

DEFINIZIONE DEL VOLUME DEI BLOCCHI DA NUVOLE DI PUNTI 3D AD ALTA RISOLUZIONE PER UN'ANALISI AVANZATA DELLA PERICOLOSITÀ DA CROLLO

Giampiero Mineo (giampiero.mineo@unipa.it)

Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare (DiSTEM)

Chiara Cappadonia (chiara.cappadonia@unipa.it)

Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare (DiSTEM)

Marco Rosone (marco.rosone@unipa.it)

Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria (DI)

ABSTRACT

La stima del volume di roccia potenzialmente instabile all'interno di un ammasso roccioso rappresenta ancora oggi una sfida significativa nella fase di acquisizione dei dati per la sua caratterizzazione. I metodi tradizionali richiedono misurazioni dirette sul versante, che spesso comportano un'esposizione degli operatori al rischio associato al fenomeno. Questo studio propone un approccio indiretto, basato sull'analisi di nuvole di punti 3D acquisite tramite scansioni laser da terra (TLS) e analizzate con software open source dedicati, per stimare il volume dei blocchi con maggiore efficienza e sicurezza. I risultati dell'applicazione svolta su un versante di Monte Pellegrino (Sicilia) mostrano una buona correlazione con i dati da rilievi diretti, evidenziando il potenziale dell'approccio per migliorare la valutazione del rischio da crollo.

1. INTRODUZIONE

I crolli in roccia sono tra i fenomeni franosi più impattanti sulle attività umane. La valutazione del rischio associato a questi eventi dipende da due fattori principali: la pericolosità del fenomeno e l'impatto potenziale sugli elementi esposti, come vite umane e infrastrutture.

La propensione al distacco dei blocchi instabili e la magnitudo dell'evento sono parametri chiave per valutare la pericolosità. Tradizionalmente, il volume dei blocchi instabili, parametro fondamentale nel definire la magnitudo, viene stimato con metodi basati sull'analisi delle discontinuità, che richiedono misurazioni dirette sul campo, spesso difficili e in condizioni di elevata esposizione alla pericolosità. Negli ultimi decenni, nuovi approcci utilizzano tecniche indirette come la fotogrammetria e il LiDAR (Light Detection And Ranging), che consentono di creare nuvole di punti 3D (3DPC) per analizzare l'ammasso in modo più sicuro ed efficiente. Questo studio propone un nuovo metodo per stimare il volume dei blocchi instabili utilizzando il software open-source CloudCompare e dati acquisiti tramite laser scanner terrestre (TLS).

L'area di studio è situata sul versante occidentale della riserva naturale orientata di Monte Pellegrino, un rilievo costiero che si erge per 606 m s.l.m. all'interno del territorio urbano di Palermo (Sicilia) e costituito prevalentemente da rocce carbonatiche fratturate sulle quali insistono pendii ripidi interessati da frequenti fenomeni da crollo. Il versante analizzato è caratterizzato da una parete rocciosa subverticale alta circa 20 metri e da un deposito alla base con pendenze minime. L'area è frequentemente interessata da transito pedonale per scopi turistici e naturalistici. Per le sue caratteristiche, il monte è stato ampiamente studiato sia con approcci diretti (Cappadonia et al., 2021) che con approcci indiretti (Mineo et al., 2025).

2. METODI

La caratterizzazione dell'ammasso roccioso ha previsto sia acquisizioni secondo approcci tradizionali che moderni. Il rilievo tradizionale ha previsto la caratterizzazione delle discontinuità lungo una linea di scansione di 55 metri, utilizzando la bussola di tipo Clar e un metro a nastro secondo un approccio definito come scan line (ISRM, 1978). Allo scopo di ottenere informazioni sul volume tipico dei blocchi che interessano il versante sono state misurate le dimensioni dei blocchi già crollati e presenti alla base della parete.

Le acquisizioni indirette sono state effettuate tramite TLS. In particolare, è stato adoperato il Riegl VZ-2000i che ha permesso di acquisire nuvole di punti ad alta risoluzione, successivamente processate con software dedicato RiSCAN PRO, allo scopo di ottenere allineamento e filtraggio delle nuvole ottenute. Il

software Discontinuity Set Extractor (DSE, Riquelme et al., 2014) ha permesso di estrarre le principali discontinuità dal modello; i risultati sono stati esportati allo scopo di produrre l'analisi cinematica per scivolamento planare, a cuneo e per ribaltamento.

