



## **RILIEVO LiDAR DA VEICOLO PER LA GESTIONE DEL RISCHIO DA CADUTA MASSI LUNGO LE INFRASTRUTTURE VIARIE**

Diana Bianchi\*, Lucia Simeoni\*, Alfonso Vitti\*

[diana.bianchi@unitn.it](mailto:diana.bianchi@unitn.it), [lucia.simeoni@unitn.it](mailto:lucia.simeoni@unitn.it), [alfonso.vitti@unitn.it](mailto:alfonso.vitti@unitn.it)

*\*Università degli Studi di Trento - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica*

### **Sommario**

La presente memoria descrive i risultati preliminari ottenuti dall'esecuzione del rilievo LiDAR da veicolo per la gestione del rischio di caduta massi lungo un tratto dell'Autostrada del Brennero. L'utilizzo di rilievi LiDAR statici (generalmente su treppiede) per la progettazione di opere di mitigazione ed il monitoraggio di pareti rocciose a scala di sito è molto diffuso; al contrario, l'esperienza di rilievo in modalità cinematica (da veicolo) per la gestione del rischio a scala territoriale è ancora esigua. In assenza di esperienze pregresse, prima di eseguire il rilievo LiDAR da veicolo, è stata eseguita una simulazione del rilievo in ambiente GIS per valutarne la fattibilità in termini di efficienza ed efficacia potenziali. I risultati della simulazione sono risultati promettenti e pertanto in aprile 2023 è stato eseguito il rilievo LiDAR da veicolo con la stazione Mobile Mapping MX9 di Trimble, lungo un tratto di 30 km dell'autostrada, tra i caselli di Bolzano Nord e Chiusa. In questo tratto l'autostrada scorre ai piedi di pareti rocciose fino a sub-verticali. La memoria presenta i risultati preliminari in termini di densità di punti e percentuale di superficie di parete rilevati. La densità è risultata generalmente superiore a 300 punti/m<sup>2</sup>, ritenuta il limite inferiore per riuscire a individuare il distacco di ciottoli qualora il rilievo fosse ripetuto periodicamente per il monitoraggio dei distacchi. La superficie di parete rilevata è risultata in media quasi il doppio di quella prevista dalla simulazione.

### **1. Introduzione**

L'infrastruttura viaria oggetto di questo studio è il tratto di circa 30 km di A22-Autostrada del Brennero, che si estende tra il casello di Bolzano Nord e il casello di Chiusa, percorrendo la valle del fiume Isarco. Nel tratto in oggetto l'infrastruttura è realizzata su sezioni a cielo aperto e viadotti, che in parte sono ubicate alla base di pareti rocciose, ed in galleria. La valle del fiume Isarco ha origine glaciale e presenta la tipica conformazione ad U, con pareti rocciose che nel tratto di studio sono prevalentemente di origine vulcanica (i.e. ignimbrite e tufo) e presentano pendenze maggiori di 70°. Date le precedenti caratteristiche di questa porzione di territorio, la presenza di pareti rocciose costituisce un fattore di rischio da caduta massi per l'infrastruttura e soprattutto per gli utenti.

La gestione dell'infrastruttura deve perciò passare per la valutazione del rischio e la corrispondente pianificazione delle opere di protezione. L'utilizzo di un'adeguata metodologia di rilievo che permetta di ottenere informazioni sulle pareti rocciose che interessano l'intero tratto dell'infrastruttura è sicuramente strumento utile per valutare la suscettibilità ai crolli delle pareti e l'adeguatezza delle opere di protezione già esistenti.

Numerose evidenze riportate nella letteratura scientifica sottolineano come il rilievo LiDAR eseguito in modalità statica sia un ottimo strumento di mitigazione del rischio e gestione delle infrastrutture viarie, specialmente se ripetuto nel tempo (Walton et al., 2023; Kromer et al., 2017; Kromer et al., 2015) utilizzando dei punti di appoggio fissi (Jaboyedoff et al., 2010). Un'applicazione innovativa consiste nell'eseguire il rilievo in modalità cinematica con il LiDAR montato su un veicolo mobile (Lato et al., 2009; Lin et al., 2013). Un interessante esempio di utilizzo del LiDAR in modalità cinematica si riferisce

ai rilievi da barca per il monitoraggio di scogliere lungo la costa della Normandia (Giuliano et al., 2022; Michoud et al., 2015): in questi casi, l'utilizzo della tecnologia LiDAR in modalità cinematica rende possibile il monitoraggio e la caratterizzazione di pareti rocciose laddove la conformazione delle pareti non consente di applicare la tecnologia statica tradizionale. Gli autori riportano informazioni riguardo la metodologia del rilievo e il post processing dei dati ottenuti: in particolare, essi dimostrano l'efficacia del rilievo LiDAR in modalità cinematica in termini di capacità a distinguere famiglie di discontinuità e volumi di blocchi potenzialmente instabili nonostante le difficoltà ed errori legati alla metodologia di rilievo ed all'estrapolazione delle informazioni utili per la caratterizzazione geotecnica delle pareti rocciose.

