessaria un’indagine più approfondita.

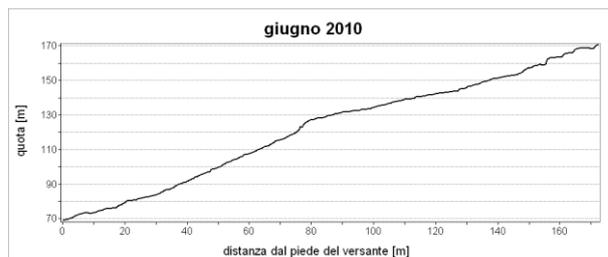


Figura 12a. Profilo di una sezione (ved. Fig. 4) fatta in corrispondenza del tunnel verso monte della superficie di Giugno 2010

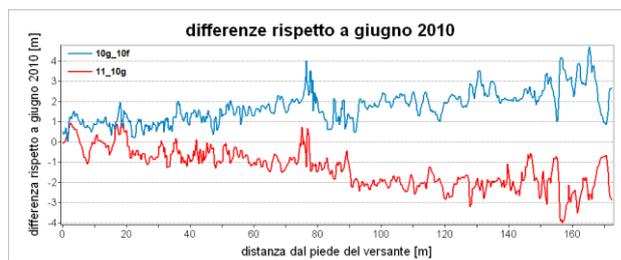


Figura 12b. Profili delle differenze delle superfici del 2011 e di Febbraio 2010 rispetto a quella di Giugno 2010; le differenze sono state calcolate come; Giugno 2010 – Febbraio 2010 (linea blu) 2011 – Giugno 2010 (linea rossa).

5. DISCUSSIONE

Tra le applicazioni del laser scanner terrestre, il monitoraggio di frane è probabilmente una delle più complesse perché la morfologia della frana non corrisponde a un pattern geometrico che faciliti la ricostruzione della superficie, come avviene invece nelle applicazioni industriali.

Come evidenziato da diversi autori (Abellan et al., 2014) è importante effettuare i rilievi LST rispettando un insieme di procedure per l’elaborazione dei dati e i relativi calcoli per determinare i volumi mobilitati.

La prima criticità riguarda la fase di georeferenziazione del rilievo in un sistema stabile nel tempo e le modalità con le quali effettuare il confronto tra rilievi acquisiti in epoche diverse. La significatività degli spostamenti individuati dipende infatti dall’affidabilità dell’inquadramento dei diversi rilievi in uno stesso sistema di riferimento stabile nel tempo.

Se sono presenti sul bordo dell’area rilevata manufatti o oggetti che possono essere considerati stabili nel tempo, conviene utilizzarli come frame di riferimento; se viceversa non è presente nessun manufatto stabile a distanza utile di rilievo, conviene assumere come riferimento stazioni permanenti GNSS, le cui coordinate siano definite e monitorate in un Sistema di Riferimento solidale con la placca tettonica di appartenenza. Generalmente le stazioni di riferimento si trovano piuttosto lontano dal luogo del rilievo, ma l’imprecisione introdotta da un collegamento GPS prolungato è modesta, nel nostro caso di alcuni cm, a fronte della garanzia data dalla stabilità della posizione monitorata su una vasta zona.

La precisione del posizionamento della nuvola di punti laser ovviamente dipende anche dal corretto allineamento delle diverse scansioni effettuate e dalla georeferenziazione della nube complessiva. Nel caso in oggetto una valutazione sia pure locale della ripetibilità della georeferenziazione della nube è resa possibile dalla presenza di un artefatto che è plausibile ritenere stabile nel tempo, costituito da un ponte ferroviario e il paramento dell’imboccatura del tunnel. Esso si trova nella parte

bassa del versante, a breve distanza da una delle stazioni laser, ed è stato rilevato con un'alta densità di punti che ha permesso l'identificazione, nei quattro rilievi fatti, di diversi dettagli, come gli spigoli dei conci e della balaustra del paramento del tunnel. Sono state calcolate le posizioni di tali oggetti e le differenze medie nelle posizioni nei vari rilievi, prendendo come riferimento il primo rilievo (Tab. 5).

