

# Rapporti tecnici

## INGV

**Utilizzo della fotogrammetria SfM  
terrestre per il monitoraggio dei  
versanti: considerazioni sulle precisioni  
per applicazioni a lunga distanza**

# 394



## **Direttore Responsabile**

Silvia MATTONI

## **Editorial Board**

Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV-RM1)

Raffaele AZZARO (INGV-CT)

Mario CASTELLANO (INGV-NA)

Viviana CASTELLI (INGV-BO)

Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)

Mauro DI VITO (INGV-NA)

Marcello LIOTTA (INGV-PA)

Mario MATTIA (INGV-CT)

Milena MORETTI (INGV-CNT)

Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)

Umberto SCIACCA (INGV-RM2)

Alessandro SETTIMI

Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)

Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)

Aldo WINKLER (INGV-RM2)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.173 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



# Rapporti tecnici INGV

## UTILIZZO DELLA FOTOGRAMMETRIA SFM TERRESTRE PER IL MONITORAGGIO DEI VERSANTI: CONSIDERAZIONI SULLE PRECISIONI PER APPLICAZIONI A LUNGA DISTANZA

Arianna Pesci<sup>1</sup>, Vanja Kastelic<sup>2</sup>, Giordano Teza<sup>3</sup>, Michele Carafa<sup>2</sup>, Pierfrancesco Burrato<sup>2</sup> e Roberto Basili<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

<sup>2</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Sismologia e Tettonofisica)

<sup>3</sup>UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA (Dipartimento di Geoscienze)

**Come citare:** Pesci A. et al., (2018). Utilizzo della fotogrammetria SfM terrestre per il monitoraggio dei versanti: considerazioni sulle precisioni per applicazioni a lunga distanza. Rapp. Tec. INGV, 394: 1-24.

# 394



## **Indice**

Introduzione	'7
1. Area di interesse	'7
2. Area test e strumentazioni utilizzate	'8
3. Trattamento e analisi dati	10
3.1 Modellazione SfM	10
3.2 Confronti tra le nuvole di punti	11
3.3 Mappe delle differenze 1	12
3.4 Mappe delle differenze 2	14
4. Discussione	16
Conclusioni	19
Ringraziamenti	19
Bibliografia	19



## Introduzione

La fotogrammetria digitale *Structure-from-Motion* (SfM) oggi è molto utilizzata poiché permette di ottenere modelli digitali completi e ad alta precisione con operazioni semplici tanto nella fase di misura, attuata mediante una normale fotocamera ed eventualmente basata su una rete di appoggio topografico, quanto in quella di analisi dati. Si tratta di una tecnologia versatile che risulta utile sia in ambito topografico/geomorfologico [Westoby et al., 2012], sia in ambito architettonico [Teza et al., 2016].

In questo lavoro sono presentati i risultati di una campagna di misura esclusivamente terrestre, quindi realizzata senza l'ausilio di sistemi aerei quali droni, finalizzata al rilievo di un versante in zona aquilana. Lo scopo è quello di capire se sia possibile o meno realizzare monitoraggi del terreno realmente utili per misurare variazioni morfologiche mediante comparazione di modelli multitemporali ottenuti con procedure di acquisizione dati a basso costo. Tali procedure sono caratterizzate da una logistica di lavoro semplice e indipendente, senza l'uso di punti di controllo a terra (Ground Control Points, GCPs), tenendo ben presente il fatto che, in condizioni di emergenza, un rilievo terrestre è fortemente vincolato alla accessibilità delle aree su cui è possibile camminare ed alla visuale spesso ostruita dalla presenza di vegetazione. Si sottolinea pertanto che la valenza del lavoro si riferisce essenzialmente al monitoraggio rapido e in presenza di fattori ostativi all'uso di GCPs, anche se alcuni dei risultati ottenuti riguardo alla risoluzione e alla scelta di una particolare fotocamera rispetto ad un'altra hanno validità generale.

È infatti di particolare interesse comprendere quale sia la risoluzione spaziale realmente ottenibile, la quale dipende dall'ottica della camera utilizzata per gli scatti e dalla distanza di lavoro, ma anche dalla copertura raggiungibile da osservazioni terrestri. È chiaro che, nel quadro di un monitoraggio libero e a basso costo, si tratta altresì di valutare le prestazioni, in termini di bontà dei modelli fotogrammetrici ottenuti, di fotocamere di fascia medio-alta ma non necessariamente di tipo professionale. Si parla cioè di apparecchi acquistabili con cifre contenute in alcune centinaia di euro e non migliaia. Per questo lavoro sono state utilizzate due fotocamere digitali di produzione Nikon: la D3300 e la Coolpix P520. Inoltre, per avere un riferimento stabile e preciso per scopi di confronto e validazione dei risultati, è stato utilizzato un laser scanner terrestre (TLS) *long range* Optech ILRIS-ER [Optech, 2017].

Il presente lavoro si aggiunge, completandole, alle esperienze precedenti condotte presso la sezione di Bologna dell'INGV e inerenti al confronto SfM e TLS [Pesci et al., 2015; Teza et al., 2016], all'ottimizzazione del numero di scatti fotografici [Pesci e Teza, 2016], alla valutazione della risoluzione del modello fotogrammetrico in funzione del pixel a terra [Pesci et al., 2016a] e alla valutazione dei risultati ottenibili con fotocamere diverse ma compatibili [Pesci et al., 2016b].

## 1. Area di interesse

La zona di interesse è l'Appennino centrale, più precisamente le scarpate in roccia carbonatica posizionate lungo i versanti montuosi che mettono in contatto carbonati con materiale detritico di versante. Secondo alcuni autori, queste strutture sono l'evidenza superficiale di faglie sismo genetiche e, di conseguenza, sono state studiate mediante analisi morfologiche, geochimiche e cronologiche per ricavarne tassi di spostamento, secondo l'ipotesi che tutto lo spostamento registrato lungo le scarpate fosse dovuto a fenomeni di fagliazione primaria cosismica [e.g. Benedetti et al., 2013, Cowie et al., 2017]. Secondo altri autori, invece, il fenomeno gravitativo e/o erosivo appare evidente lungo i versanti di montagna e dovrebbe essere indagato per fornire una interpretazione più specifica della dinamica dell'area [Kastelic et al., 2017]. Nell'ambito del Progetto Firb Abruzzo (UR3) sono stati monitorati 23 punti specifici su 12 diverse scarpate di faglia che hanno portato, in un periodo di circa 5 anni di osservazione, all'evidenza di un abbassamento del materiale di versante dell'ordine del cm/a. In questa finestra temporale, inoltre, nessun terremoto con le caratteristiche di magnitudo-profondità ipocentrale per permettere la deformazione superficiale cosismica si è enucleato nella zona di studio (ISIDE; <http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/index.jsp>), escludendo il processo di fagliazione primaria cosismica.

