

# QUADERNI di GEOFISICA

Studio di possibili effetti sistematici  
nelle nuvole di punti SfM da APR:  
confronti con TLS, distorsioni e  
metodi di mitigazione



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

177



### **Direttore Responsabile**

Valeria DE PAOLA

### **Editorial Board**

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)  
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)  
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)  
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)  
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)  
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)  
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)  
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)  
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)  
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)  
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)  
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)  
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)  
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

### **Segreteria di Redazione**

Francesca DI STEFANO - Coordinatore  
Rossella CELI  
Robert MIGLIAZZA  
Barbara ANGIONI  
Massimiliano CASCONI  
Patrizia PANTANI  
Tel. +39 06 51860068  
redazione@ingv.it

**REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO**

© 2014 INGV Istituto Nazionale  
di Geofisica e Vulcanologia  
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI  
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



**ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA**

# QUADERNI di GEOFISICA

Studio di possibili effetti sistematici nelle nuvole di punti SfM da APR: confronti con TLS, distorsioni e metodi di mitigazione

*Evaluation of possible systematic effects in SfM UAV based point clouds: TLS and surface variations for error mitigation methods*

Arianna Pesci<sup>1</sup>, Giordano Teza<sup>2</sup>, Fabiana Loddo<sup>1</sup>, Massimo Fabris<sup>3</sup>, Michele Monego<sup>3</sup>, Sara Amoroso<sup>4,5</sup>

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

<sup>2</sup> Università di Padova, Dipartimento di Geoscienze

<sup>3</sup> Università di Padova, Dipartimento ICEA

<sup>4</sup> Università di Chieti, Dipartimento di Ingegneria e Geologia

<sup>5</sup> INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Sismologia e Tettonofisica

Accettato 14 marzo 2021 | Accepted 14 March 2021

Come citare | How to cite Pesci A., Teza G., Loddo F., Fabris M., Monego M., Amoroso S., (2022). Studio di possibili effetti sistematici nelle nuvole di punti SfM da APR: confronti con TLS, distorsioni e metodi di mitigazione. Quad. Geofis., 177: 1-26, <https://doi.org/10.13127/qdg/177>

In copertina Schema del rilievo SfM e posizioni della fotocamera negli istanti di acquisizione delle immagini | Cover Scheme of SfM survey and camera position at the times of data acquisition



# INDICE

<b>Riassunto</b>	7
<i>Abstract</i>	7
<b>Introduzione</b>	8
<b>1. Cenni di fotogrammetria SfM</b>	9
<b>2. Esperimento e rilievi TLS e SfM</b>	10
<b>3. Risultati TLS di riferimento</b>	12
<b>4. Risultati SfM da Photoscan: distorsioni della nuvola di punti</b>	13
<b>5. Mitigazione delle distorsioni</b>	16
<b>6. Risultati con l'utilizzo del software Metashape</b>	19
<b>7. Discussione e conclusioni preliminari</b>	20
<b>Ringraziamenti</b>	21
<b>Bibliografia</b>	21



# Riassunto

La fotogrammetria *Structure-from-Motion* (SfM) si basa su algoritmi che permettono, in modo automatico e rapido, di individuare una quantità elevata di punti omologhi tra le immagini acquisite durante il rilievo. L'individuazione di tali punti consente di realizzare l'allineamento delle immagini e quindi la calibrazione esterna ed interna delle fotocamere. L'efficienza di tali algoritmi e la quantità, qualità e distribuzione spaziale dei punti omologhi sono il fulcro della procedura di restituzione fotogrammetrica. In alcuni casi, per una combinazione tra strategia di acquisizione, tipo di fotocamera e software utilizzato, potrebbero verificarsi delle anomalie che danno luogo a distorsioni delle nuvole di punti finali. Il lavoro presenta i rilievi SfM realizzati nell'ambito di un progetto per lo studio delle deformazioni dovute al fenomeno della liquefazione mediante il confronto di modelli multi-temporali; si tratta dell'unico caso da noi osservato in anni di esperienza di rilievo SfM in cui sono presenti effetti sistematici che hanno reso problematico l'uso diretto delle nuvole di punti ottenute utilizzando Photoscan. Si mostrano i tentativi per ridurre tali effetti sia mediante un sotto-campionamento delle immagini, al fine di equilibrare la distribuzione dei punti omologhi, sia inibendo l'aggiustamento dei parametri interni, fino ad ottenere risultati utilizzabili, seppur non completamente liberi da sistematismi. Nella valutazione dei problemi è stato utilizzato un rilievo di riferimento realizzato mediante *Terrestrial Laser Scanning* (TLS). Infine tutti i dati sono stati rielaborati con un software migliorato, Metashape, ottenendo risultati non affetti da sistematismi, il che indica che le procedure per l'individuazione dei punti omologhi sono state migliorate. Poiché Photoscan (nelle versioni ancora utilizzate dalla 1.2 alla 1.7) è un prodotto molto diffuso, si ritiene che questa esperienza possa essere utile a quanti sono coinvolti in attività di monitoraggio e studio delle deformazioni superficiali.

## Abstract

*Structure from Motion (SfM) photogrammetry is based on the use of algorithms allowing the automatic identification of a large amount of homologous points (or pixels) between images overlapping areas. The coordinates of the homologous points (provided in different reference systems for each acquisition), allow the images alignment meaning the internal and external camera calibration. The number and the distribution of homologous points drives the entire procedure of photogrammetric restitution. In some cases, due to a fatal combination of acquisition strategy, digital cameras and software, anomalies could occur causing systematic effects in the point clouds representing the observed surfaces. This paper shows the results obtained from SfM surveys carried out as part of a project for the study of deformations due to the phenomenon of liquefaction by comparing multi-temporal models. This is the only case we have observed in years of SfM survey experience in which there are systematic effects preventing the direct use of the point clouds obtained using Photoscan (versions 1.1.2 and 1.7.0). Some approaches aimed at mitigating the distortions by balancing the distribution of homologous points and inhibiting the adjustment of internal camera calibration are used to improve results. A reference Terrestrial Laser Scanning (TLS) survey allowed the evaluation unexpected problems. Finally, the images data set processed by means of Metashape (1.5.0), a new improved version of Photoscan, provide good results free from systematism proving the greater efficiency of new algorithms for homologous points selection optimization. Since Photoscan is a very widespread product and also used within the INGV, it is believed that this experience can be useful to many operators involved in monitoring and studying surface deformations.*

## Introduzione

La fotogrammetria digitale di tipo *Structure-from-Motion* (SfM) è oggi ampiamente utilizzata in vari ambiti di studio e lavoro grazie alla sua versatilità e semplicità di utilizzo, dal rilievo geologico terrestre [Pesci et al., 2020; Monego et al., 2020] o da piattaforma aerea [Brunier et al., 2016] o anche da imbarcazione [Pesci et al., 2015] a quello architettonico [Teza et al., 2016; Carraro et al., 2019] e per lo studio delle deformazioni del suolo e di edifici [Chen et al., 2021]. La problematica maggiore per le applicazioni di fotogrammetria tradizionale, infatti, era rappresentata dalla necessità di fornire le coordinate e l'orientamento delle fotocamere nello spazio al momento dell'acquisizione, ossia i dati di calibrazione esterna, che potevano anche essere determinati sulla base di un apposito rilievo topografico di alcuni punti d'appoggio. La calibrazione interna, anch'essa parte integrante e fondamentale per l'analisi dati, veniva realizzata in laboratorio oppure era fornita dalla casa costruttrice della specifica fotocamera utilizzata quale certificato di calibrazione. Gli algoritmi SfM permettono di calcolare i parametri esterni ed interni delle camere a partire da un insieme di punti comuni a più immagini che vengono riconosciuti in modo automatico permettendo così di effettuare rilievi in grande libertà di movimento e azione.