Differenze vs 2010f (cm)	2010G	2011G	2012G
Est	-1,9	-0,5	6,3
Nord	-1,8	9,0	-3,5
Quota	-0,3	-0,4	-3,8
Totale	2,6	9,0	8,1

Tabella 5. Scostamenti 3D dei punti di controllo rispetto alla posizione che avevano nel primo rilievo.

Gli scostamenti tridimensionali osservati sono sempre inferiori ai 10 cm. Un altro controllo fatto riguarda le quote dell'impalcato del ponte ferroviario, pressoché orizzontale, considerando come breaklines le geometrie principali del ponte e del tunnel ferroviario.

Si mostra in Figura 13 la differenza tra i DEM dell'ultimo rilievo rispetto al primo. L'interpolazione è stata fatta considerando solo i punti compresi nell'area del ponte ferroviario. Le isolinee corrispondenti alla differenziazione dei DEM hanno un'equidistanza di 5 cm; sono rappresentate in giallo le aree con differenze intorno allo zero. Isolinee corrispondenti a differenze di quota comprese tra i 5 e 10 cm si trovano quasi esclusivamente in corrispondenza dei binari e sono quindi probabilmente da considerare legate alla differente geometria d'acquisizione degli attacchi (gli elementi di raccordo delle rotaie alle traversine) nelle due scansioni.

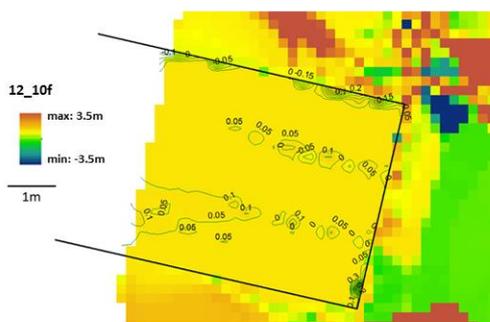


Figura 13. Isolinee estratte dal grigliato risultante dalla differenza dei DEM del 2012 e di Febbraio 2010. L'area rappresentata è relativa all'imboccatura del tunnel di fig 3.

Si conferma che l'incertezza in quota della georeferenziazione alle varie epoche è di alcuni cm.

I valori di scostamento ottenuti sono relativi a una singola zona periferica nella scena e costituiscono solo un controllo, in quanto non sembra il caso di effettuare una trasformazione delle nubi solo sulla scorta di quel dato locale; non si possono escludere effetti di rotazione che non si è in grado di controllare su altri punti, per esempio sulla parte alta della frana.

Come visto, il confronto delle scansioni si può fare in diversi modi, e la scelta di quale metodo utilizzare dipende dal contesto e dall'oggetto d'interesse.

Cercare di ricostruire l'andamento generale con i profili sarebbe dispendioso e meno significativo della comparazione o della differenziazione dei DEM, ma su alcuni dettagli il confronto dei profili è particolarmente utile.

Si consideri, ad esempio, il muro di sostegno nell'area circostante il tunnel, visibile in Figura 3. Il risultato

dell'operazione di "comparison" tra le scansioni acquisite nel Febbraio 2010 e nel Giugno 2012 non è d'immediata interpretazione, com'è possibile constatare dall'immagine di Figura 14, relativa a un particolare del muro di sostegno del tunnel. Nella comparazione si evidenziano solo alcune anomalie, rappresentate da un colore chiaramente differente dalle aree circostanti, dalla forma irregolare non corrispondente alla geometria di un concio, assai difficili da interpretare.