Il riconoscimento dei blocchi instabili è stato eseguito all'interno dell'ambiente open-source CloudCompare. In particolare, è stato utilizzato il tool *segment* per delineare i blocchi e separarli dalla roccia circostante. Per costruire la superficie di scorrimento più probabile, è stato utilizzato lo strumento *Fit 2.5D Quadric* in CloudCompare. Il tool *Compute 2.5D Volume* è stato, invece, adoperato per calcolarne il volume; le nuvole di punti rappresentative dei blocchi potenzialmente instabili vengono suddivise in celle di dimensioni note, e il volume è determinato automaticamente in base alla distanza tra la nuvola e la superficie. L'accuratezza del risultato dipende dalla percentuale di corrispondenza tra la superficie convessa del blocco e la superficie di scorrimento ipotetico, oltre che dalla risoluzione della nuvola di punti.

Infine, sul database ottenuto, è stata prodotta un'analisi per determinare la distribuzione statistica più probabile e i parametri caratteristici.

3. RISULTATI

Sulla parete rocciosa esposta ad ovest di Monte Pellegrino con un'inclinazione di 85° e immersione di 260° è stato condotto un rilievo di tipo scan line (fig. 1a) durante il quale sono state identificate 92 discontinuità, suddivise in tre principali set (fig. 1b): J1 (277/76), J2 (258/73), e J3 (182/68).

L'analisi cinematica, applicando parametri cautelativi per l'angolo di attrito della discontinuità e l'angolo di proiezione laterale, posti rispettivamente a 30° e 20° , ha permesso di analizzare i principali meccanismi di rottura (fig. 1c): scivolamento planare, scivolamento a cuneo e ribaltamento flessionale (Hoek, E., Bray, J.W, 1981). Le condizioni critiche per lo scivolamento planare riguardano principalmente le famiglie J1 (66%) e J2 (43%), mentre per il ribaltamento flessionale influenzano le famiglie J2 (35%) e J1 (17%). Lo scivolamento a cuneo interessa il 41% delle intersezioni tra piani di discontinuità, con maggiore probabilità per le combinazioni J1-J3 (41%), J1-J2 (35%), e J2-J3 (24%). L'analisi volumetrica condotta su blocchi già crollati ha prodotto un dataset di 97 elementi, con volumi compresi tra $0,02 \text{ m}^3$ e $2,88 \text{ m}^3$. L'analisi statistica, condotta in ambiente Python con il test di Kolmogorov-Smirnov (K-S test, $\alpha = 0.05$), ha mostrato che la distribuzione lognormale ben approssima il dataset. La nuvola di punti, acquisita ed elaborata allo scopo di produrre un'analisi indiretta, conta 39 milioni di punti con risoluzione di 1 cm (fig. 1a).

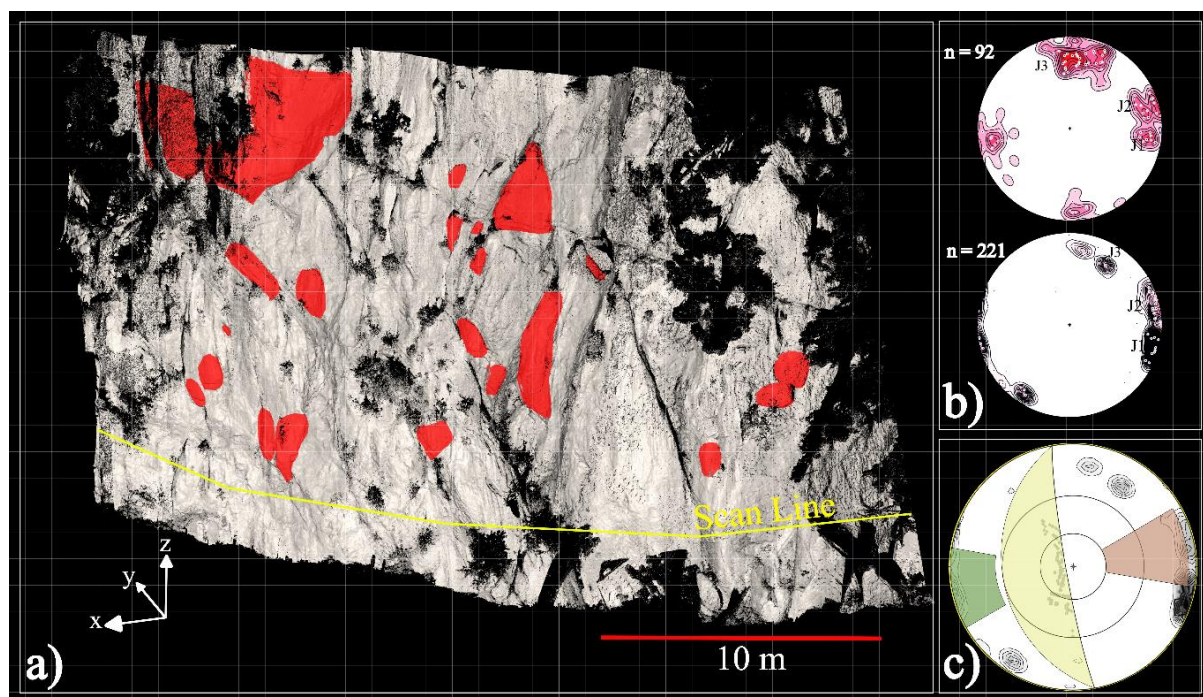


Figura 1 – a) nuvola di punti risultante dalle acquisizioni; b) rappresentazione stereografica dei set riconosciuti direttamente sul campo (in alto) ed estratti dalla nuvola di punti (in basso); c) analisi cinematica rispetto ai principali set di discontinuità riconosciuti dai due approcci.