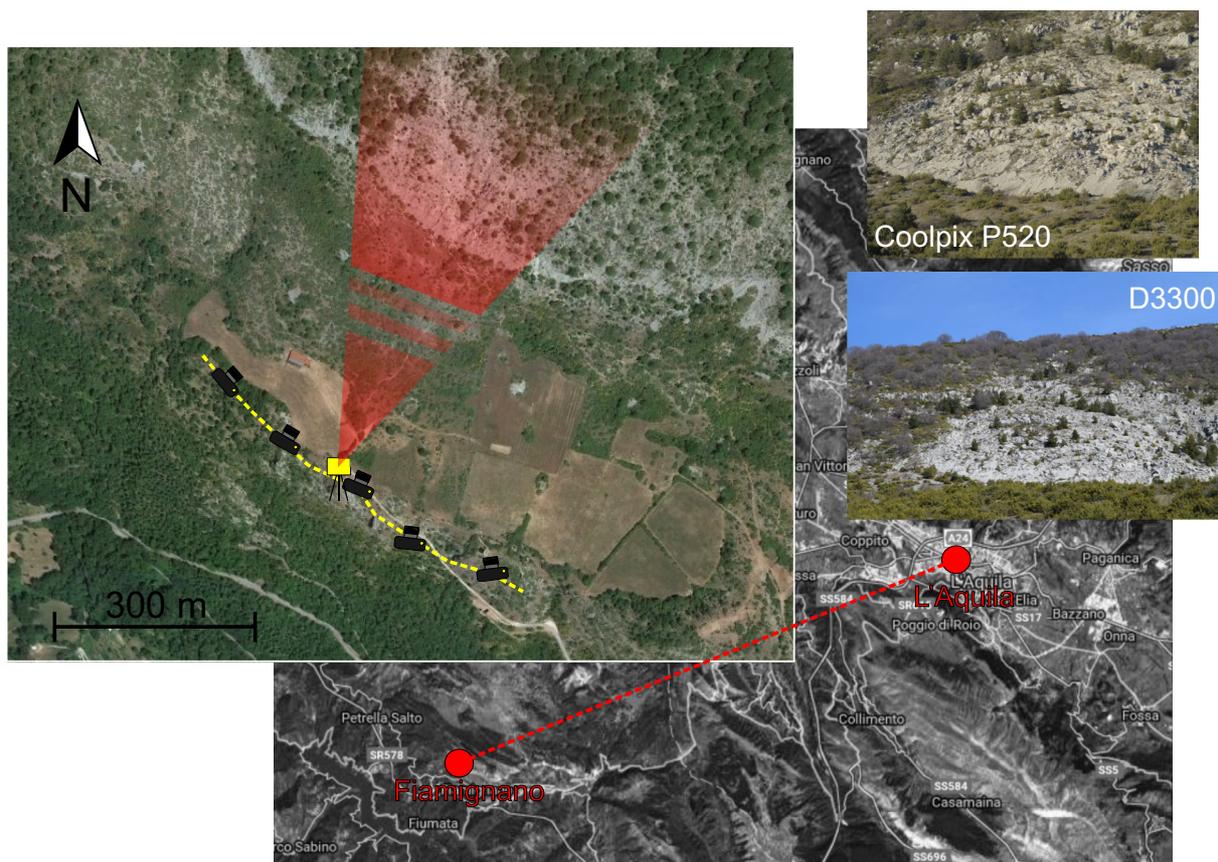
Al fine di fornire un quadro più chiaro ed esaustivo dei fenomeni in atto, per una caratterizzazione più oggettiva del campo di spostamento e del suo significato geofisico, si è pensato di applicare tecniche speditive di telerilevamento. Per passare da singole e ripetute misure puntuali alle porzioni del contatto tra le scarpate e il materiale di detrito più grandi e per campionare anche il colluvial wedge sotto il contatto, si sta procedendo ad uno studio di fattibilità nell'uso integrato di SfM e TLS per ottenere un controllo areale più

preciso sui processi agenti su ogni singola scarpata con tecniche differenti rispetto a quelle classiche applicate sin ora.

## 2. Area test e strumentazioni utilizzate

L'area test utilizzata per questo lavoro è una porzione di scarpata (Figura 1) raggiungibile a piedi o in auto percorrendo la strada sterrata che, passando per il comune di Fiamignano (AQ), si inerpica fino alla chiesetta della Madonna del Poggio. La zona si trova ad est della città dell'Aquila ad una distanza di circa 20 km. Una porzione di circa 200 x 200 m<sup>2</sup> di superficie è stata rilevata mediante TLS (campo rosso in figura) e tramite una serie di scatti fotografici, 35 per la precisione, con le fotocamere Nikon D3300 e Coolpix P520. La distanza tra la superficie da rilevare e gli strumenti varia tra i 300 m ed i 500 m e, trattandosi di un piano inclinato rispetto all'orizzontale e, giocoforza, rispetto alla linea di vista, ci si aspetta un degrado del contenuto di informazione geometrica procedendo verso l'alto della parete rocciosa, quindi a distanze crescenti. Per ogni punto di vista, la posizione di ciascuna fotocamera e il corrispondente orientamento erano analoghi, in modo da avere dati fotografici il più possibile paragonabili pur considerando le differenti prestazioni.

I rilievi fotografici sono stati eseguiti secondo la tipica buona pratica dell'osservazione finalizzata alla modellazione fotogrammetrica SfM con punti di vista terrestri [Micheletti et al., 2015]. In particolare, le fotocamere sono state utilizzate in modo da coprire l'area di interesse con osservazioni ad assi convergenti, in contrasto con l'approccio ad assi paralleli utilizzato invece nelle osservazioni da drone [Eltner et al., 2016].



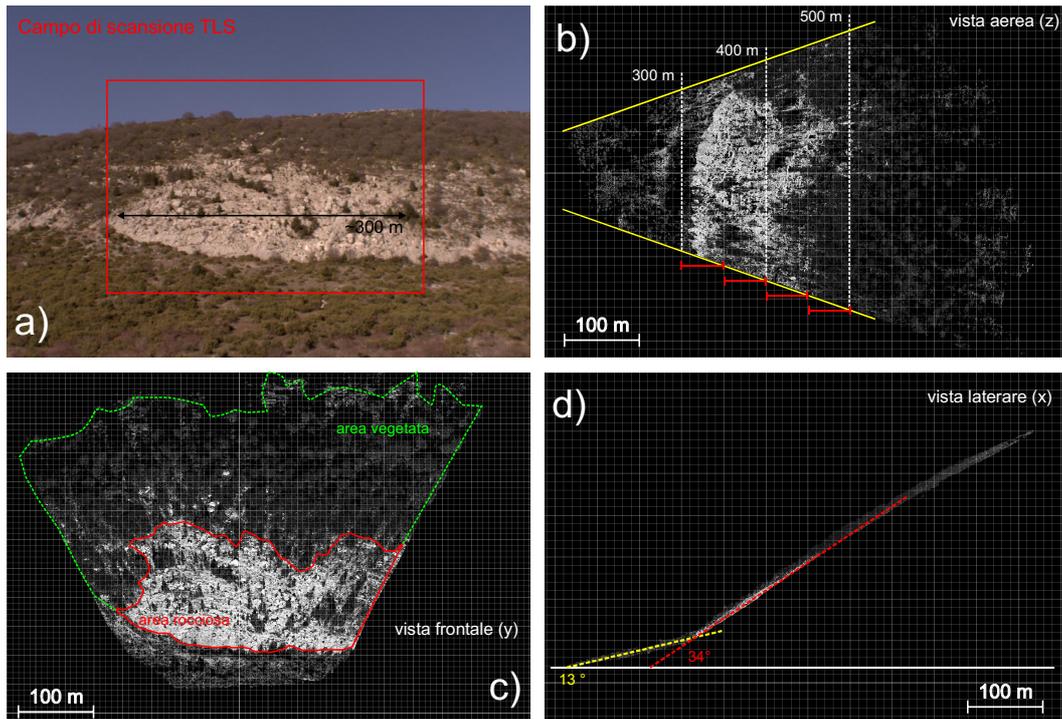
**Figura 1.** Area di studio: porzione di versante nel comune di Famignano (AQ). La parte evidenziata in rosso rappresenta l'area rilevata mediante TLS mentre il tratteggiato giallo mostra il percorso (camminamento) dal quale sono state scattate le immagini con le fotocamere digitali. Due foto sono visibili nella parte dx della figura.

I dati tecnici principali delle fotocamere utilizzate sono riportati in Tabella 1, dalla quale si evince immediatamente la differenza delle dimensioni fisiche del sensore. Definito il *Crop Factor* (CF) per una fotocamera quale rapporto  $CF = diag_{35} / diag_{sensor}$ , dove  $diag_{35}$  è la diagonale di una pellicola fotografica standard da 35 mm (36 mm x 24 mm), assunta quale riferimento, e  $diag_{sensor}$  è la diagonale del sensore della specifica fotocamera, questo è pari a 1 per le camere professionali *full frame* ma è significativamente maggiore per i modelli di fascia minore (qui si trascura, per semplicità, la questione del rapporto tra i lati del sensore e della pellicola, che suggerisce di definire, in alcuni casi, il CF sulla base della larghezza e non della diagonale). Nel caso della Nikon D3300 il CF è 1.5, mentre per la Coolpix P520 sale a 5.6. Senza entrare nel merito delle specifiche della fotografia digitale, è intuitivo comprendere come un elevato CF si traduca in un esasperato schiacciamento dei pixel sul sensore di piccole dimensioni, che provoca da un lato un peggioramento del rapporto segnale su rumore (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) e dall'altro la riduzione del campo di vista. In sostanza, a parità di altri fattori, l'aumento del CF comporta un peggioramento della risoluzione della fotografia, come si vedrà in dettaglio nella Sezione 4.