Nel caso dell'Autostrada del Brennero, il rilievo LiDAR in modalità cinematica da veicolo è stato eseguito per 8 tratti di infrastruttura tra i caselli di Bolzano Nord e Chiusa, a seguito di una simulazione GIS che ne dimostrasse efficacia (in termini di densità di punti e superficie rilevata, Ferro et al., 2023) ed efficienza (in termini di tempo necessario a svolgere il rilievo ed impegno per garantire le condizioni di sicurezza, Simeoni et al., 2024). In questa memoria, dopo un breve richiamo ai risultati della simulazione, si descrive la metodologia adottata per l'elaborazione delle nuvole di punti provenienti dal rilievo, al fine di valutarne l'efficacia in termini di densità di punti e di percentuale di superficie rilevata. I risultati ottenuti sono poi commentati rispetto a quelli provenienti dalla simulazione.

## **2. Metodologia**

Il rilievo LiDAR statico è il più classico e semplice strumento di monitoraggio utilizzato per le pareti rocciose generalmente a scala di sito. Come già anticipato, studi innovativi riguardo l'applicabilità del rilievo LiDAR in modalità cinematica sono stati eseguiti in porzioni di territorio dove le pareti rocciose sono poco o non accessibili.

D'altra parte, volendo svolgere rilievi su scala territoriale, la modalità statica risulterebbe molto poco efficiente a causa del tempo richiesto per svolgere il rilievo e, aspetto non secondario, dell'impegno richiesto al gestore dell'infrastruttura per garantire le condizioni di sicurezza agli operatori senza sospendere la circolazione dei mezzi sull'autostrada (Simeoni et al., 2024). L'efficacia delle due modalità di rilievo e le loro principali differenze sono state preventivamente definite tramite una simulazione in ambiente GIS (Ferro et al, 2023).

### *2.1 Strumenti e mezzi utilizzati*

La simulazione GIS ha permesso di riprodurre le due tipologie di rilievo e di definire l'efficienza e l'efficacia di entrambe. Il rilievo in modalità cinematica ha simulato l'avanzamento del veicolo alla velocità di 15 km/h con l'utilizzo di un laser scanner RIEGL VUX-1HA situato ad un'altezza di 1.75 m dal manto stradale. Per tenere conto del guardrail (i.e. ostacolo al laser) si è limitato il campo visivo a  $-5^\circ$  (FOV) dello strumento rispetto alla vista orizzontale e si è fissato l'angolo del piano di scansione a  $25^\circ$ . Tale studio ha mostrato che le pareti potenzialmente rilevabili coincidono con più dell'85% del totale delle pareti aventi un'inclinazione superiore a  $70^\circ$ , di cui il 70% rilevabile con densità superficiale di punti maggiore di  $400 \text{ punti}/\text{m}^2$ . Questi valori sono risultati di poco inferiori a quelli ottenuti ipotizzando l'esecuzione di rilievi in modalità statica, con una successione di stop&go, con il laser scanner RIEGL VZ-2000i.

La strumentazione utilizzata per il rilievo LiDAR in modalità cinematica (TRIMBLE MX9) comprende: due laser scanner, ciascuno capace di rilevare fino a 1.8 milioni di punti per secondo e con una portata massima che varia tra i 235 m ed i 475 m di distanza al diminuire della frequenza di campionamento (da 1800 khz a 300 kHz), quattro videocamere per scattare foto ad alta qualità per migliorare il dataset disponibile, una Inertial Motion Unit (IMU) ad alta precisione e ricevitori GNSS. Le caratteristiche dei due strumenti utilizzati per la simulazione e per il rilievo sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1. Specifiche tecniche dei laser scanner impiegati per la simulazione e per il rilievo in modalità cinematica.