Tipicamente, a prescindere dal software utilizzato, il processo di analisi avviene in due stadi: allineamento delle camere nello spazio, e restituzione fotogrammetrica, che associa ad ogni pixel il corrispondente punto a terra passando, quindi, dallo spazio immagine bidimensionale a quello reale 3D. Il primo risultato di una analisi SfM è una nuvola di punti, cioè un insieme di coordinate (x,y,z) corredato dalla informazione di colore sui tre canali (RGB, cioè *Red*, *Green*, *Blue*). Per completare l'operazione e realizzare modelli realistici è altresì necessario fornire un fattore di scala. Questo può essere introdotto prima della generazione della nuvola di punti densa, utilizzando una rete di appoggio costituita da target di coordinate note visibili nelle immagini (punti di controllo a terra, *Ground Control Points*, GCP) [Brunier et al., 2016]), oppure, nel caso soprattutto di rilievi con drone dotato di ricevitore GNSS e piattaforma inerziale, operando la georeferenziazione diretta utilizzando le posizioni e gli assetti negli istanti di acquisizione [Turner et al., 2014].

Il fattore di scala, soprattutto nel caso dei pacchetti software più avanzati, può anche essere introdotto posteriormente alla generazione della nuvola di punti, oppure in post-processing utilizzando varie strategie come, ad esempio, il metodo delle polilinee [Pesci et al., 2016].

I rilievi eseguiti con drone leggero richiedono spesso l'analisi di immagini acquisite con camere digitali di dimensioni limitate e quindi dotate di sensori (CMOS o CCD) altrettanto piccoli e caratterizzati da bassa risoluzione se confrontati con le dimensioni delle camere professionali di alta qualità e alta risoluzione. Questo è vantaggioso per motivi logistici poiché gli Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR) leggeri sono di semplice utilizzo e alla portata anche di piloti poco esperti che saranno in grado di acquisire immagini e creare modelli fotogrammetrici in zone altrimenti difficilmente accessibili o in cui non è possibile eseguire rilievi da posizioni ottimali. Si pensi, per esempio, ad una piazza o ad un versante poco pendente che sarebbe arduo rilevare da piattaforme terrestri per via dell'angolo di incidenza mediamente eccessivamente elevato, con evidenti ripercussioni sulla qualità del contenuto informativo dei pixel.

Dal punto di vista operativo, una campagna di misura deve essere organizzata in modo tale da garantire una ottima copertura delle aree di interesse mediante una sequenza di acquisizioni

che producano immagini molto sovrapposte tra loro e distribuite omogeneamente per il rilievo di tutte le porzioni dell'oggetto. È molto importante, per evitare possibili effetti sistematici nel risultato finale, che le osservazioni avvengano su un ventaglio di viste che permettano di catturare gli oggetti da punti di osservazione ben distribuiti nello spazio. Tipicamente, un volo viene programmato con un percorso a serpentina che può essere schematizzato come un insieme di strisciate molto sovrapposte tra loro che si intersecano nelle due direzioni di movimento/volo su un piano ad una certa altezza dal terreno.

Nonostante le attenzioni e la cura nella programmazione e realizzazione del rilievo, talvolta emergono problematiche inaspettate che possono pregiudicare la creazione di modelli realistici delle superfici, alterate da distorsioni innaturali difficili da correggere e da prevedere. In questo lavoro è descritto un problema emerso durante l'analisi delle immagini acquisite nell'ambito dell'esperimento di *blasting* realizzato a Bondeno (FE) per studiare gli effetti del fenomeno della liquefazione artificialmente indotta [Amoroso et al., 2020]. Vengono mostrate, in particolare, le problematiche riscontrate e il loro impatto sulla interpretazione dei dati insieme ad alcune strategie finalizzate a mitigare le distorsioni presenti nelle nuvole di punti.

## 1. Cenni di fotogrammetria SfM

Structure-from-Motion (SfM) è una tecnica fotogrammetrica che utilizza una serie di immagini 2D, per ricostruire la struttura 3D di una scena o di un oggetto mediante un processo ad elevata automazione, fornendo nuvole di punti fotorealistiche. E' da notare che i dati di ingresso, cioè le immagini 2D, possono essere ottenute mediante fotocamere digitali di livello *consumer*. Ciò, al pari dell'elevata automazione del processo, è dovuto al fatto che la SfM è basata sull'integrazione tra gli sviluppi della fotogrammetria digitale *close range*, in particolare il *bundle adjustment* (BA), cioè l'affinamento contemporaneo delle coordinate 3D che descrivono la geometria della scena, quelli delle tecniche di visione artificiale e, infine, quelli inerenti alla potenza di calcolo delle workstation disponibili per l'elaborazione dei dati.

Nel caso specifico di Photoscan e del suo sviluppo recente in Metashape [Agisoft, 2021], la ricerca della corrispondenza tra le immagini è attuata riconoscendo i punti nelle immagini che appaiono essere stabili rispetto a variazioni del punto di vista e di illuminazione, e genera un descrittore per ogni punto così ottenuto in base al suo intorno. I descrittori degli intorni di tali punti sono quindi utilizzati per trovare corrispondenze tra immagini. Gli algoritmi di Photoscan/Metashape utilizzati per stabilire le corrispondenze sono specifici ma, come comunicato informalmente da Agisoft, sono simili all'approccio *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT), introdotto da Lowe [1999], rispetto al quale essi mostrano una qualità di allineamento leggermente superiore. Per la modellazione dei parametri di orientamento interni ed esterni della fotocamera, PhotoScan utilizza un proprio algoritmo per trovare le posizioni approssimative via via assunte dalla fotocamera durante il rilievo, e per poi affinarle mediante un processo di BA analogo a quello implementato in Bundler [Snavely et al., 2008], ma comunque caratterizzato da alcune specificità non note. Inoltre, è possibile far uso di vari modelli di fotocamera, da frame [Brown, 1971] a *fish-eye*, sferica e cilindrica, sulla base delle caratteristiche del sistema ottico utilizzato. A ciò segue la generazione della nuvola di punti densa ed, eventualmente, quella di un modello digitale testurizzato, utilizzando vari algoritmi di cui, in ogni caso, i codici sorgente non sono disponibili.

Come sopra accennato, la modellazione SfM non richiede fotocamere calibrate in fabbrica o in laboratorio ma è del tutto compatibile con qualunque tipo di fotocamera, anche di tipo *consumer*, purché utilizzata in modo appropriato, cioè garantendo la copertura della zona osservata con adeguata ridondanza, cioè elevata sovrapposizione delle immagini. Al fine di consentire la modellazione fotogrammetrica, ciascun punto deve essere acquisito in non meno di due

immagini. Ovviamente, i migliori risultati sono ottenuti nel caso delle fotocamere full frame, i cui sensori sono caratterizzati da grandi dimensioni e quindi, a parità di matrice, consentono di ridurre il rumore e migliorare la risoluzione spaziale ed il contenuto radiometrico. All'aumentare del *cropfactor* (CF), definito come  $CF = diag_{35}/diag_s$ , dove  $diag_{35}$  è la diagonale di una pellicola fotografica standard da 35 mm (ad esempio, è  $diag_{35} = 43.3$  mm per una pellicola 3:2, nel qual caso le dimensioni del sensore sono  $36 \times 24$  mm) e  $diag_s$  è la diagonale dello specifico sensore, la risoluzione peggiora come discusso, ad esempio, in Pesci et al. [2020]. Tale peggioramento non pone particolari problemi se è usata una fotocamera almeno di medio livello. In taluni casi, soprattutto per APR molto leggeri, è tuttavia necessario far uso di fotocamere integrate di qualità particolarmente bassa, fatto che potrebbe dar luogo a problemi di modellazione se la ridondanza del rilievo non è adeguata, come illustrato anche nel presente lavoro. In Figura 1 si mostra un esempio di alcune camere, dalle professionali alle compatte e mini (installate sui droni) mostrando in scala sia le dimensioni reali delle stesse che dei sensori interni.



**Figura 1** Figura in scala di camere e drone. Alcune Nikon full frame e di tipo commerciale. In giallo i sensori e le dimensioni negli esempi riportati. In questo caso la camera installata sul drone e la compatta hanno un sensore di 13.2 mm x 8.8 mm corrispondente ad un CF di 2.7.