Parametro	Unità di misura	Nikon D3300	Nikon Coolpix P520
Dimensioni sensore	mm	23.5 x 15.6	6.16 x 4.62
Matrice di pixel	px x px	6000 x 4000	4896 x 3672
	Mpx	24	18
Profondità	bit	24	24
Distanza focale ( $f$ )	mm	55	24
Numero $f$	-	f/8	f/4.3
Esposizione	s	1/250	1/400
Sensibilità	ISO	400	100
Crop factor ( $CF$ )	-	1.5	5.6

**Tabella 1.** Caratteristica principale delle camere Nikon D3300 e Coolpix P520. Il Crop Factor indica il rapporto tra la diagonale del sensore e la dimensione standard di 35 mm.

Il rilievo TLS ha permesso di ottenere un modello metrico ed adeguatamente preciso dell'area, mostrato in dettaglio in figura 2. Si tratta di una parete rocciosa inclinata mediamente di  $34^\circ$  che sovrasta una zona detritica la cui superficie è inclinata di circa  $13^\circ$ . Le viste lungo gli assi cartesiani ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) permettono di avere una chiara idea delle distanze in gioco. Utilizzando lo strumento ILRIS (il cui segnale laser ha 1535 nm di lunghezza d'onda e quindi è sensibile al contenuto di acqua degli oggetti scansati) si ottiene un dato di intensità che permette di evidenziare le aree vegetate (umide) caratterizzate da riflettività bassa. Una bassa intensità del segnale laser ricevuto (si tratta di un'interessante conseguenza del ricorso ad una lunghezza d'onda tale da dar luogo a forte assorbimento da parte dall'umor acqueo dell'occhio per poter avere uno strumento in Classe 1, ossia *eyesafe*) crea contrasti utili nella ricerca di dettagli. Il dato TLS, di cui si è ampiamente parlato in passato, si veda ad esempio Pesci et al. [2011], non risente eccessivamente di variazioni della distanza di lavoro se non per una riduzione della densità dei punti nello spazio, s'intende a patto che non si operi al limite della sua portata; la risoluzione spaziale, nel *range* tra 300 m e 500 m, varia linearmente con la distanza tra 2 cm e 4 cm. Con ciò si intende dire che la variazione della distanza di acquisizione non si traduce nell'introduzione di significative deformazioni apparenti o di altre anomalie, ma solo in una variazione della precisione e della risoluzione.



**Figura 2.** a) Porzione di versante rilevato con TLS nel campo di vista dello strumento ( $40^\circ \times 40^\circ$ ). Il riquadro rosso indica il ROI cioè la sottoarea scelta dall'operatore; b) la nuvola di punti TLS vista dall'alto (asse  $z$ ) sulla quale sono state evidenziate, con linea tratteggiata, alcune distanze di riferimento rispetto allo strumento; c) la nuvola di punti TLS vista frontalmente (asse  $y$ ) con evidenziate le aree molto vegetate (verde) e quelle in cui predomina la componente rocciosa (rosso); d) la nuvola di punti TLS vista da lato (asse  $x$ ) per mettere in evidenza la geometria generale del versante con una inclinazione di circa  $34^\circ$  per la parte più alta e di circa  $13^\circ$  nella zona sottostante.

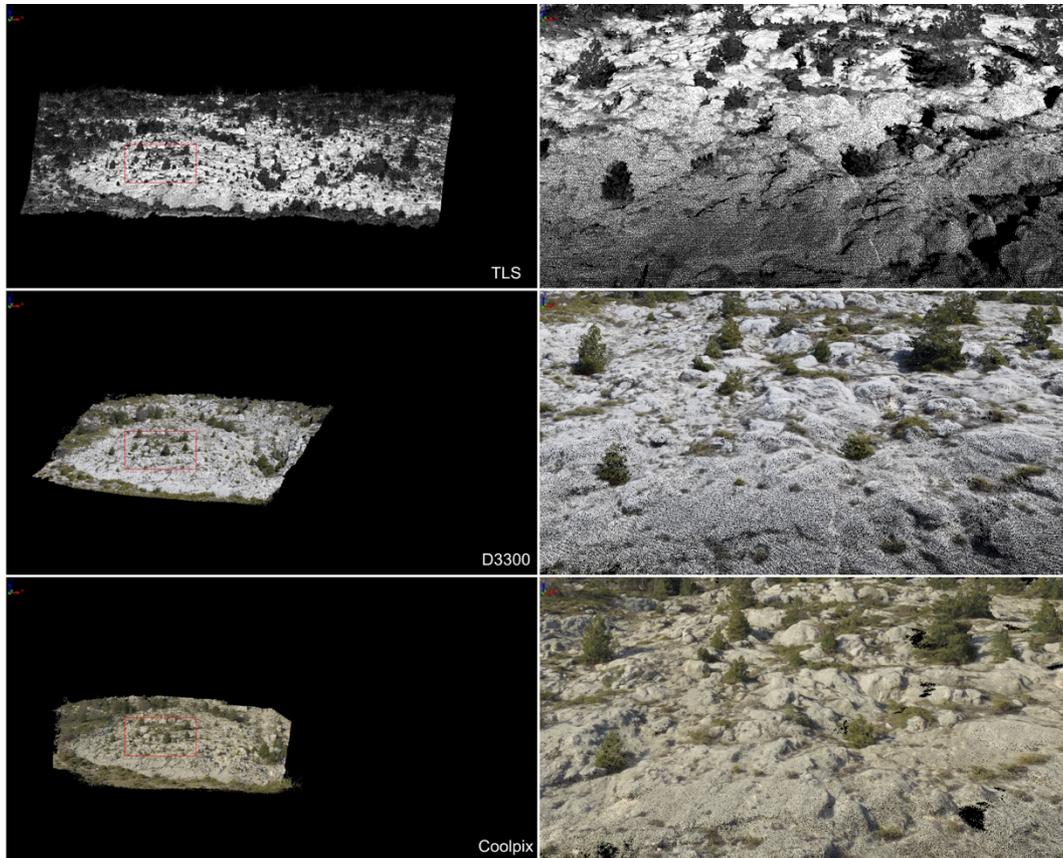
### 3. Trattamento e analisi dati

La modellazione fotogrammetrica è stata attuata, per entrambe le serie di dati ottenute dalle fotocamere impiegate, mediante il software Photoscan [Agisoft, 2017], ottenendo le corrispondenti nuvole di punti, cioè due insiemi di coordinate cui è associato il dato radiometrico (colore) nei tre canali RGB.

#### 3.1 Modellazione SfM

Come accennato nell'Introduzione, il lavoro si riferisce essenzialmente all'acquisizione rapida con misure terrestri della geometria di una superficie in presenza di fattori ostativi all'uso di GCPs. La procedura seguita non ha pertanto previsto né l'inserimento delle coordinate delle posizioni via via assunte dalla fotocamera (cosa che generalmente accade se è utilizzata una fotocamera su drone) nella fase di allineamento delle immagini, cioè la fase di calcolo mediante la quale viene ricostruita la posizione relativa delle camere nello spazio, né l'inserimento delle coordinate dei GCPs nella fase di *bundle adjustment*, eseguita, nel caso di PhotoScan, nell'ottimizzazione dell'allineamento [Pesci et al., 2017]. Pertanto, il *bundle adjustment*, cioè l'affinamento contemporaneo delle coordinate 3D che descrivono la geometria della scena, delle posizioni via via assunte dalla fotocamera durante il rilievo e dei parametri ottici della fotocamera è stato eseguito in modo del tutto libero, ottenendo però nuvole di punti definite a meno di un fattore di scala. Per ciascuna nuvola di punti, il fattore di scala è stato poi ottenuto utilizzando il più volte descritto metodo delle polilinee [Pesci et al., 2016a; 2016b]. In sostanza, le nuvole di punti ottenute dalla modellazione SfM sono state scalate e rototraslate per poter essere confrontate tra loro. Il risultato di questa fase di lavoro è mostrato nella figura 3 dove possiamo vedere le tre nuvole di punti: la prima ottenuta con TLS e le altre dalla fotogrammetria. Si sottolinea comunque che, in caso di necessità di misure di elevata precisione, l'uso di GCPs acquisiti mediante misure topografiche di appoggio (ad esempio, con ricevitori GPS operanti in

modalità rapido-statica) e di software SfM che permette l'effettiva introduzione di GCPs nella fase di *bundle adjustment*, quale Photoscan, deve ritenersi necessario. Si tratta comunque di un problema diverso da quello qui presentato, che si riferisce invece ad un rilievo rapido e in condizioni problematiche.