	RIEGL VUX-1HA	TRIMBLE MX9
Portata massima [m]	235	235-475
Portata minima [m]	1	1
Campo visivo (FOV) [°]	360	360
Frequenza di campionamento nrpps [pts/s]	fino a 1.800.000	500 scans/s

## 2.2 Metodo di esecuzione

Le attività di rilievo sono state eseguite nel mese di aprile 2023, quando purtroppo la vegetazione era già rigogliosa. In primo luogo, è stato necessario materializzare sulla corsia di emergenza, mediante l'utilizzo di apposita sagoma e spray tracciante, 300 punti di controllo (GCP) ai quali è stata assegnata una coordinata spaziale nel sistema di riferimento UTM 32 Nord grazie all'impiego di tecnologia GNSS ed una modalità di rilievo di tipo Real Time Kinematic (RTK) con stazionamenti di 180 secondi, collegandosi alla base ItalPOS di Bolzano. Tali punti, la cui quota ortometrica è stata ricavata per successiva elaborazione di grigliati IGM, sono stati impiegati per georeferire ed ottimizzare la nuvola di punti ottenuta con la tecnologia di rilievo in modalità cinematica.

Il rilievo LiDAR in modalità cinematica è stato eseguito ad una velocità media di circa 30-35 km/h, praticamente il doppio della velocità ipotizzata nella simulazione. Per ottimizzare i dati, sono state eseguite 4 sessioni di registrazione traiettoria e laser mobile (i.e. *run*), in andata e ritorno, modificando le impostazioni della strumentazione: una coppia di *run* è stata eseguita in modo da massimizzare la densità di punti (alta frequenza-range contenuto), mentre la seconda coppia è stata eseguita in modo tale da massimizzare la distanza coperta dal laser (bassa frequenza-range ampio).

La conoscenza dei GCP ha permesso di ottenere un'estrema precisione ed accuratezza della georeferenziazione dei punti rilevati (gli scarti generati dal processo di registrazione sono risultati essere attorno ai 2.5-3.5cm circa.). Il sistema di riferimento utilizzato è WGS84 – UTM32N (EPSG:4326), il geoide di riferimento è stato invece ricavato dai file grigliati n.014 e n.027 dell'IGM relativi alle tavolette in scala 1:25'000.

I risultati del rilievo, ottenuti da una preliminare elaborazione dei dati operata dall'esecutore, consistono in una nuvola di punti georeferenziata in maniera globale per ogni tratto (si veda ad esempio la Fig.1).

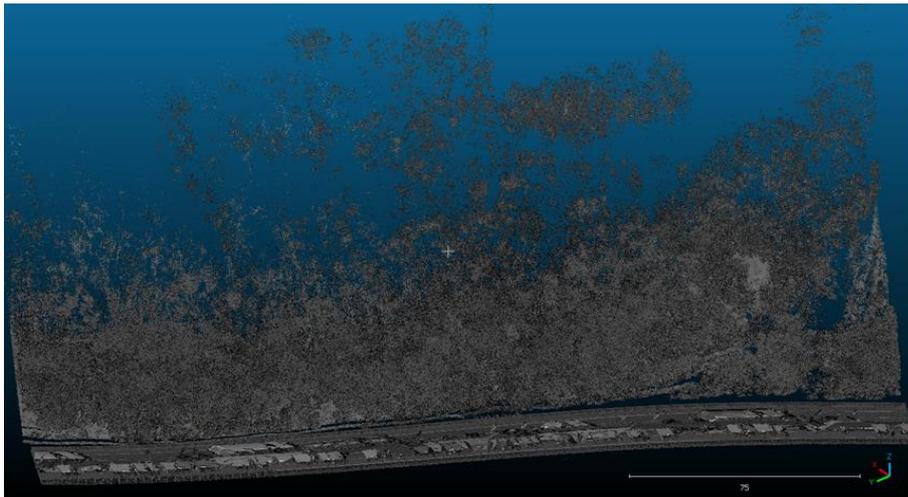


Fig. 1. Esempio di nuvola di punti risultante dal rilievo LiDAR da veicolo.

Le fasi in sito hanno richiesto la presenza di due operatori. La materializzazione dei GCP ha richiesto una giornata di lavoro, il rilievo in modalità cinematica solo mezza giornata o un'ora per ogni *run* di 30 km. La post-elaborazione dei dati ha richiesto un solo operatore e ha richiesto una giornata di lavoro.