**Figure 1** Scale figure of cameras and drone. A Nikon full frame and commercial cameras are shown. In yellow the internal sensors and their dimensions. Note that the camera installed on the drone and the compact one have a sensor of 13.2 mm x 8.8 mm corresponding to a CF of 2.7.

## 2. Esperimento e rilievi TLS e SfM

Nel giugno 2018 è stato realizzato, in località Bondeno (FE), un esperimento di *blast test*, basato sull'utilizzo di microcariche esplosive per indurre artificialmente il fenomeno della liquefazione esplosive dei terreni. Il progetto fa seguito agli studi sulla liquefazione avviati in Emilia-Romagna dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia già nel 2016 con un esperimento di *blast test* effettuato nei terreni limo-sabbiosi di Mirabello nel Comune di Terre del Reno (FE). Tale primo esperimento è descritto in Amoroso et al. [2017] e, focalizzando sugli aspetti del telerilevamento, in Pesci et al. [2018].

L'attività sperimentale realizzata più recentemente, nel 2018, nell'area di Bondeno (FE) è stata svolta in collaborazione con la Brigham Young University (Utah, USA), con le società Releo srl e Geopier Foundation Company (North Carolina, USA). L'attività di ricerca ha esaminato in modo approfondito il fenomeno della liquefazione in terreni naturali costituiti da sabbie limose e in terreni trattati per verificarne l'efficacia al fine di mitigare il rischio di liquefazione, di fondamentale importanza ai fini ingegneristici per la progettazione di nuovi edifici e/o per l'adeguamento delle opere esistenti. Si tratta di uno studio ad ampio raggio che ha visto coinvolti anche il Politecnico di Torino e le Università degli Studi di Bologna, Torino, L'Aquila, Modena e

Reggio Emilia, Ferrara e società quali Geoterma srl, Sara Electronic Instruments srl, Studio Prof. Marchetti, Scan&GOsrl, Images srl, il Comune di Bondeno e la Regione Emilia-Romagna. L'area di studio (Figura 2) è di forma rettangolare con lati di 80 m e 40 m, rispettivamente, e individua due zone: l'area *Natural Panel* (NP) su cui non sono stati effettuati interventi rilevanti, se non i fori per l'inserimento delle cariche esplosive, e l'area *Improved Panel* (IP) che è stata "trattata" con l'installazione di colonne di aggregati di ghiaie denominate *Rammed Aggregate Piers* (RAP), concepite per la mitigazione di eventuali effetti di liquefazione [Saftner et al., 2018]. Le due aree, IP e NP, sono poste ad una distanza di circa 20 m (con riferimento ai centri delle due aree), sufficientemente vicine per lavorare nell'ipotesi di caratteristiche geotecniche del sottosuolo simili, sufficientemente lontane per escludere o limitare possibili interazioni dovute alle esplosioni in ciascuna di esse.



**Figura 2** Area dell'esperimento. Le zone NP e IP, in cui sono state predisposte le cariche esplosive ed il contorno dell'area di interesse per il rilievo, sono evidenziate. A destra un veicolo sui cui è installata la strumentazione per le scansioni laser.

*Figure 2* Experiment area, whose boundary is highlighted (red line). The highlighted areas NP and IP are the blast areas, where explosive charges were placed. On the right, the TLS instrument mounted on a vehicle is shown.

Le fasi dell'esperimento sono tre: B0, B1 e B2: B0, abbreviazione di Blast0, è la condizione dell'area prima delle esplosioni, cioè lo stato iniziale; B1, o Blast1, è la condizione dopo la prima esplosione, localizzata in area NP; B2, o Blast2, la condizione dopo la seconda esplosione localizzata invece nell'area IP.

Le tecnologie utilizzate per i rilievi 3D sono due: laser scanning terrestre (TLS), il cui strumento è mostrato in Figura 2, e SfM. Le misure TLS si possono considerare dirette, dato che le coordinate dei punti rilevati sono direttamente fornite dallo strumento. I dati sono precisi con un errore nell'ordine di qualche millimetro per le distanze qui considerate (sempre inferiori a 100 m), e sufficientemente numerosi e densi per estrarre un modello di riferimento ad alta risoluzione. Il pacchetto software utilizzato è PolyWorks [Innovmetric, 2021], che offre la possibilità di ottimizzare gli allineamenti con una precisione che supera l'errore di misura. Lo schema di rilievo è mostrato nella Figura 3. Una volta ottenuti i campi di spostamento (variazioni superficiali), questi saranno utilizzati come risultati di riferimento al fine di verificare la bontà delle misure SfM o per riscontrarne le anomalie, nel tentativo di comprenderne le cause e di mitigarne gli effetti.

Il contributo di TLS e SfM è dunque servito per ottenere le mappe di variazione superficiale. Per entrambe le tecniche, l'approccio è basato sulla creazione di nuvole di punti multi-temporali e sul loro confronto dopo specifiche procedure di allineamento per inserirle nello stesso sistema di riferimento con rototraslazione e minimizzazione delle differenze (allineamento ai minimi quadrati) nelle zone comuni e non interessate dalle deformazioni.



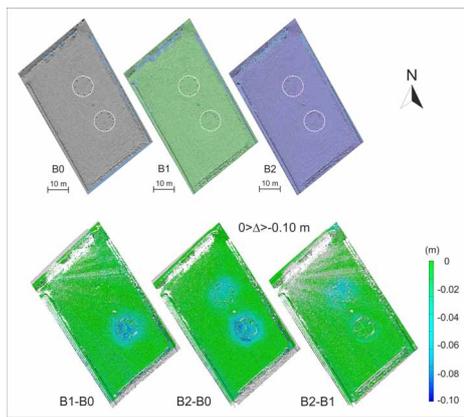
**Figura 3** La nuvola di punti TLS sovrapposta all'immagine satellitare (Google Maps). I punti di stazione TLS, le aree del Blast (NP e IP), il contorno dell'area di interesse e la localizzazione geografica sono indicati secondo legenda.

*Figure 3* TLS point cloud overlaid on the map of the area (Google Maps). Red squares are the acquisition points. NP and IP blast areas are indicated.

### 3. Risultati TLS di riferimento

I rilievi TLS sono stati progettati per misurare la superficie dell'area di studio nelle tre fasi dell'esperimento: B0, B1 e B2. Per ogni rilievo TLS sono state effettuate tre scansioni da tre punti sul percorso adiacente al lato più corto del campo. Lo strumento, un Optech/TeledynePolaris [Teledine, 2021], è stato installato su un palo (Figura 2), a sua volta ancorato ad una vettura (Sistema Scan&Go) su uno sterrato sopraelevato di circa 1.5 m rispetto al livello dell'area di studio, per una altezza totale di circa 6 m. Per ogni fase dell'esperimento le tre scansioni (statiche) sono state poi co-registrate utilizzando l'algoritmo *surface-to-surface* ICP implementato in PolyWorks, con errori di qualche millimetro, per ottenere la nuvola di punti definitiva. Tutto questo al fine di avere una copertura ottimale del campo di interesse ed eliminare il più possibile i data gap dovuti alla presenza di oggetti (pali, strumenti, sacchi di sabbia, ecc.) che generavano zone d'ombra in quanto elementi frapposti tra il fascio laser e le porzioni di superficie da misurare.