**Figura 3.** Le nuvole di punti TLS e SfM oggetto del lavoro (parte sx) e uno zoom (dx) per avere una informazione diretta sul dettaglio raggiunto e sulla tipologia di informazione che è geometrica (coordinate dei punti) e radiometrica (intensità del segnale in toni di grigio per il TLS e colore R,G,B per la fotogrammetria).

### 3.2 Confronti tra le nuvole di punti

Le nuvole di punti SfM sono state elaborate mediante il pacchetto software PolyWorks [Innovmetric, 2017], da cui sono stati ricavati due modelli (DTM) digitali e, grazie alle procedure di *surface matching* disponibili nel modulo IMAlign, sono stati allineati al DTM da TLS, considerato quale modello di riferimento. Tali procedure consistono nell'applicazione di algoritmi ai minimi quadrati per minimizzare la distanza tra i punti e le normali degli elementi di superficie [Bergevin et al., 1996]. Tutti i DTM sono riferiti ad un piano ortogonale alla linea di vista del rilievo TLS e hanno lato di 4 cm. Il dato di interesse, riportato in tabella 2, è l'errore di allineamento calcolato come la deviazione standard delle differenze tra i modelli SfM ed il modello di riferimento.

Camera	Int. All. 2 m	Int. All. 0.2 m	Area utilizzata
D3300 su TLS	-0 ± 0.094	<b>-0 ± 0.062</b>	TOTALE
Coolpix su TLS	0 ± 0.242	0 ± 0.088	TOTALE
Coolpix su D3300	-0 ± 0.212	0 ± 0.090	TOTALE
D3300 su TLS	-0 ± 0.050	<b>-0 ± 0.044</b>	BOTTOM
Coolpix su TLS	0.001 ± 0.092	0.001 ± 0.066	BOTTOM
Coolpix su D3300	0.001 ± 0.088	0.000 ± 0.065	BOTTOM

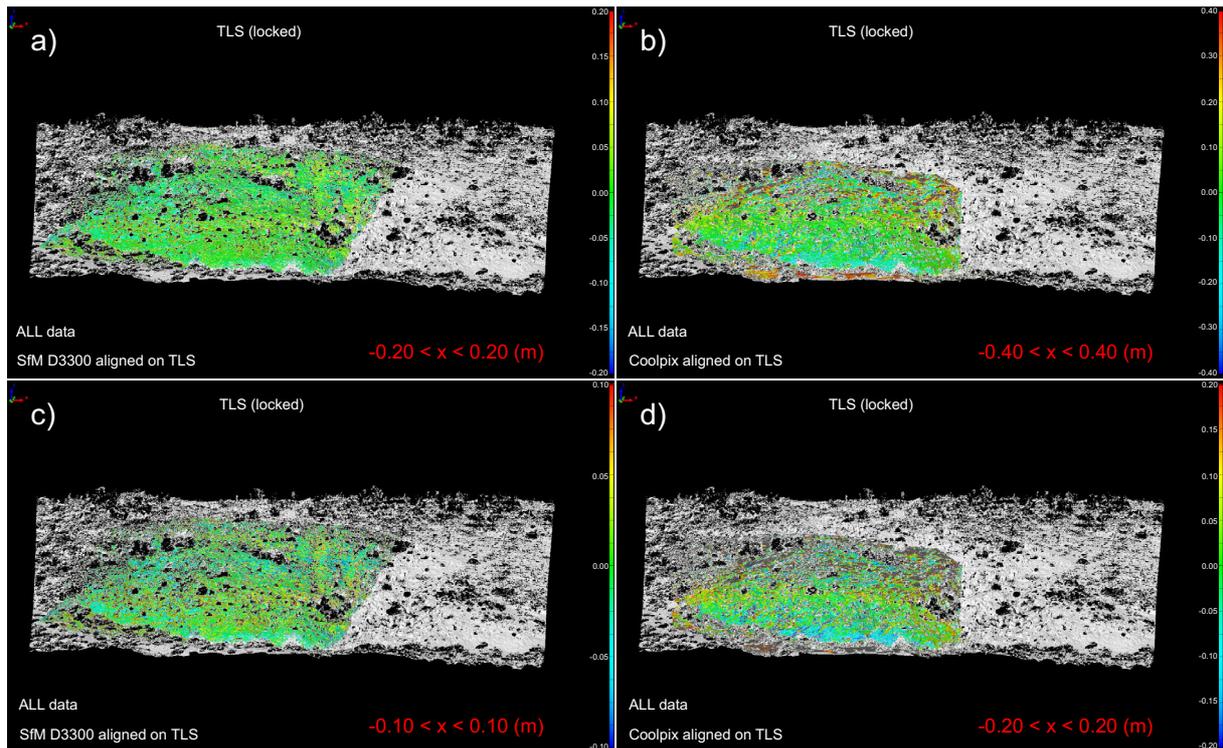
**Tabella 2.** Risultati dell'allineamento tra modelli SfM e TLS. Sono stati effettuati gli allineamenti su due intervalli di lavoro (intorno dei punti) di 2 m, inizialmente, e 20 cm successivamente. I valori nella terza colonna rappresentano la media e deviazione standard dei residui (differenze) tra i modelli dopo l'allineamento. La quarta colonna indica se l'allineamento sia avvenuto utilizzando tutte le parti di superficie in comune tra i modelli (TOTALE) o scegliendo solo lo strato roccioso contenuto nei primi 100 metri di parete rocciosa (BOTTOM).

Appare evidente che i risultati più convincenti riguardano il modello ottenuto dalle immagini scattate con la camera D3300. Infatti le variazioni si aggirano, in media, su un valore di 6 cm. L'allineamento è stato fatto utilizzando tutte le parti in comune (TOTALE) ma anche limitandosi alle aree in roccia più vicine (BOTTOM) limitatamente alla distanza di riferimento contenuta nell'intervallo 300-400 m, escludendo cioè le zone più lontane e, presumibilmente, meno facilmente modellabili in virtù della pendenza del versante. In questo caso il risultato è migliorato fornendo un valore di circa 4 cm. Si noti come, in tutti i casi, i valori relativi alla Coolpix P520 siano sempre più alti di circa il 30%.

### 3.3 Mappe delle differenze 1

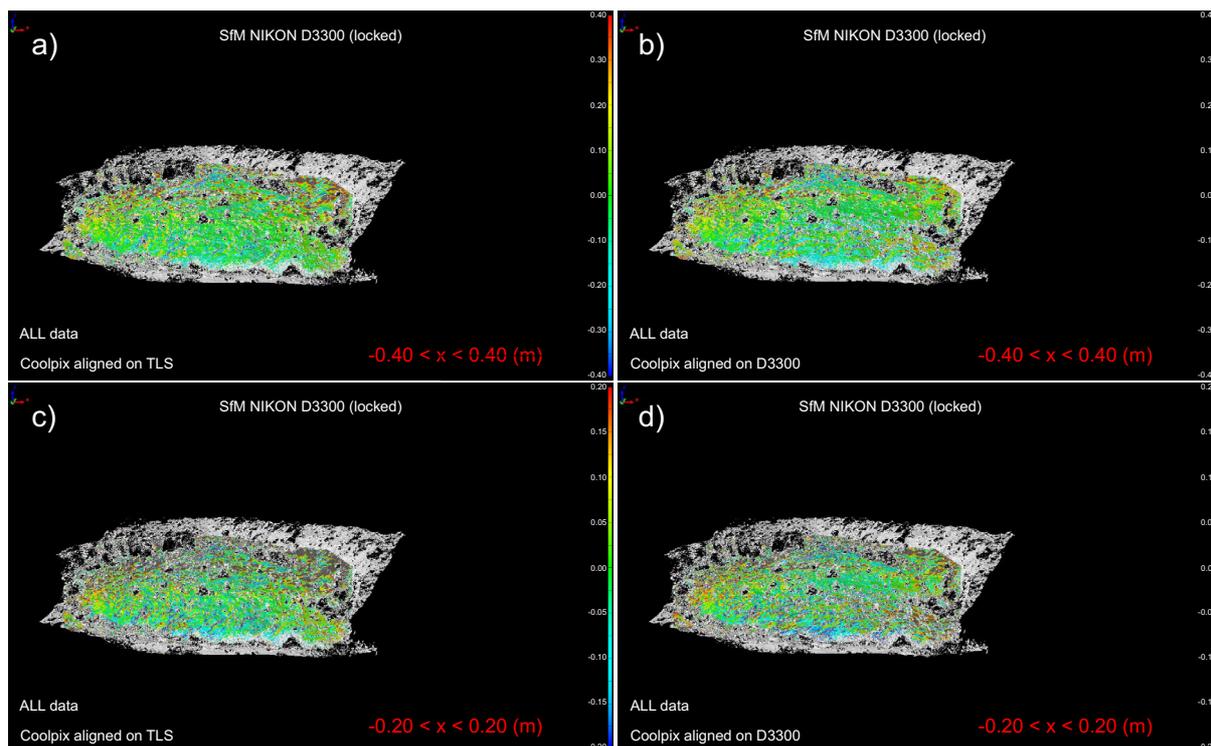
In tabella 2 viene mostrato un singolo valore statistico, cosa non sufficiente per rivelare se il risultato sia o meno accettabile, cioè per dimostrare se e quanto sia utile un modello digitale ottenuto da campagne SfM terrestri. Per questo motivo è stato necessario visualizzare la mappa delle differenze tra i modelli TLS e SfM e controllare la distribuzione dei valori su tutta l'area.