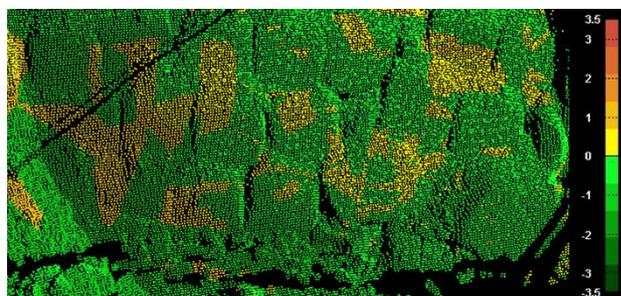


Figura 14. "Comparison" tra la nuvola di punti di Giugno 2012 e la superficie di riferimento di Febbraio 2010; particolare dei conci in corrispondenza della linea di sezione; rappresentata in figura 3. I valori della scala sono in metri.

Una chiara evidenza dell'intervento umano nell'area del corpo di frana "1.1.2.1" si ha dal confronto dei profili tracciati nelle quattro scansioni: i conci del muro di sostegno a destra del tunnel ferroviario sono stati rimossi e di nuovo riposizionati, passando da tre a cinque filari. In Figura 15 sono riportate le sezioni tracciate lungo i conci del muro di sostegno vicino all'imboccatura del tunnel ferroviario (la posizione della linea di sezione è indicata in rosso in Fig. 3). Più in dettaglio, l'analisi delle sezioni evidenzia che l'intervento al muro di sostegno è avvenuto nell'intervallo di tempo intercorso tra il Giugno 2010 e il Giugno 2011.

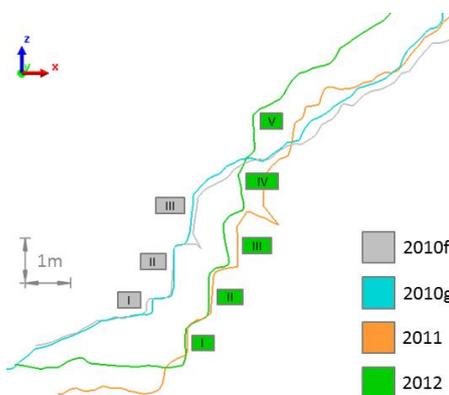


Figura 15. Profili tracciati lungo le superfici interpolate dalle scansioni; i numeri latini indicano la posizione dei filari dei conci del muro di sostegno a Febbraio 2010 e a Giugno 2011.

6. CONCLUSIONI

L'uso del LST per il monitoraggio di terreni in frana ha dato risultati assai positivi sotto diversi aspetti. Uno di questi è la possibilità di ricavare dai DEM carte con caratteristiche morfologiche (pendenza, esposizione, curvatura, TRI) che assieme alle curve di livello facilitano la interpretazione geomorfologica dettagliata della superficie ad una certa epoca; è stato possibile ricavare la delimitazione dettagliata dei corpi di frana delle varie generazioni presenti.

I metodi usati per il monitoraggio dei cambiamenti di forma

della superficie, cioè il confronto diretto di nubi, la differenziazione dei DEM su grigliato a passo fitto estratti da esse, il confronto di profili lungo certe direttrici, sono risultati tutti e tre adeguati allo scopo e necessari in quanto evidenziano aspetti specifici.

Ad esempio, la 'comparison' non consente un semplice e diretto calcolo dei volumi ma ha permesso di stimare lo shift tra le nubi su un particolare mentre i profili hanno evidenziato un intervento - non segnalato - sulle file di concii di sostegno avvenuto nell'intervallo tra due rilievi.

L'uso dei DEM alle varie epoche e la delimitazione accurata dei corpi di frana ha consentito la valutazione di materiale mobilitato nei singoli corpi.

Per contro, il metodo proposto non è semplice da applicare poiché richiede grande attenzione in varie fasi. La georeferenziazione ad esempio, nel caso (come quello di studio) di assenza di particolari sicuramente stabili sul contorno, richiede il collegamento a Stazioni Permanenti (ad esempio di reti NRTK, se disponibili). Ciò comporta un sensibile aggravio di lavoro sia in termini di stazionamento GPS che di elaborazione dei dati acquisiti, anche perché

l'individuazione di target affetti da eventuali errori grossolani non è aiutata da procedure statistiche rigorose che mancano nei software, almeno in quelli utilizzati.