Le tre nuvole di punti B0, B1 e B2 sono state allineate e confrontate utilizzando PolyWorks, ottenendo le mappe di variazione superficiale B1-B0; B2-B1; B2-B0. Le prime due mappe mettono in evidenza gli effetti superficiali dovuti alle singole esplosioni nelle zone NP e IP, mentre la terza rappresenta l'effetto cumulativo. I dettagli e le interpretazioni dei risultati sono presentati in Amoroso et al. [2020] e possono essere brevemente riassunti in: 1) la zona NP si deforma secondo un pattern quasi radiale con cedimenti fino ad 8 cm nel centro dell'area ed una distribuzione di abbassamento estremamente regolare che diminuisce fino a scomparire alla distanza di circa 10 m dal centro di NP. Simili risultati erano stati ottenuti nel sito test di Mirabello [Pesci et al. 2018]; 2) la zona IP mostra valori molto più piccoli dell'ordine di pochi cm, con una concentrazione di abbassamento fino a 6 cm localizzata nella parte alta dell'area e con una distribuzione non perfettamente radiale ma allungata verso i valori più elevati di subsidenza. I cedimenti più elevati, come dettagliato nel lavoro di Amoroso et al. [2020], sono confinati specificatamente in un'area a causa di una comprovata minore efficacia del trattamento RAP; 3) il cumulativo delle differenze dei cedimenti dopo le esplosioni mette in evidenza come l'effetto sia molto più limitato nella zona IP, dove erano stati installati elementi RAP per la mitigazione del fenomeno della liquefazione. Le mappe delle differenze mostrate in Figura 4 sono quindi il risultato di riferimento che mostra gli effetti di fenomeni liquefazione indotta, qui misurati, attesi nel prosieguo.



**Figura 4** Nuvole di punti TLS e mappe delle variazioni superficiali.

*Figure 4* TLS point clouds and differences maps for surface variations.

## 4. Risultati SfM da Photoscan: distorsioni della nuvola di punti

I rilievi SfM sono stati realizzati con l’ausilio di un drone Phantom su cui è installata la camera DJI FC6330. Le caratteristiche della camera sono riportate in Tabella 1. I voli sono stati organizzati secondo uno schema (Figura 5) a “serpentina” e la superficie è stata rilevata con circa 70 immagini sovrapposte tra loro durante il percorso di volo. La descrizione accurata di volo e sovrapposizione immagini è fornita in dettaglio nel paragrafo 5 evidenziando una disomogeneità di informazione nelle direzioni longitudinali e trasversali di copertura.

Parametro	Unità di misura	DJI FC6310
Lunghezza focale	mm	8.8
Apertura (f-stop)	-	f/5.6
Lunghezza focale equivalente 35 mm	mm	24
Crop factor	-	2.7
Dimensioni del sensore in pixel	-	5472 x 3648
Dimensioni del sensore	mm x mm	13.2 x 8.8
Lato del pixelo	mm	0.00241
Tempo esposizione	s	1/400
GSD (a 20 m)	mm	5.5

**Tabella 1** Caratteristiche principali della camere DJI FC6310.

*Table 1* Main DJI FC6310 technical data.



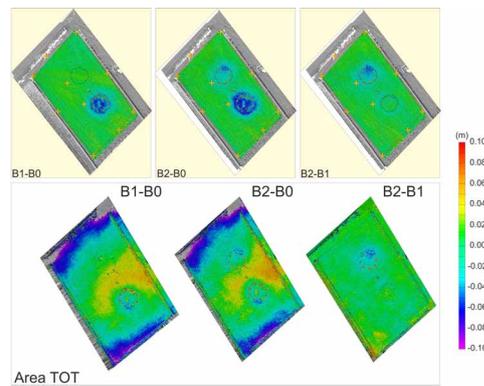
**Figura 5** Schema del rilievo SfM, ossia traiettoria del volo dell’APR Phantom DJI FC3610 e posizioni della fotocamera negli istanti di acquisizione delle immagini.

*Figure 5* Scheme of SfM survey, i.e. flight trajectory of Phantom DJI FC6310 APR and camera position at the times of data acquisition.

Le analisi sono state realizzate mediante il software Photoscan (versione 1.1.2 e 1.7.0) secondo le procedure standard, già descritte nel paragrafo precedente, senza inserire punti di controllo o vincoli a terra. Questo metodo è già stato utilizzato con successo sia in applicazioni terrestri

che APR senza avere mai riscontrato problematiche che potessero pregiudicarne il risultato [Pesci et al., 2016; 2018; 2020].

Le tre nuvole di punti estratte con la procedura di elaborazione SfM e relative alle fasi B0, B1 e B2, sono rappresentate in Figura 6. Nei pannelli superiori si mostrano i risultati attesi, cioè quelli forniti dalle analisi dati TLS. Sono anche rappresentati i target installati per correggere possibili errori di scala e confrontare elementi che avessero esattamente le stesse caratteristiche metriche. Si tratta di target a forma di croce con lato di 40 cm, fissati sul terreno e le cui posizioni sono state ottenute mediante misure GNSS differenziali rapide-statiche. Successivamente, da ogni nuvola di punti SfM, è stato seguito un approccio basato sulla creazione di polilinee i cui nodi corrispondono ai centri dei target. Il rapporto tra le lunghezze delle polilinee estratte dai modelli e la lunghezza della polilinea ottenuta con le misure GNSS indipendenti è il fattore di scala necessario per una trasformazione nello stesso spazio ortogonale [Pesci et al., 2016]. Dopo questa fase, seguendo lo stesso approccio utilizzato per le analisi TLS, le nuvole di punti fotogrammetriche sono state allineate e confrontate, fornendo risultati inattesi e decisamente alterati. La Figura 6 (pannelli inferiori) mostra chiare anomalie: le mappe ottenute evidenziano pattern deformativi attribuibili ad evidenti distorsioni e non collegabili a fenomeni fisici.

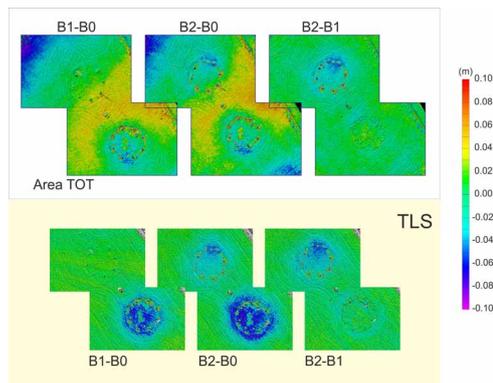


**Figura 6** Differenze tra nuvole di punti. In alto, i risultati di riferimento ottenuti da dati TLS. In basso, i risultati ottenuti con SfM, caratterizzati da evidenti anomalie. AREA TOT indica le nuvole di punti complete sono state utilizzate nel calcolo dei parametri per l'allineamento, cioè la co-registrazione.

*Figure 6 Point clouds differences. Top: reference results provided by TLS data acquisition. Bottom: SfM results, characterized by clear distortions. AREA TOT indicates that alignments, i.e. co-registrations, are carried out using the whole point clouds.*

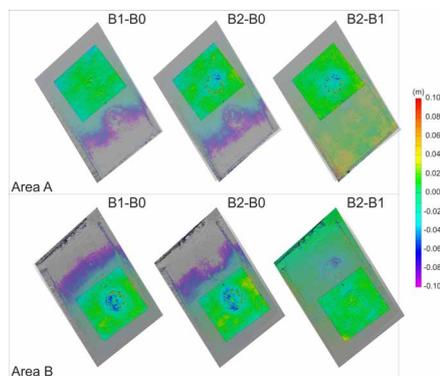
Tali risultati sono perciò non utilizzabili e di certo non consentono di ottenere informazioni sul fenomeno di liquefazione oggetto dell'esperimento. In Figura 7 viene evidenziato il risultato ingrandendo le aree di interesse. In figura, la dicitura AREA TOT esprime il fatto che il confronto è stato eseguito utilizzando l'intera area per l'allineamento, cioè la co-registrazione, delle nuvole di punti. Tutti i confronti, al pari degli allineamenti, sono stati eseguiti con PolyWorks.

Inizialmente è stata valutata la possibilità che la distorsione potesse essere dovuta ad effetti di deriva e/o distribuiti secondo un pattern "gestibile" che, in linea teorica, dovrebbero ridursi se in fase di allineamento venisse rimpicciolito il set di punti utilizzati, limitando l'analisi ad un intorno più o meno esteso rispetto alle aree di interesse. In questo senso, sono state considerate le due sotto-aree Area A ed Area B, rispettivamente contenenti le zone IP e NP, scartando ogni altro punto esterno per l'allineamento. Nella Figura 8 sono mostrati i risultati di questi allineamenti con utilizzo parziale delle nuvole di punti (area A e B) che, effettivamente, lascia intravedere le zone in subsidenza come nelle mappe TLS. Tuttavia, ingrandendo le porzioni delle aree A e B, è piuttosto evidente che i risultati sono differenti da quelli attesi e di certo non sufficientemente buoni per essere utilizzati nell'ambito di studi geofisici (Figura 9).