In figura 4 si mostrano le mappe ottenute utilizzando tutta l'area in comune tra i modelli digitali per il loro allineamento. È importante notare che le scale (di tipo rainbow) di colore non sono uguali poiché i residui, nel caso della Coolpix P520, sono più grandi. Non solo: nel caso della D3300 si può osservare come la distribuzione del colore sia mista tra toni di giallo e azzurro ad indicare differenze più o meno contenute tra ±5 cm in tutta l'area di sovrapposizione; nel caso della Coolpix P520, oltre ad evidenziarsi valori maggiori pare anche persistere un sistematismo, cioè differenze spalmate in modo non casuale sull'area in un intervallo assai maggiore del precedente (±15-20 cm).



**Figura 4.** Allineamento delle nuvole di punti fotogrammetriche con la nuvola TLS (riferimento), per eseguire il quale sono state considerate tutte le aree comuni ai modelli: a) mappa delle differenze con il DTM ottenuto dalla Nikon D3300 nell'intervallo  $[-0.2, 0.2]$  m; b) mappa delle differenze con il DTM ottenuto dalla Nikon Coolpix P520 nell'intervallo  $[-0.4, 0.4]$  m; c) mappa delle differenze con il DTM basato su D3300 nell'intervallo  $[-0.1, 0.1]$  m; d) mappa delle differenze con il DTM basato su P520 nell'intervallo  $[-0.2, 0.2]$  m.

Nella figura 5 è mostrata la mappa delle differenze tra le nuvole di punti SfM, già allineate sul TLS, e allineate tra loro effettuando un nuovo ciclo di rototraslazione (per minimizzare le differenze). Si nota una coerenza di risultato ed una distribuzione delle differenze estremamente simile (non identica) dove, giocoforza, è il modello meno preciso (in questo caso SfM Coolpix P520) a governare l'ampiezza dei valori. Come già visualizzato in tabella 2, la deviazione standard nel confronto tra D3300 e Coolpix P520 è circa la stessa del confronto tra Coolpix P520 e TLS.

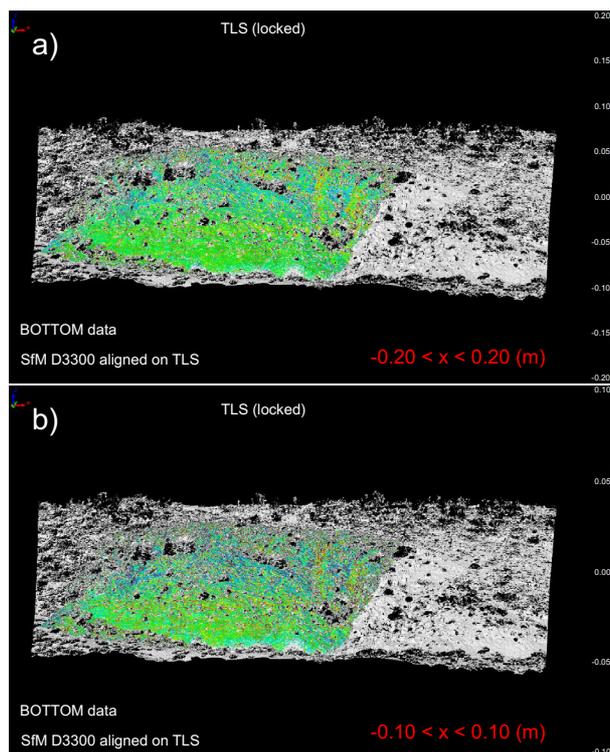


**Figure 5.** Allineamento delle nuvole di punti fotogrammetriche: a,c) Confronto diretto tra il modello da D3300 e Coolpix P520 rispettivamente allineate sul TLS (vedi figura precedente), mostrato negli intervalli  $[-0.4, 0.4]$  m e  $[-0.2, 0.2]$  m; b,d) Risultato dell'allineamento tra i modelli SfM dopo avere riallineato il DTM relativo alla Coolpix P520 su quello della D3300 (bloccato nello spazio). Anche in questo caso la scala di colori è riferita agli intervalli  $[-0.4, 0.4]$  m e  $[-0.2, 0.2]$  m.

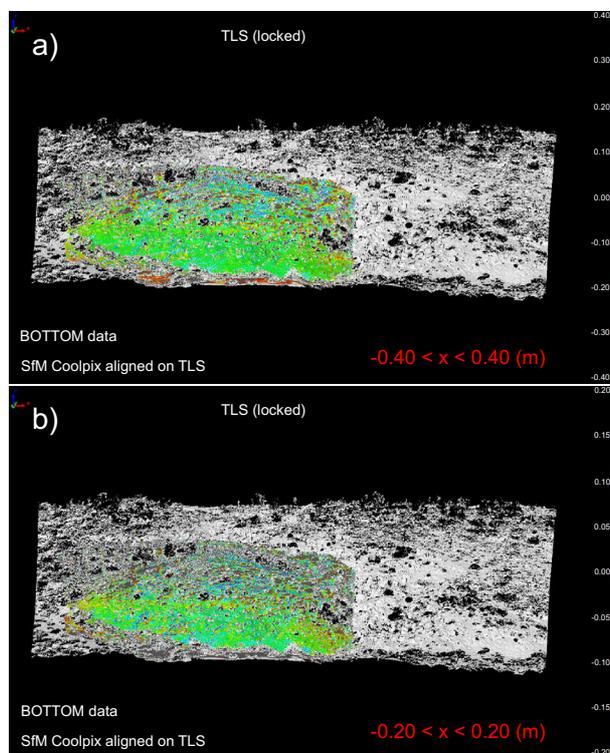
### 3.4 Mappe delle differenze 2

L'analisi mostrata in precedenza è stata rieseguita limitando l'area utile ai fini al calcolo dei parametri di roto-traslazione (allineamento) alla parte di parete compresa tra 300 m e 400 m di distanza dagli strumenti. L'idea è quella di mettere in evidenza se, escludendo dal calcolo dei minimi quadrati le zone più lontane che, a rigor di logica, data la superficie piatta e inclinata sono per forza portatrici di minor precisione, possano apparire sistematismi importanti nella mappa delle differenze tra modelli. La figura 6 mostra con chiarezza come, nel caso del confronto "di tipo BOTTOM", il modello relativo alla D3300 sia soggetto a un piccolo sistematismo stimabile in alcuni cm. Lo stesso non si può dire nel caso della Coolpix P520 che, come ci si poteva aspettare, mostra differenze importanti anche superiori a 10-15 cm con un sistematismo che potrebbe compromettere una interpretazione anche cauta dei dati nel corso di un monitoraggio (Figura 8).