Un'ulteriore analisi cinematica, condotta sui set estratti dal modello tridimensionale, ha confermato le condizioni critiche per i tre insiemi di discontinuità con nuove percentuali di instabilità: scivolamento planare (J2: 42%, J1: 36%), ribaltamento flessionale (J2: 32%, J1: 10%), e scivolamento a cuneo (52% delle intersezioni). In questa seconda analisi, la probabilità di avere cunei critici è risultata maggiore per J1-J2 (51%), seguita da J1-J3 (17%) e J2-J3 (7%).

Dall'analisi della nuvola di punti sono stati individuati manualmente 30 blocchi instabili (fig. 1a), i cui volumi calcolati ricadono in un range compreso tra 0,024 m³ e 3,75 m³. Anche in questo caso, il test di K-S ha confermato che la distribuzione è lognormale. Infine, i risultati sono stati visualizzati attraverso istogrammi e funzioni di densità di probabilità (PDF) per confrontare i due dataset (fig. 2).

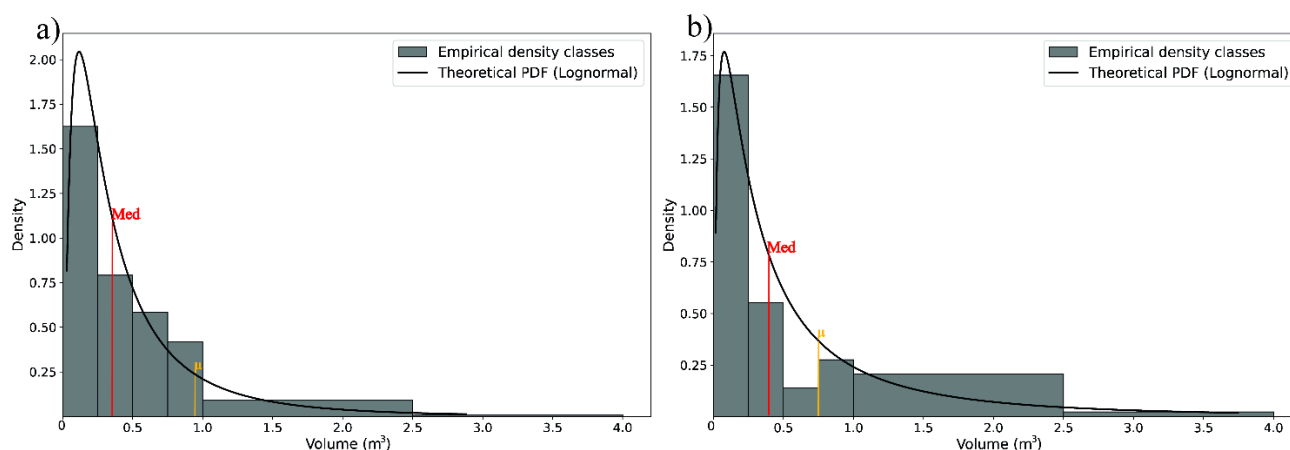


Figura 2 – Analisi dei dataset dei volumi misurati sul campo (a) ed estratti dalla nuvola di punti (b).

4. DISCUSSIONE

Sia gli approcci diretti che indiretti hanno permesso di identificare tre principali set di discontinuità. Le discrepanze ottenute per i set J1 e J2 sono comparabili a quelle derivanti da errori di misurazione durante le acquisizioni manuali in campo con una bussola da geologo (Bordehore et al., 2017).

Per quanto riguarda la differenza riscontrata per J3, dalle osservazioni in campo emerge che questo insieme è caratterizzato da discontinuità chiuse con poche superfici libere, rendendo le misurazioni sul campo più affidabili rispetto a quelle del modello.

L'analisi cinematica sui dati della scan line per i principali meccanismi di rottura ha evidenziato un'elevata propensione al distacco per J1 e J2, soprattutto nei meccanismi planare e a cuneo. J3 è influente solo nelle intersezioni con J1 e J2. Il confronto con i risultati del modello 3D ha mostrato delle differenze: J1, a causa della maggiore inclinazione, è rientrato solo parzialmente nell'involuppo di rottura planare per l'approccio indiretto (36%); per lo stesso motivo, le intersezioni tra J1 e J2 sono risultate più critiche rispetto a quelle derivate dalla scan line (51%).