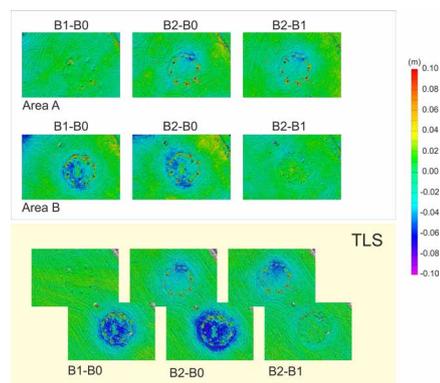
**Figura 7** Ingrandimento delle due aree di interesse in NP e IP per una lettura più accurata della Figura 5. I risultati di riferimento, ottenuti mediante TLS, sono in basso, mentre quelli da SfM sono in alto. AREA TOT indica che il calcolo dei parametri per l’allineamento è stato eseguito utilizzando le nuvole di punti complete.

*Figure 7 NP and IP zones enlarged for better observation of details with respect to figure 5. Bottom: reference TLS variation maps; top: SfM variation maps. AREA TOT indicates that alignments are performed using all the complete point clouds.*



**Figura 8** Differenze tra nuvole di punti SfM mediante allineamenti parziali con l’uso dei soli punti contenuti in Area A e Area B.

*Figure 8 SfM point clouds differences as in figure 5, but based on the points in area A and area B for point cloud alignments.*

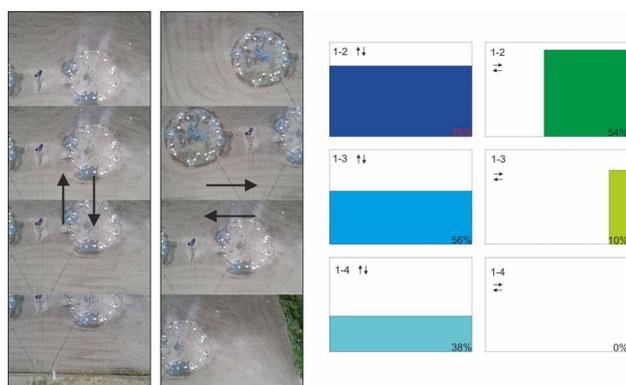


**Figura 9** Visualizzazione delle deformazioni basata sull’uso di porzioni limitate delle nuvole di punti per l’allineamento. I risultati lasciano intravedere la deformazione dovuta al *blasting*, ma le distorsioni presenti generano un risultato diverso da quello atteso, visualizzato nella porzione di figura sottostante. Area A ed Area B indicano le zone utilizzate per i confronti ed il calcolo delle differenze.

*Figure 9 Visualization of deformations based on the use of limited portions of point clouds for alignment. The results show the deformation due to blasting but the distortions present generate a different result from the expected one, displayed in the portion of the figure below. Area A and Area B indicate the areas used for comparisons and the calculation of differences.*

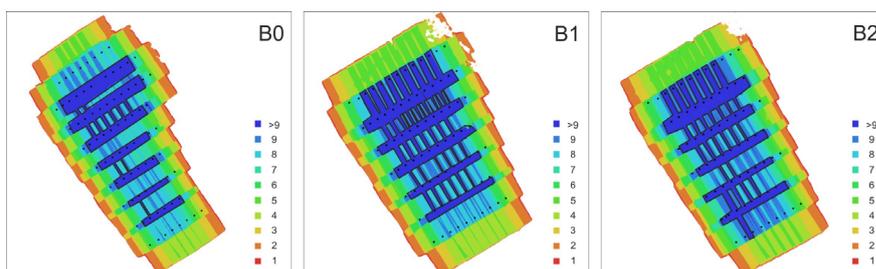
## 5. Mitigazione delle distorsioni

Una delle prime evidenze che, sfortunatamente, non erano state valutate in fase di acquisizione, è la distribuzione regolare ma non omogenea delle immagini lungo le due direzioni principali di volo. In sostanza, come si osserva nella Figura 5, il set di immagini digitali è un insieme di strisciate molto sovrapposte longitudinalmente e molto meno in direzione trasversale. Nella Figura 10 si mostrano le differenze e le percentuali di sovrapposizione considerando 4 immagini campionate nelle due direzioni. Lungo la longitudinale si passa dal 75%, tra due immagini adiacenti, al 38% da frame separati da due acquisizioni; lungo la trasversale si passa da un più che accettabile 54% al 10% per poi non avere più sovrapposizione. In Figura 11 è presentata la mappa contenente la copertura di immagini sulla superficie totale, così come fornita dal report generato automaticamente dal software Photoscan.



**Figura 10** Valutazione delle strisciate e del contenuto delle immagini. Le percentuali di sovrapposizione sono molto più elevate nella direzione longitudinale rispetto a quella trasversale. In particolare, la sovrapposizione tra primo e quarto frame in direzione longitudinale risulta mancante, come riportato nel quadro a destra.

**Figure 10** Evaluation of images strips and content. Overlap percentages in the longitudinal direction are significantly higher than the ones in transversal direction. In particular, the overlap between first and fourth frame in transversal direction is lacking (right).

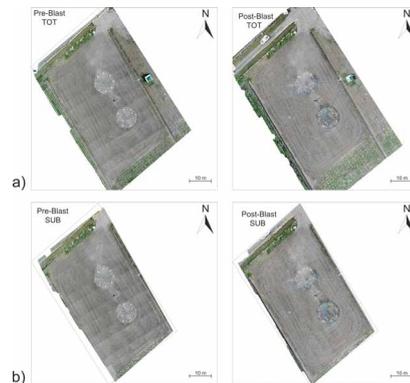


**Figura 11** Mappe di sovrapposizione immagini, dove sono indicati i numeri di immagini per ciascuna zona dell'area studiata, desunte dai report Photoscan.

**Figure 11** Maps of camera locations and images overlap provided by Photoscan general reports, where the amount of overlapped images are shown.

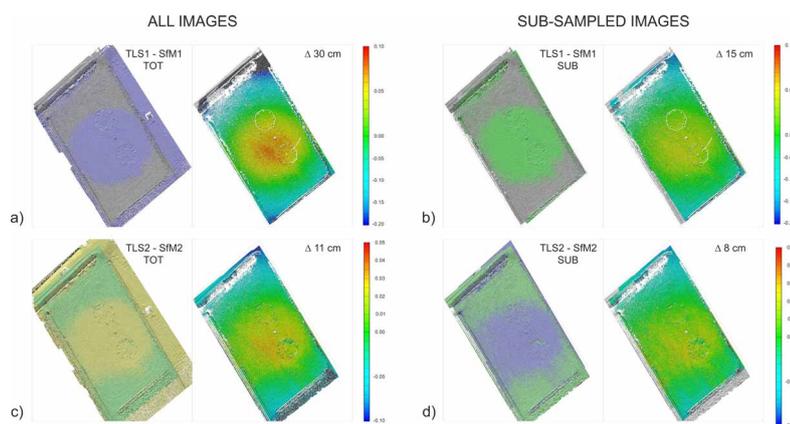
La mancanza di un equilibrio del dato nelle due direzioni si potrebbe tradurre, nella fase di calibrazione interna ed esterna (allineamento delle camere), in un utilizzo di punti omologhi distribuiti in maniera sbilanciata, con possibili condizionamenti dell'intero processo di calcolo dei parametri interni ed esterni delle fotocamere, cioè, rispettivamente, della posizione/orientamento delle fotocamere nello spazio e delle correzioni alle distorsioni delle immagini in base alle ottiche

utilizzate. Un test in questo senso è stato fatto per riequilibrare il sistema, sftolendo le immagini delle strisce longitudinali. I risultati sono stati ottenuti per due voli e mostrati nelle figure 12 e 13.