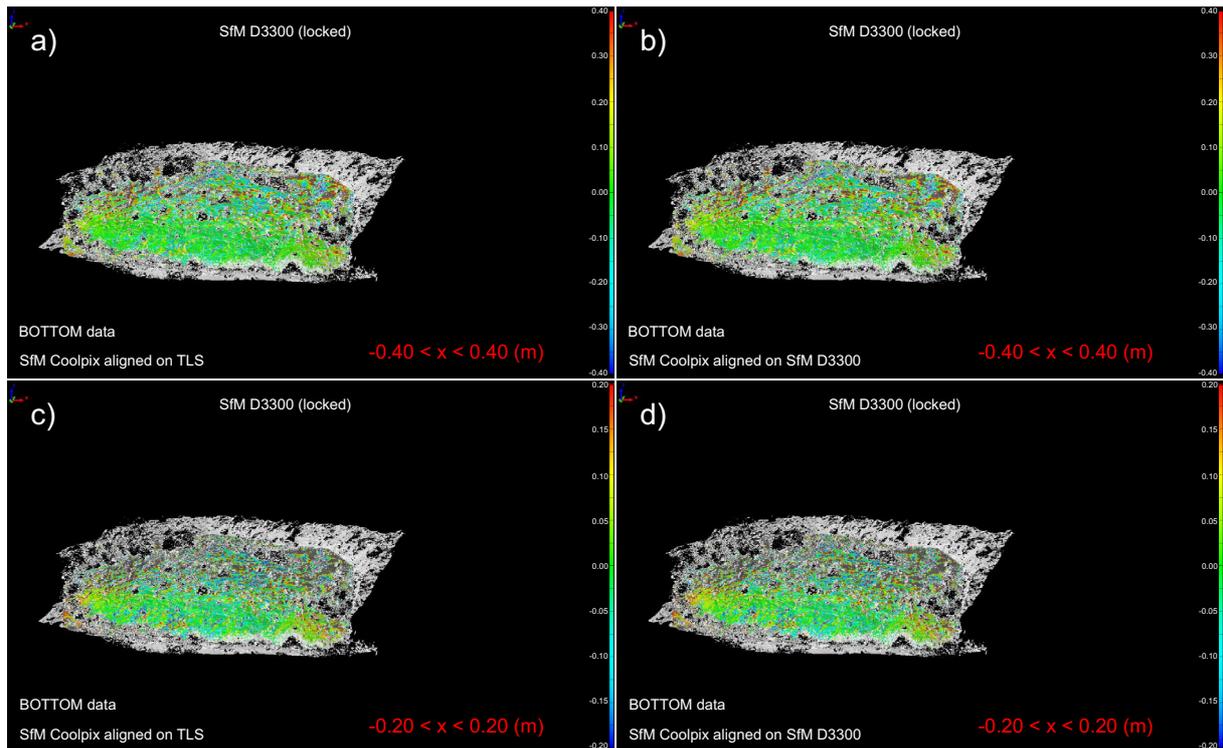
Come nella sottosezione precedente, anche in questo caso il confronto tra le due nuvole di punti SfM è stato attuato in due modi: lasciandole ancorate alla posizione allineata sul TLS o ri-allineandole tra loro. I risultati ottenuti sono del tutto simili e confrontabili, con valori (Figura 8) governati dalle precisioni del modello Coolpix P520, che si ribadisce essere il meno preciso.



**Figura 6.** Allineamento del modello SfM Nikon D3300 sul TLS utilizzando solo una parte dell'area, nello specifico, le zone (vedi figura 2) comprese tra le distanze planimetriche di 300-400 m dal centro strumentale dello scanner. a) Mappa delle differenze nell'intervallo  $[-0.2:0.2]$  m; b) mappa delle differenze nell'intervallo  $[-0.1:0.1]$  m.



**Figura 7.** Allineamento del modello SfM Coolpix P520 sul TLS utilizzando solo una parte dell'area, nello specifico, le zone (vedi figura 2) comprese tra le distanze planimetriche di 300-400 m dal centro strumentale dello scanner: a) mappa delle differenze nell'intervallo  $[-0.4:0.4]$  m; b) mappa delle differenze nell'intervallo  $[-0.2:0.2]$  m.

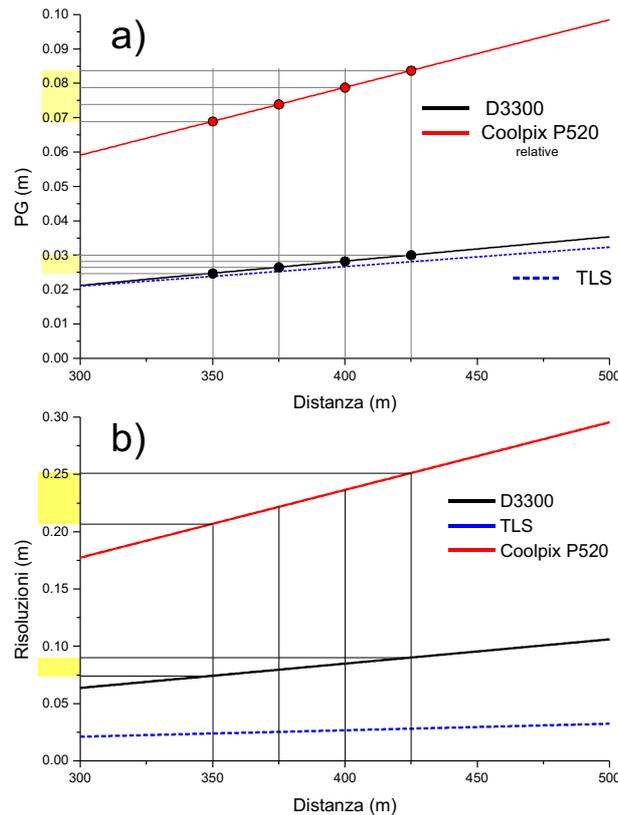


**Figura 8.** Come in figura 5, mappe delle differenze tra il modello Nikon D3300 (riferimento) e Coolpix P520, utilizzando solo una parte dell'area, nello specifico, le zone (vedi figura 2) comprese tra le distanze planimetriche di 300-400 m dal centro strumentale dello scanner: a,c) confronto diretto dei modelli già allineati sul TLS; b,d) differenze dal nuovo allineamento mantenendo bloccato nello spazio il modello D3300.

#### 4. Discussione

Una semplice formula mette in relazione alcune delle caratteristiche principali della camera utilizzata (vedi Tabella 1) e la dimensione del pixel a terra ad una certa distanza dal centro della camera. Questa relazione può così esprimersi:  $p_G = d \cdot ss / (f \cdot SP)$ , dove  $p_G$  è il lato del pixel a terra (m),  $d$  è la distanza (m),  $ss$  è la dimensione (larghezza o altezza) del sensore (m),  $f$  è la lunghezza focale (m) e  $SP$  è la corrispondente dimensione (larghezza o altezza) del sensore in numero di pixel. Questa formula teorica fornisce l'effettiva risoluzione spaziale della fotocamera per una data distanza  $d$  nel caso in cui sia utilizzata una fotocamera professionale, il cui CF è circa 1, ovvero le dimensioni del cui sensore sono paragonabili a quelle della pellicola fotografica standard da 35 mm. Sulla carta, inserendo banalmente i parametri delle camere nella formula parrebbe logico aspettarsi un risultato più accurato (precisione dei modelli SfM) per la camera Coolpix P520, essendo il corrispondente pixel a terra alla distanza di 300 m pari a 1.6 cm, mentre quello della D3300 è, alla stessa distanza, 2.1 cm. Tutte le mappe presentate nelle pagine precedenti smentiscono ciò, da cui si evince che il dato della P520 è senza dubbio inferiore a quello ottenibile con la D3300.

Per tale motivo, si è ritenuto utile intervenire sulla formula precedente tenendo conto dei parametri della D3300, cioè si è plottato il valore  $p_G$  della Coolpix P520 per il rapporto tra i CF, cioè 5.6/1.5. Nella figura 9 si mostrano i valori dei pixel a terra alle distanze comprese tra 300 m e 500 m (a) e le risoluzioni ottimali attese, in base alle considerazioni pubblicate recentemente in [Pesci et al., 2017]. Sintetizzando al massimo, è possibile affermare che il valore  $p_G$ , moltiplicato per un fattore 3, potrebbe essere rappresentativa della migliore e non superabile risoluzione ottenibile (intesa come capacità di osservare e misurare un particolare) ad una certa distanza di scatto. Nella stessa figura si mostra la risoluzione attesa del dato TLS, che si mantiene stabile, o meglio cresce in modo lineare e lento nel *range* di distanze considerate, molto lontano dalla distanza limite dello strumento.