L'analisi volumetrica applicata ai blocchi alla base del versante e ai blocchi potenzialmente instabili mappati sulla parete ha prodotto due dataset analizzati con approccio statistico. Il test K-S ha indicato una buona aderenza alla distribuzione lognormale con un livello di significatività α di 0,05, in linea con i risultati presenti in letteratura (Umili et al., 2023). I volumi medi sono superiori alla mediana in entrambe le analisi, in linea con la distribuzione asimmetrica osservata negli istogrammi (Fig. 2). Questo indica che pochi volumi di grandi dimensioni determinano uno scostamento della media dalla mediana.

I valori minimi e massimi (0,024 ÷ 3,75 m³ per approccio indiretto, 0,02 ÷ 2,88 m³ per approccio diretto), insieme al confronto della densità dei dati per la classe 1÷2,5 m³ (Fig. 2) per i due dataset, indicano una tendenza verso valori più elevati per i blocchi instabili rispetto a quelli già crollati. Inoltre, il primo dataset mostra un valore medio dei blocchi maggiore (0,91 m³) rispetto al secondo dataset (0,54 m³).

Considerando il volume iniziale medio (V_0) dalla nuvola di punti e il volume finale (V_f) dall'analisi volumetrica diretta del blocco crollato, è ipotizzabile una differenza di volume del 41%. Questo risultato non è in contraddizione con le aspettative: dopo la caduta libera iniziale, il blocco subisce rimbalzi, rotolamento e scivolamento prima di arrestarsi (Evans & Hungr, 1993), portando ad una effettiva riduzione del volume per frammentazione.

5. CONCLUSIONI

Il metodo applicato all'analisi del volume dei blocchi instabili presentato può essere considerato come un ulteriore strumento per la caratterizzazione della pericolosità legata ai fenomeni da crolli. Il metodo utilizza software open-source per la gestione dei dati di nuvole di punti 3D e integra una semplice procedura di rilievo in campo per confrontare i blocchi instabili con i volumi già crollati.

Per arricchire i dati utile alla quantificazione del rischio, sono state condotte analisi in campo per determinare la possibilità cinematica dei principali fenomeni di instabilità del versante roccioso e caratterizzare il volume dei blocchi già crollati. Nello specifico, sui dataset di volumi di blocchi ottenuti da acquisizioni indirette è stata applicata una nuova procedura per definire la superficie di scivolamento sulla roccia intatta circostante il blocco instabile, consentendo il calcolo del volume come differenza tra due nuvole di punti. Applicando il test di Kolmogorov-Smirnov, entrambi i dataset hanno mostrato una distribuzione lognormale. L'analisi statistica e il confronto dei risultati suggeriscono un volume iniziale medio di 0,91 m³ e una riduzione per frammentazione del 41%. Tuttavia, analizzando i valori massimi di entrambi i dataset, non si può escludere la possibilità che si inneschino crolli di volumi maggiori.

Il metodo proposto offre un'alternativa efficiente e sicura per stimare i volumi dei blocchi instabili. Gli sviluppi futuri del metodo potrebbero prevedere l'automazione di alcuni passaggi chiave nell'estrazione del volume e nel calcolo in serie degli stessi, rendendo il processo ancora più efficiente.

6. BIBLIOGRAFIA

Cappadonia C, Cafiso F, Ferraro R, Martinello C, Rotigliano E. Rockfall hazards of Mount Pellegrino area (Sicily, Southern Italy). *Journal of Maps*. 2021;17(3):29-39. doi:10.1080/17445647.2020.1824826.

Evans SG, Hungr O. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Can Geotech J*. 1993;30(4):620-636. doi:10.1139/t93-054.

International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1978;15(6):319-368. doi:10.1016/0148-9062(78)91472-9.

Hoek, E., Bray, J.W.,. *Rock Slope Engineering*,. Third Edition. ed. The Institution of Mining and Metallurgy, London.; 1981.

Jordá Bordehore L, Riquelme A, Cano M, Tomás R. Comparing manual and remote sensing field discontinuity collection used in kinematic stability assessment of failed rock slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017;97:24-32. doi:10.1016/j.ijrmms.2017.06.00.

Mineo G., Rosone M., Cappadonia C. (2025). Semi-Automated rock block volume extraction from high-resolution 3D point clouds for enhanced rockfall hazard analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 185. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105982>.

Riquelme AJ, Abellán A, Tomás R, Jaboyedoff M. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*. 2014;68:38-52. doi:10.1016/j.cageo.2014.03.014.

Umili G, Taboni B, Ferrero AM. Influence of uncertainties: A focus on block volume and shape assessment for rockfall analysis. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023;15(9):2250-2263. doi:10.1016/j.jrmge.2023.03.016.