**Figura 12** Nuvole di punti SfM utilizzando tutte le immagini o il set sotto-campionato. Nella figura sono rappresentate le nuvole di punti B0 e B2 a titolo esemplificativo.

**Figure 12** SfM point clouds from the processing of both the all images data set and a sub-sampled one. Models concerns with B0 and B2 for the sake of brevity.



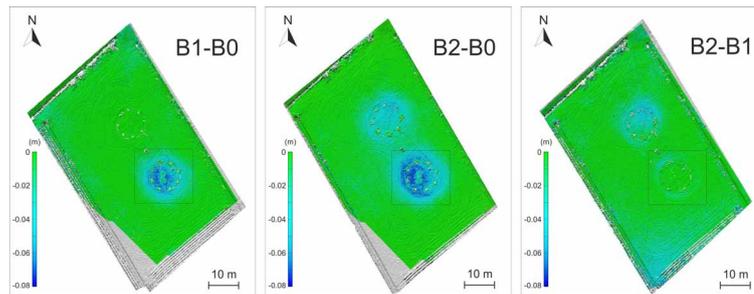
**Figura 13** Confronti tra le nuvole di punti SfM e TLS, dove si conviene che TLS1-SfM1 indichi la differenza tra le nuvole di punti TLS e SfM dopo il primo *blast* (a: totale; b: sottocampionato), TLS2-SfM2 si riferisca invece alla differenza tra le nuvole di punti TLS e SfM dopo il secondo *blast* (c: totale; d: insieme di immagini sottocampionato) e  $\Delta$  sono gli estremi degli intervalli delle differenze considerati, vale a dire 30 cm in a), 15 cm in b), 30 cm in c) e 11 cm in d) rispettivamente.

**Figure 13** SfM and TLS point clouds comparisons, where TLS1-SfM1 means the differences after blast 1 and TLS2-SfM2 indicates the differences after blast 2. The results a) and c) are obtained using all the images, whereas the results b) and d) come from subsampled sets of images. The considered extreme values of differences ( $\Delta$ ) are 30 cm in a), 15 cm in b), 30 cm in c) e 11 cm in d) respectively.

La morfologia delle distorsioni individuate e misurate mostra un pattern di forma convessa. Questo ha indotto a considerare che un rilievo con le problematiche di sovrapposizione e disomogeneità strutturali non eliminabili viene alterato, nella restituzione dei punti, perché gli algoritmi di aggiustamento dei parametri sono influenzati da un contenuto informativo sbilanciato in una direzione. La forma tipica di una distorsione centrale convessa ha anche suggerito che forse il problema riguardasse principalmente le operazioni sui parametri interni

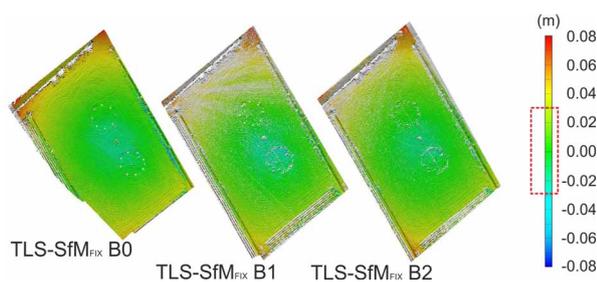
della camera, già caratterizzata da scarsa precisione per la accoppiata ottica-sensore non particolarmente adatta ad applicazioni di fotogrammetria di precisione. Si è quindi tentato di inibire l'aggiustamento dei parametri interni, fissando i valori sulle informazioni e certificazioni nominali fornite dai produttori. La corrispondente condizione in cui è usata la sola calibrazione interna è qui indicata con FIX.

I risultati sono mostrati nella Figura 14. In questo caso le mappe delle differenze sono molto ben confrontabili con quelle ottenute da TLS, sia in merito alla distribuzione delle variazioni sia in termini quantitativi. Anche se l'effetto distorsivo non è completamente eliminato, gli effetti minori di bordo visibili riguardano aree prive di interesse.



**Figura 14** Risultati SfM con calibrazione interna FIX, cioè basata sui valori nominali.  
*Figure 14* SfM results obtained by fixing internal calibration parameters on nominal values.

Anche in questo caso sono state calcolate le differenze tra le nuvole di punti SfM-FIX e TLS, mostrate nella Figura 15. Va sottolineato che, in effetti, sebbene i dati SfM siano utilizzabili per misure geofisiche, resta qualche sistematismo che poi scompare nel calcolo delle differenze, salvo che nei bordi che, comunque, non sono interessanti ai fini di questo test. Va notata anche la grande somiglianza della distribuzione della distorsione in tutte e tre le mappe (motivo per il quale le differenze ne sembrano prive).

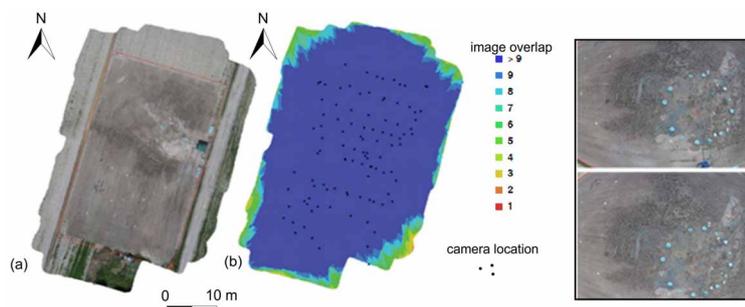


**Figura 15** Differenze tra le nuvole di punti SfM (FIX) e TLS.  
*Figure 15* Differences between SfM (FIX) and TLS point clouds.

Alla luce dei risultati esposti, si possono fare considerazioni di pratiche e qualitative sulle cause del problema. La copertura delle immagini, che porta ad una distribuzione dei punti omologhi sbilanciata nelle due direzioni di volo, incide sensibilmente sull'allineamento delle immagini, ed in particolare sul calcolo per la compensazione dei parametri interni. Infatti, inibendo questa fase di calcolo, i risultati sono quasi accettabili, con anomalie di poca rilevanza (principalmente  $\pm 2$  cm) e con effetti di bordo limitati alle zone laterali all'area di osservazione fino a valori di 4-6 cm. Va però notato che queste distorsioni sono piuttosto simili e ridotte nelle tre nuvole di

punti che, confrontate, portano alla mappa di variazione del tutto confrontabile con il risultato di riferimento ottenuto da TLS.

A supporto dell'ipotesi di cui sopra si fa riferimento ai risultati di una campagna SfM realizzata nel 2016, sempre in ambito *blasting* e nelle aree limitrofe a quelle dell'esperimento qui descritto: i dettagli sono pubblicati in Amoroso et al. [2017] e Pesci et al. [2018]. In quel caso, è stata utilizzata una camera di tipo "fisheye", cioè dotata di un obiettivo grandangolare estremo capace di acquisizioni ad alta copertura angolare (almeno 180°) e quindi, seguendo lo stesso schema di volo riportato in Figura 16, i punti omologhi comuni alle immagini erano distribuiti in modo molto più equilibrato nelle direzioni longitudinali e trasversali. In quel caso, infatti, non sono stati osservati sistematismi, a parte qualche effetto di bordo dovuto alle poche immagini disponibili in quelle porzioni.

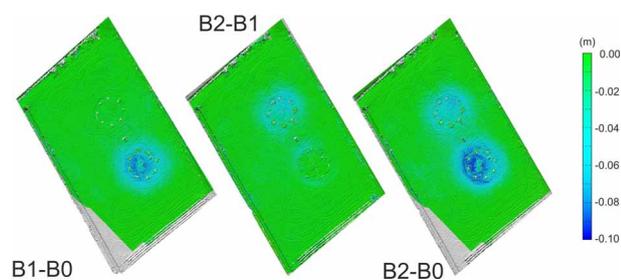


**Figura 16** Rilievo SfM a Mirabello (FE), eseguito nel 2016. Nuvola di punti SfM (a), posizioni della camera e copertura di immagini desunte dal report generato da Photoscan (b). Sono anche mostrati esempi di immagini fisheye (destra).