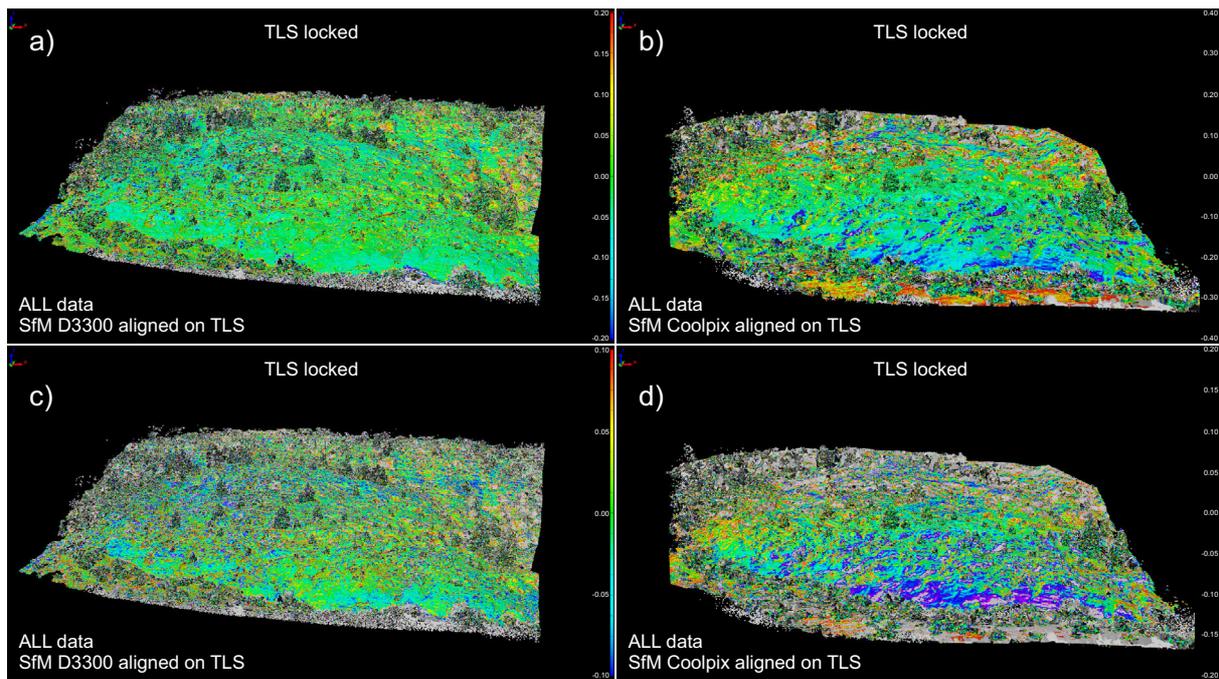


**Figura 9.** Considerazioni sulla dimensione del pixel della Nikon D3300 e Coolpix P520 in base alla distanza. Un fattore di peggioramento calcolato come rapporto dei CF delle due fotocamere è stato utilizzato per calcolare il valore presunto per la Coolpix P520. a) Dimensione dei pixel a terra in base alla distanza di presa; b) risoluzione (ottimistica) attesa per le due camere. La linea tratteggiata blu, presente in ogni figura, è la risoluzione TLS attesa in base alla distanza.

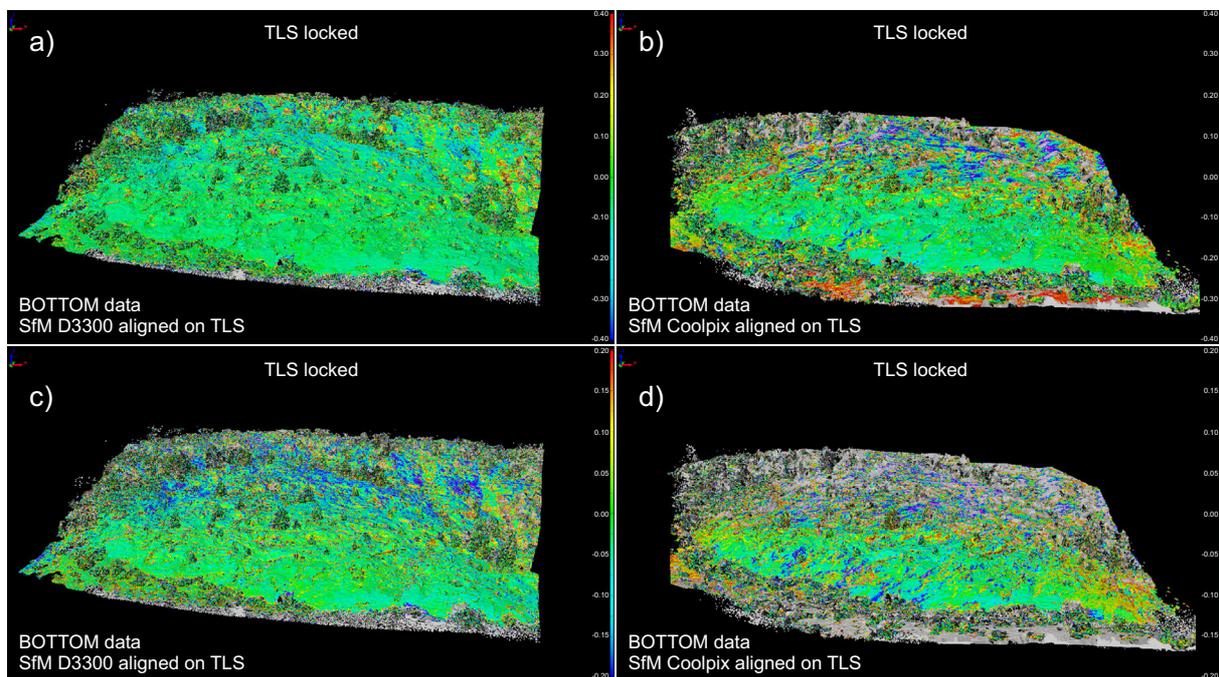
Alla luce dei valori mostrati in figura 9b si ripropongono nelle figure seguenti le mappe delle differenze, questa volta ottenute dal confronto tra nuvole di punti e non DTM. Questa scelta per osservare, seppure con più rumore, il set completo delle differenze in tutta l'area (modulo IMInspect di Poliworks). In figura 10 sono mostrate le differenze risultanti dall'allineamento tra i modelli SfM e quello TLS utilizzando tutte le aree in comune: la maggior parte dei residui è contenuta in un intervallo di  $\pm 10$  cm (e inferiore) per la D3300; il modello ottenuto con la Coolpix P520 mostra errori molto più grandi ed un effetto sistematico procedendo lungo la parete con valori anche superiori a 20 cm.

La differenza tra i modelli allineati utilizzando solo la parte più bassa della parete (Figura 11) mostra l'affacciarsi di un sistematismo che risulta abbastanza contenuto (inferiore a 10 cm) per la D3300 ma decisamente importante per la Coolpix P520 (superiore a 30 cm).

Una critica potrebbe essere fatta all'approccio utilizzato per via della scelta di rinunciare all'ottimizzazione dell'allineamento delle immagini per effetto dell'introduzione di GCPs nella fase di *bundle adjustment*. Anche se le coordinate dei GCPs non sono disponibili (cosa coerente col fatto che si considerano osservazioni eseguite in condizioni di emergenza), in PhotoScan sarebbe possibile introdurre dei marker rispetto ai quali ottimizzare l'allineamento delle immagini e la modellazione 3D in sede di *bundle adjustment*. Tuttavia, l'obiettivo del presente lavoro era ottenere risultati di significato generale riguardo alla fotogrammetria SfM e dei limiti insuperabili riguardo alla risoluzione ottenibile. Alcuni diffusi software SfM, infatti, non permettono di ottimizzare l'allineamento ma si limitano ad utilizzare eventuali coordinate dei GCPs per introdurre una trasformazione di similarità (rototraslazione e fattore di scala) alla nuvola di punti [Remondino et al., 2014]. L'introduzione di una trasformazione di similarità è, d'altra parte, l'obiettivo del metodo delle polilinee utilizzato in questo lavoro.



**Figura 10.** Confronto diretto tra nuvole di punti tramite il modulo IMInspect (Polyworks). In analogia col risultato mostrato in figura 4, una rappresentazione più dettagliata delle differenze tra le coordinate delle nuvole di punti SfM e quella TLS. a,c) mappa delle differenze tra Nikon D3300 e TLS; b,d) mappa delle differenze tra Nikon Coolpix P520 e TLS.



**Figura 11.** Confronto diretto tra nuvole di punti tramite il modulo IMInspect (Polyworks). In analogia col risultato mostrato in figura 4, una rappresentazione più dettagliata delle differenze tra le coordinate delle nuvole di punti SfM e quella TLS ottenute dagli allineamenti utilizzando solo la parte del prospetto che dista 300-400 m dallo scanner. a,c) mappa delle differenze tra Nikon D3300 e TLS; b,d) mappa delle differenze tra Nikon Coolpix P520 e TLS.