La forma del DEM (e quindi i prodotti da esso derivati) risente del tipo di interpolatore e del passo del grigliato adottati. È stato necessario inserire break-lines per modellare le discontinuità brusche presenti in manufatti e ciò ha comportato un sensibile aggravio di lavoro oltre a limitare la scelta dell'interpolatore.

L'esperienza ha suggerito inoltre il controllo del valore degli scarti tra punti della nube non usati nell'interpolazione e DEM del quale si voglia valutare l'aderenza ai dati rilevati.

BIBLIOGRAFIA

Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N.J., Lim, M., Lato, M.J., 2014. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surf. Processes and Landforms*, 39, pp. 80-97.

Barbarella, M., Fiani, M., 2013. Monitoring of large landslides by Terrestrial Laser Scanning techniques: field data collection and processing. *Eur J Remote Sensing*, 46, pp. 126-151.

Barbarella, M., Fiani, M., Lugli, A. 2014. Landslide monitoring using multitemporal terrestrial laser scanning for ground displacement analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*.

Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslides Types and Processes. *Landslides: Investigation and Mitigation*. In: *Transportation Research Board Special Report 247*, Turner A.K. & Schuster R.L. Eds., National Academy Press, WA, pp. 36-75.

Dramis, F., Guida, D., Cestari, A., 2011. Nature and Aims of Geomorphological Mapping. In: *Geomorphological Mapping: Methods and Applications: A Professional Handbook of Techniques and Applications (Developments in Earth Surface Processes)*, M. J. Smith, P. Paron, J. S. Griffith, Elsevier, pp. 39-73.

ESRI, 2012. ArcGIS Desktop: Release 10.1. Redlands, CA, Environmental Systems Research Institute.

Golden Software, 2013. SURFER Mapping Software Program, Version 11. Golden, Colorado.

Guida, D., 2013. Delimitazione dei corpi di frana sul versante sinistro orografico del Vallone Fiumicello. Comunicazione personale.

Iside S.r.l., 2007. Servizio di monitoraggio dei corpi franosi insistenti sulla ex s.s. n. 447 tra km 70 e 72 nel Comune di Pisciotta. <http://www.centroside.net> (28 Febbraio 2015).

Kliparchuk, K., Collins, D., 2011. Evaluation of Stereoscopic GeoEye-1 Satellite Imagery to Assess Landscape and Stand Level Characteristics. *Proceedings of the ISPRS Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, WG I/3*, Calgary, AB, Canada.

Lichtenstein, A., Doytsher, Y., 2004. Geospatial Aspects of merging DTM with breaklines. *Proceedings of FIG Working Week 2004, NSDI and Data Distribution*, Athens, Greece, May 22-27, 2004.

Luzi, G., Pieraccini, M., Mecatti, D., Noferini, L., Macaluso, G., Galgaro, A., Atzeni, C., 2006. Advances in ground based microwave interferometry for landslides survey: a case study. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (12), pp. 2331-2350. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/01431160600554975>.

McKean, J., Roering, J., 2004. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57, pp. 331-351. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00164-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00164-8).

Metternicht, G., Hurni, L., Gogu, R., 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geospatial for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98, pp. 284-303. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.004>.

Mongillo, M., 2011. Choosing Basis Functions and Shape Parameters for Radial Basis Function Methods. www.siam.org/students/siuro/vol4/S01084.pdf.

Pirotti, F., Guarnieri, A., Vettore, A. 2013a. State of the art of ground and aerial laser scanning technologies for high-resolution topography of the earth surface. *European J Remote Sens.*, 46, pp. 66-78. doi: 10.5721/EuJRS20134605.

Pirotti, F., Guarnieri, A., Vettore, A., 2013b. Ground filtering and vegetation mapping using multi-return terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, pp. 56-63. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2012.08.003.

Prokop, A., Panholzer, H., 2009. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, pp. 1921-1928. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-9-1921-2009>.

Yang, X., Hodler, T., 2000. Visual and statistical comparisons of surface modelling techniques for point-based environmental data. *Cartography Geogr Inf Sci*, 27(2), pp.165-175.