### 2.3 Modalità di analisi

Le nuvole di punti, fornite dall'esecutore del rilievo LiDAR da veicolo distintamente per ciascuno degli 8 tratti rilevati, sono state elaborate tramite i software Cloud Compare (in seguito CC) e QGIS. La metodologia è stata ideata con lo scopo di valutare la densità superficiale di punti raggiunta dal rilievo per ogni nuvola di punti, confrontare l'estensione delle porzioni di piano campagna con inclinazione maggiore di  $70^\circ$  ottenute dalla simulazione GIS e quelle effettivamente rilevate in modalità cinematica. Gli step principali della metodologia di elaborazione dei risultati del rilievo consistono nell'utilizzo di CC per ripulire le nuvole di punti da elementi antropici e vegetazione, con lo scopo di valutare la densità superficiale di punti della nuvola, realizzare la mesh delle aree rilevate, per la valutazione dell'estensione delle aree di interesse rilevate confrontata con i risultati della simulazione.

Per la stima della densità superficiale di punti raggiunta dal rilievo, CC seleziona un dominio sferico di raggio locale (R) e valuta il numero di punti (N) su quella superficie: la densità è quindi definita come il rapporto tra il numero di punti e la superficie della sfera.

Il piano campagna è stato ottenuto tramite l'elaborazione di ogni nuvola di punti con il plugin "*Cloth Simulation Filter (CSF)*" presente in CC, che ha permesso, tramite una procedura iterativa e per tentativi, di eliminare gli oggetti rilevati che ne ostacolano la vista come, ad esempio, la vegetazione. Questo plugin utilizza una procedura semi-automatica per la classificazione dei punti come piano campagna (Ground Points) o non piano campagna (Off Ground Points) introdotta da Zhang et al. (2016) per separare i punti del piano campagna da quelli in elevazione. Questa metodologia consiste nell'invertire una nuvola di punti LiDAR e utilizzare un telo rigido fittizio per coprire la superficie invertita. Analizzando le interazioni tra i nodi del telo e i corrispondenti punti LiDAR, è possibile determinare la posizione dei nodi del telo per generare un'approssimazione della superficie del terreno. I parametri richiesti dal software sono: la tipologia di scena/indicazione dell'acclività, la risoluzione della griglia, il numero di iterazioni e la soglia di classificazione. Il parametro acclività serve a definire l'inclinazione del telo rigido, la risoluzione della griglia definisce il numero di nodi del telo rigido che andranno ad intersecarsi con i punti della nuvola e la soglia di classificazione si riferisce al valore limite della distanza tra i punti ed il telo rigido per classificare i punti come piano campagna o non piano campagna. È importante sottolineare che i valori sono stati scelti, tratto per tratto, dopo numerosi tentativi per ottenere il risultato più realistico. Per migliorare la qualità della porzione di punti del piano campagna ottenuti, si è applicato un filtro sul valore di intensità rilevata per ogni punto: questo parametro dipende da angolo di incidenza, distanza e composizione della superficie dell'oggetto intercettato, perciò è particolarmente utile per distinguere le caratteristiche della copertura del suolo.

La nuvola di punti del piano campagna risultante è stata quindi trasformata in mesh quadrate (con lato pari a  $0.5\text{ m}$ ) da confrontare con le aree risultate visibili dalla simulazione: questo confronto è stato ottenuto in QGIS tramite il comando "*Intersezione*" tra layer vettoriali, che ha permesso di valutare l'estensione areale delle porzioni che risultano sovrapposte. I risultati sono riportati nella sezione seguente.

## 3. Risultati preliminari

### 3.1 Densità di punti

La Fig. 2 riporta un esempio di distribuzione delle densità di punti. In Tabella 2, per ogni tratto e per le diverse modalità di rilievo (dove disponibili), sono riportate le percentuali di punti che hanno raggiunto la soglia di  $900\text{ punti}/\text{m}^2$  e la soglia minima di  $300\text{ punti}/\text{m}^2$ . Quest'ultima è ritenuta la soglia minima affinché la ripetizione periodica del rilievo cinematico possa essere ritenuta efficace per il monitoraggio del distacco di ciottoli dalle pareti rocciose.

Tabella 2. Percentuali di punti che hanno raggiunto le soglie di 300 punti/m<sup>2</sup> e 900 punti/m<sup>2</sup> per tutti i tratti rilevati.