## Conclusioni

La possibilità di realizzare rilievi SfM *long range* da terra senza ausilio di piattaforme mobili (drone o imbarcazione) che permettano di avvicinarsi fino a poche decine di metri (senz'altro inferiori a 100 m) alla parete è possibile solo utilizzando camere digitali di alta fascia o professionali, preferibilmente dotate di un buon obiettivo zoom. Nel caso di utilizzo di camere compatte o caratterizzate da un sensore interno di piccole dimensioni è necessario ridurre al massimo la distanza di presa e valutare, mediante prove ripetute e avendo a disposizione un modello di riferimento, la presenza di sistematismi nel confronto tra le nuvole di punti.

Nel caso specifico, la fotocamera Nikon D3300 si è dimostrata abbastanza performante nonostante la distanza e la morfologia della parete che risulta particolarmente inclinata accentuando la differenza di dimensione del pixel a terra (oltre alla forma schiacciata) tra le varie zone dell'area acquisita. Il sistematismo, da associare a problemi della modellazione fotogrammetrica, si rileva nelle parti più lontane, mentre l'area che dista fino a circa 400 m risulta misurata in modo corretto, fornendo un dato ad una risoluzione accettabile ed in accordo con i valori attesi (Figura 9b).

La disponibilità di una fotocamera professionale o la dotazione di uno zoom ottico (di tipo 55-300 mm) potrebbe garantire interessanti miglioramenti in questo tipo di rilievo come una maggiore precisione e risoluzione dei modelli SfM raggiungendo, nel monitoraggio, prestazioni simili ad applicazioni TLS. È importante precisare che PhotoScan, come del resto qualunque software per la modellazione fotogrammetrica SfM, attua tale modellazione utilizzando i metadati (dati Exif, [CIPA, 2016]) memorizzati nell'immagine, in particolare distanza focale e caratteristiche della fotocamera e della specifica ottica utilizzata. In tal modo, ad esempio, eventuali azioni sullo zoom sono senz'altro adeguatamente prese in considerazione in modo del tutto automatico. L'allineamento delle immagini passa dunque attraverso il calcolo dei parametri di calibrazione intrinseci ed estrinseci della camera, inizializzato sulla base dei menzionati metadati. Nel caso in cui fossero utilizzate più fotocamere, PhotoScan provvede a riconoscerle e a trattarle separatamente in sede di calcolo dei parametri di calibrazione (in ogni caso, l'utente può agire manualmente per raggruppare in modo diverso le immagini). Nel caso in cui fossero utilizzate immagini prive di metadati (ad esempio, immagini digitali ottenute mediante scansione di immagini analogiche o immagini ottenute da dipinti), i dati necessari devono essere inseriti manualmente e, se ottenuti con apparecchi diversi, devono essere raggruppati manualmente prima del processo di calibrazione. In ogni caso, la calibrazione è parte integrante del processo di modellazione SfM. In particolare, non è richiesto l'uso di fotocamere precedentemente calibrate.

Per concludere si sottolinea che il tipo di approccio proposto e utilizzato non prevede l'uso di bersagli installati nelle aree da rilevare e neppure misure specifiche di punti naturali mediante misure GPS poiché l'intera procedura, mirata all'ottimizzazione dei tempi e dei costi di lavoro, è anche concepita per fornire dati indipendenti in eventuali condizioni di emergenza [Pesci et al., 2016d].

## Ringraziamenti

Questo lavoro è stato finanziato da Progetto MIUR-FIRB "Abruzzo", codice RBAP10ZC8K\_003".

## Bibliografia

- Agisoft (2017). *Descrizione del pacchetto software PhotoScan*. Disponibile online all'indirizzo: <http://www.agisoft.com/> (ultimo accesso: 11.10.2017).
- Benedetti L., I. Manighetti, Y. Gaudemer, R. Finkel, J. Malavieille, K. Pou, M. Arnold, G. Aumaître, D. Boulès, and K. Keddadouche (2013). *Earthquake synchrony and clustering on Fucino faults (Central Italy) as revealed from in situ<sup>36</sup>Cl exposure dating*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(9), 4948-4974, doi:10.1002/jgrb.50299.
- CIPA (2016). *Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif Version 2.31*. Disponibile online all'indirizzo: <http://www.cipa.jp/std/documents/e/DC-008-Translation-2016-E.pdf> (ultimo accesso: 01.03.2018).
- Bergevin R., M. Soucy, H. Gagnon, D. Laurendeau, (1996). *Towards a general multiview registration technique*. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18, 540-547.

- Cowie P.A. et al., (2017). *Orogen-scale uplift in the central Italian Apennines drives episodic behaviour of earthquake faults*. Sci. Rep.,7,44858, doi:10.1038/srep44858.
- Eltner A., A. Kaiser, C. Castillo, G. Rock, F. Neugirg, A. Abellán, (2016). *Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments*. Earth Surface Dynamics, 4, 359-389.
- Innovmetric (2017). *Descrizione del pacchetto software PolyWorks*. Disponibile online all'indirizzo: <http://www.innovmetric.com> (ultimo accesso: 11.10. 2017).
- Kastelic V., P. Burrato, M.M.C. Carafa, R. Basili, (2017). *Repeated surveys reveal non-tectonic exposure of supposedly active normal faults in the central Apennines, Italy*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 122, 114-129. doi: 10.1002/2016JF003953.
- Micheletti N., J.H. Chandler, S.N. Lane, (2015). *Structure from Motion (SfM) photogrammetry, Sec. 2.2*. In: Cook, S.J., Clarke, L.E., Nield, J.M. (Eds.), *Geomorphological Techniques*. British Society of Geomorphology, London. Disponibile online all'indirizzo: [http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom\\_tech\\_chapters/2.2.2\\_sfm.pdf](http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom_tech_chapters/2.2.2_sfm.pdf) (ultimo accesso: 11.10.2017).
- Optech (2017). *Descrizione dello strumento Optech-Teledyne ILRIS-3D*. Disponibile online all'indirizzo: <http://www.teledyneoptech.com/index.php/product/optech-ilris/> (ultimo accesso 12.10. 2017).
- Pesci A., G. Teza, M. Bacchetti, G. Piroddi, B. Rocchi, (2017). *Fase preliminare di un esperimento per valutare la risoluzione dei modelli SfM*. Rapporti Tecnici INGV, accettato.
- Pesci A., P. Stefanelli, M. Bisson, F. Muccini, C. Carmisciano, (2016a). *Integrazione di dati laser scanning e fotogrammetrici per il monitoraggio delle coste: i primi rilievi TLS terrestri per il progetto SCANCOAST*. Rapporti Tecnici INGV, 330.
- Pesci A., G. Teza, M. Bisson, F. Muccini, P. Stefanelli, M. Anzidei, R. Carluccio, I. Nicolosi, A. Galvani, V. Sepe, C. Carmisciano, (2016b). *A fast method for monitoring the coast through independent photogrammetric measurements: application and case study*. Journal of Geosciences and Geomatics, 4 (4), 73-81. DOI:10.12691/jgg-4-4-1.
- Pesci A., G. Teza, (2016c). *Precisione della nuvola di punti SfM: considerazioni e test*. Rapporti Tecnici INGV, 339.
- Pesci A., G. Teza, M. Anzidei, R. Vigna, C. Carmisciano, (2016d). *Monitoraggio speditivo delle coste rocciose da fotogrammetria SfM da imbarcazione: considerazioni sul metodo per misure indipendenti*. Rapporti Tecnici INGV, 342.
- Pesci A., G. Teza, A. Ninfo, C. Ferrulli, E. Bonali, (2015). *Telerilevamento speditivo mediante laser scanning e moderne tecniche di fotogrammetria digitale*. Rapporti Tecnici INGV, 319.
- Pesci A., G. Teza, G. Casula, F. Loddo, P. De Martino, M. Dolce, F. Obrizzo, F. Pingue, (2011). *Multitemporal laser scanner-based observation of the Mt. Vesuvius crater: characterization of overall geometry and recognition of landslide events*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(3), 327–336.
- Remondino F., M.G. Spera, E. Nocerino, F. Menna, F. Nex, (2014). *State of the art in high density image matching*. Photogrammetric Record, 29(146), 144–166.
- Teza G., A. Pesci, A. Ninfo, (2016). *Morphological analysis for architectural applications: comparison between laser scanning and Structure-from-Motion photogrammetry*. Journal of Survey Engineering, 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000172), 04016004.
- Westoby M.J., J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey, J.M. Reynolds, (2012). *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*. Geomorphology, 179, 300–314.



# Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc.

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2018 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**