**Figure 16** SfM survey carried out in Mirabello (FE), carried out in 2016. SfM-based point cloud (a), camera locations and images overlap provided by Photoscan general report (b). Two fisheye images are also shown (right panels).

## 6. Risultati con l'utilizzo del software Metashape

Gli stessi set di immagini sono stati elaborati anche con il software Agisoft Metashape (1.5.0), utilizzando le stesse impostazioni: i risultati, rispetto ai precedenti, hanno permesso di ottenere un netto miglioramento del dato. La Figura 17 mostra, infatti, una serie di mappe di deformazione caratterizzate da un alto livello di compatibilità con il dato di riferimento TLS. Poiché Agisoft non fornisce dettagli precisi sugli algoritmi utilizzati, né, tantomeno, i codici sorgente, allo stato attuale non è possibile stabilire compiutamente il motivo di questo netto miglioramento. Dal report esportabile dopo l'elaborazione, che contiene i dati rilevanti sulla intera procedura di processing, si deduce che il numero di punti riconosciuti ai fini dell'allineamento nelle varie immagini è aumentato di quasi un ordine di grandezza; va però notato che il settaggio in Photoscan (1.1.2 e 1.7.0), che permette di incrementare il numero di *tiepoints*, o punti omologhi, non ha invece portato ad alcun risultato, il che significa che il problema risiede sia nel numero, sia nella distribuzione dei *tiepoints* e non dal solo numero di essi.



**Figura 17** Risultati ottenuti con il software Agisoft Metashape: confronto tra le nuvole di punti, in cui non appaiono evidenti effetti sistematici.

*Figure 17 Metashape-based SfM results. The comparison between the point clouds does not show systematic effects.*

## 7. Discussione e conclusioni preliminari

In questo lavoro si è evidenziato come, nelle analisi SfM, possano celarsi insidie e problematiche inaspettate o, comunque, difficilmente prevedibili. Le problematiche descritte in questo lavoro non sono state riscontrate in altre precedenti applicazioni realizzate e descritte dagli stessi autori, seppur con l'utilizzo dello stesso software (Photoscan 1.1.2 e 1.7.0), sia nei rilievi terrestri che da drone. Sia nella precedente esperienza blasting [Amoroso et al., 2017], che in una ampia gamma di applicazioni si è sempre operato ottenendo modelli di alta precisione e con ampia ripetibilità, dall'urbano/architettonico all'ambientale [Teza et al., 2016; Pesci et al., 2016; 2018; 2020]. Va anche precisato che, nelle applicazioni precedenti, non erano le distribuzioni delle immagini nelle due direzioni di volo erano equilibrate. In questo caso specifico sono emerse delle criticità che aprono uno scenario importante poiché indicano che le coppie ottica-sensore possono rendere difficile la calibrazione delle camere, introducendo problematiche nella gestione dell'allineamento, nonostante una elevata presenza di punti omologhi.

I risultati, anomali e corretti, qui presentati suggeriscono che le distorsioni delle nuvole di punti risentono di una errata combinazione tra la distribuzione dei punti omologhi, cioè dei punti automaticamente identificati e comuni ad una serie di immagini, e la coppia ottica-sensore della camera DJI utilizzata. Per mitigare gli effetti di questo fenomeno si può agire sia regolarizzando la distribuzione delle immagini, con una copertura idonea ad ottenere un insieme di punti omologhi più uniforme nelle due direzioni principali del volo, sia inibendo la possibilità di ricalcolare, compensandoli, i parametri di calibrazione interna.

Le analisi degli stessi data set di immagini, elaborate con il software Agisoft Metashape, non hanno evidenziato sistematismi in virtù dei miglioramenti delle procedure di allineamento che sono meno sensibili alla distribuzione dei punti omologhi poiché, evidentemente, ottimizzano la sequenza di ricerca di aree sovrapposte per la determinazione di set più completi di punti omologhi. Va tuttavia sottolineato che molti utenti del software Photoscan potrebbero non avere tale consapevolezza, per il che si raccomanda di effettuare un upgrade a Metashape, peraltro gratuito per i titolari di licenza.

Si sottolinea che le applicazioni studiate sono caratterizzate dall'assenza di punti di controllo, target o comunque elementi utili a vincolare le coordinate su valori ottenuti a priori. In questo senso è indispensabile che gli algoritmi per il calcolo dei parametri interni ed esterni delle camere siano molto efficienti al fine di ottenere modelli realistici e non affetti da sistematismi.

Vista la complessità del problema, verranno organizzati rilievi specifici per isolare tutte le possibili cause di distorsione e organizzare i voli con accorgimenti atti a preservare il risultato indipendentemente dal software utilizzato.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano Dario Conforti (Teledyne), Massimo Secchia (Scan&Go) e Donato Maccaferri (Images) per il supporto fornito durante il rilievo TLS.

Si ringraziano Geopier Foundation Company (Davidson NC, USA) per il determinante contributo economico a sostegno dell'esperimento e Releo srl per l'installazione delle colonne RAP (Rammed Aggregate Piers). Contributi economici per la realizzazione delle attività di ricerca sono inoltre stati forniti dal progetto INGV-FIRB Abruzzo ("Indagini ad alta risoluzione per la stima della pericolosità e del rischio sismico nelle aree colpite dal terremoto del 6 aprile 2009", <http://progettoabruzzo.rm.ingv.it/it>), dal progetto INGV-Regione Abruzzo ("Indagini di geologia, sismologia e geodesia per la mitigazione del rischio sismico", L.R. n. 37/2016) e dalla Brigham Young University (Utah, USA).

Gli autori inoltre ringraziano Michele Perboni, il proprietario del terreno, per l'ospitalità offerta per la realizzazione dell'esperimento, il Comune di Bondeno (Stefano Ansaloni, Olga Mantovani and Elena Bonora) e la Regione Emilia-Romagna (Luca Martelli), per il supporto logistico durante le fasi di organizzazione delle attività di ricerca.

Infine, un grazie speciale ai piloti dei droni per l'acquisizione delle immagini durante l'esperimento, Fawzi Doumaz (INGV), Andrea Carpena (Georeflex srl) e la Polizia Municipale dell'Alto Ferrarese, e ai revisori per le critiche costruttive che ci hanno permesso di migliorare il lavoro.

## Bibliografia

- Agisoft, (2021). Pagina web del pacchetto software Photoscan/Metashape. <https://www.agisoft.com/> (ultimo accesso: 25.02.2021).
- Amoroso S., Milana G., Rollins K.M., Comina C., Minarelli L., Manuel M.R., Monaco P., Franceschini M., Anzidei M., Lusvardi C., Cantore L., Carpena A., Casadei S., Cinti F.R., Civico R., Cox B.R., De Martini P.M., Di Giulio G., Di Naccio D., Di Stefano G., Facciorusso J., Famiani D., Fiorelli F., Fontana D., Foti S., Madiari C., Marangoni V., Marchetti D., Marchetti S.L., Martelli L., Mariotti M., Muscolino E., Pancaldi D., Pantosti D., Passer, F., Pesci A., Romeo G., Sapia V., Smedile A., Stefani M., Tarabusi G., Teza G., Vassallo M., Villani F., (2017). *The first Italian blast-induced liquefaction test (Mirabello, Emilia-Romagna, Italy): description of the experiment and preliminary results*. *Annals of Geophysics*, 60(5), S0556; <https://doi.org/10.4401/ag-7415>
- Amoroso S., Rollins K.M., Andersen P., Gottardi G., Tonni L., García Martínez M.F., Wissmann K., Minarelli L., Comina C., Fontana D., De Martini P.M., Monaco P., Pesci A., Sapia V., Vassallo M., Anzidei M., Carpena A., Cinti F., Civico R., Coco I., Conforti D., Doumaz F., Giannattasio F., Di Giulio G., Foti S., Loddo F., Lugli S., Manuel M.R., Marchetti D., Mariotti M., Materni V., Metcalfe B., Milana G., Pantosti D., Pesce A., Salocchi A.C., Smedile A., Stefani M., Tarabusi G., Teza G., (2020). *Blast-induced liquefaction in silty sands for full-scale testing of ground improvement methods: Insights from a multidisciplinary study*. *Engineering Geology*, 265, 105437, 1-17, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105437>
- Brown D.C., (1971). *Close-range camera calibration*. *Photogrammetric Engineering*, 37(8), 855-866.
- Lowe D.G., (1999). *Object recognition from local scale-invariant features*. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, vol. 2. pp. 1150-1157. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>
- Brunier G., Fleury J., Anthony J.E., Pothin V., Vell, C., Dussouillez P., Gardel A., Michaud E., (2016). *Structure-from-motion photogrammetry for high-resolution coastal and fluvial geomorphic surveys*. *Géomorphologie* 22 (2): 147-161. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11358>
- Innovmetric, (2021). Pagina web del pacchetto software PolyWorks. <https://www.innovmetric.com/> (ultimo accesso: 25.02.2021)

- Carraro F., Monego M., Callegaro C., Mazzariol A., Perticarini M., Menin A., Achilli V., Bonetto J., Giordano A., (2019). *The 3D survey of the roman bridge of San Lorenzo in Padova (Italy): a comparison between SfM and TLS methodologies applied to the arch structure*. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XLII-2/W15, 255–262. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-255-2019>
- Chen X., Achilli V., Fabris M., Menin A., Monego M., Tessari G., Floris M., (2021). *Combining Sentinel-1 Interferometry and Ground-Based Geomatics Techniques for Monitoring Buildings Affected by Mass Movements*. *Remote Sens.*, 13, 452. <https://doi.org/10.3390/rs13030452>
- Monego M., Achilli V., Fabris M., Menin A., (2020). *3-D Survey of Rocky Structures: The Dolomitic Spire of the Gusela del Vescovà*. *Communications in Computer and Information Science*, Volume 1246, Pages 211-228. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-62800-0\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-62800-0_17)
- Pesci A., Teza G., Kastelic V., Carafa M.M.C., (2020). *Resolution and precision of fast, long range terrestrial photogrammetric surveying aimed at detecting slope changes*. *Journal of Surveying Engineering*, 146(4), 04020017-1-13, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000328](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000328)
- Pesci A., Amoroso S., Teza G., Minarelli L., (2018). *Characterisation of soil deformation due to blast-induced liquefaction by UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning*. *International Journal of Remote Sensing*, 39(22), 8317-8336. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1484960>
- Pesci A., Teza G., Bisson M., Muccini F., Stefanelli P., Anzidei M., Carluccio R., Nicolosi I., Galvani A., Sepe V., Carmisciano C., (2016). *A fast method for monitoring the coast through independent photogrammetric measurements: application and case study*. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 4(4), 73-81. <https://doi.org/10.12691/jgg-4-4-1>
- Saftner D.A., Zheng J., Green R.A., Hryciw R., Wissmann K., (2018). *Rammed aggregate pier installation effect on soil properties*. *Institution of Civil Engineers-Ground Improvement* 171(2), 63-73.
- Snavely N., Seitz S.M., Szeliski R., (2008). *Modeling the World from Internet Photo Collections*. *International Journal of Computer Vision*, 80, 189–210. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>
- Teledyne, (2021). Pagina web dello strumento Optech/Teledyne Polaris. <https://www.teledyneoptech.com/en/products/static-3d-survey/polaris/> (ultimo accesso: 25.02.2020).
- Teza G., Pesci A., Ninfo A., (2016). *Morphological analysis for architectural applications: comparison between laser scanning and Structure-from-Motion photogrammetry*. *Journal of Surveying Engineering*, 142(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000172](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000172), 04016004, 1-10.
- Turner D., Lucieer A., Wallace L., (2014). *Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery*. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 52(5), 2738-2745. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2265295>



# QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

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

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

# RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

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

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

# MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

[http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html](http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html/)

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

**Coordinamento editoriale**

Francesca DI STEFANO  
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

**Progetto grafico**

Barbara ANGIONI  
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

**Impaginazione**

Barbara ANGIONI  
Patrizia PANTANI  
Massimiliano CASCONI  
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

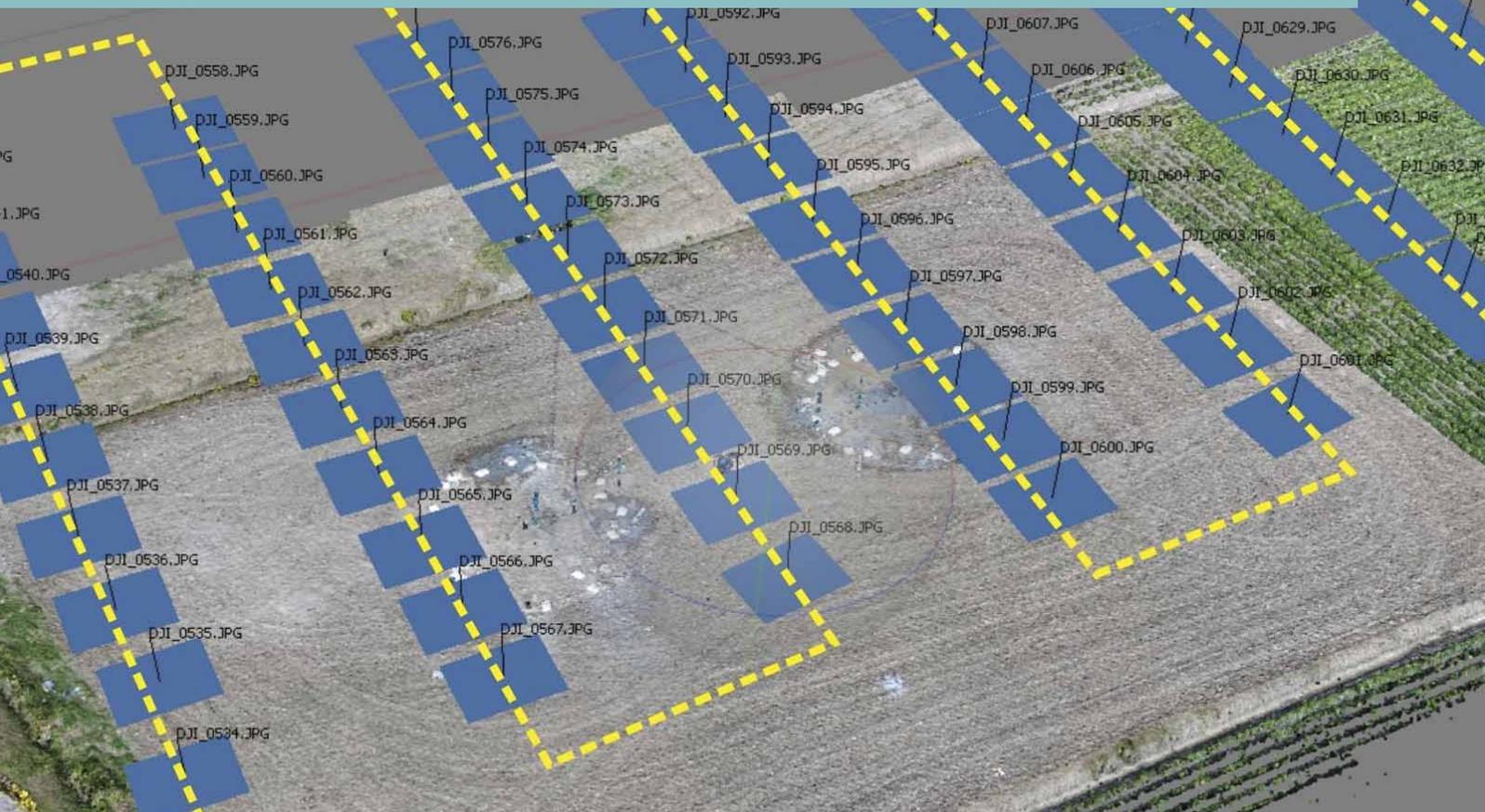
©2022

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia  
Via di Vigna Murata, 605  
00143 Roma  
tel. +39 06518601

[www.ingv.it](http://www.ingv.it)



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