	% punti > 300 $\frac{\text{punti}}{\text{m}^2}$	% punti > 900 $\frac{\text{punti}}{\text{m}^2}$
Tratto 1	98	96
Tratto 2	78	46
Tratto 3	82	59
Tratto 4	79	48
Tratto 5	88	77
Tratto 6	74	42
Tratto 7	62	20
Tratto 8	69	26

È interessante notare che per i tratti 1 e 7, che erano risultati non rilevabili dalla simulazione GIS il rilievo in modalità cinematica è riuscito a rilevare alcune superfici con ottime densità di punti (la percentuale massima di punti a densità maggiore di 900  $\text{punti}/\text{m}^2$  è riferita al Tratto 1). La percentuale minima di punti a densità maggiore di 900  $\text{punti}/\text{m}^2$  è riferita al Tratto 7 perché in questo caso la giacitura delle pareti è prevalentemente ortogonale all'asse dell'autostrada e non permette la rilevazione completa. Tuttavia, nonostante il risultato negativo previsto dalla simulazione, è stato possibile rilevare il 62% della parete con densità maggiore di 300  $\text{punti}/\text{m}^2$  ed il 20% con densità maggiore di 900  $\text{punti}/\text{m}^2$ .

In generale è stato riscontrato che le aree vegetate sono state rilevate con una densità superficiale di punti maggiore di 300  $\text{punti}/\text{m}^2$ . Si può assumere che anche il piano campagna coperto dalla vegetazione sarebbe rilevato con una densità simile e pertanto si raccomanda di eseguire il rilievo in periodo tardo autunnale o invernale per ridurre al minimo le zone oscurate dalla vegetazione.

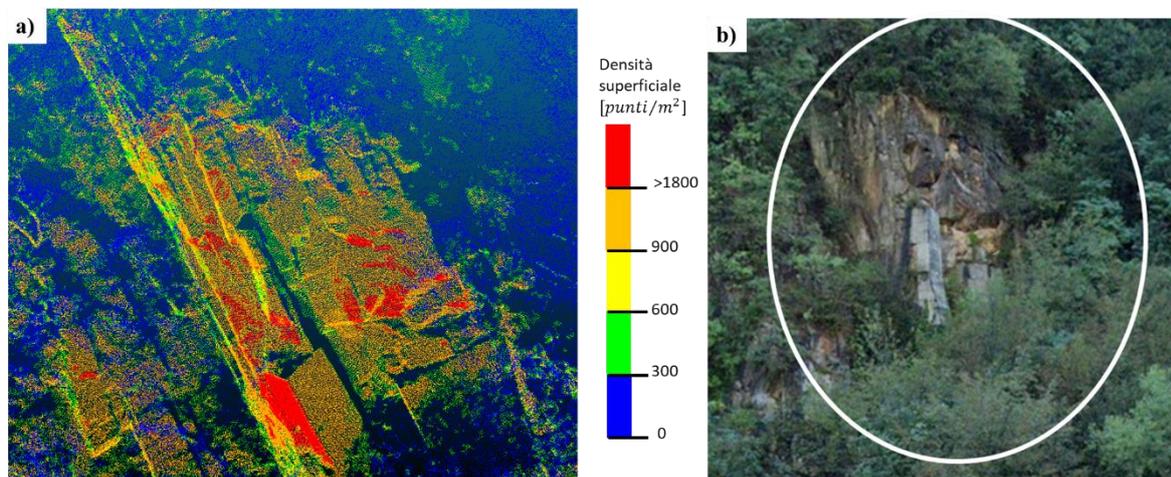


Fig. 2 a) Zoom su una porzione di parete con pendenza maggiore di 70° risultata rilevabile dalla simulazione in GIS, b) dettaglio della stessa area da Google Street View.

### 3.2 Aree rilevate

Il confronto delle aree è stato effettuato per il piano campagna con pendenza maggiore di 70°. In tale calcolo non sono state prese in considerazione le porzioni di superficie coperte dalla vegetazione. In media, nel rilievo è stata osservata un'area che è quasi il doppio di quella osservata nella simulazione. È interessante notare che in generale l'area rilevata coincide solo per circa il 30% con quella simulata. Addirittura, per uno degli otto tratti, il rilievo ha osservato il doppio dell'area prevista dalla simulazione, ma il piano campagna con pendenza maggiore di 70° effettivamente ottenuto non coincide con alcuna

porzione prevista dalla simulazione. Per interpretare questi risultati, va tenuto presente che la distanza massima raggiunta dal rilievo spesso non coincide la distanza massima prevista dalla simulazione.

#### 4. Conclusioni

Nella corrente memoria si descrivono i risultati preliminari di un rilievo LiDAR eseguito in modalità cinematica da veicolo per rilevare le pareti rocciose lungo un tratto di circa 30 km di A22-Autostrada del Brennero, che si estende tra il casello di Bolzano Nord e il casello di Chiusa.

I risultati riguardano la densità di punti e l'estensione di superficie rilevata, confrontata con quella attesa dalla simulazione precedentemente condotta in ambiente GIS. La percentuale di punti con densità maggiore di 300 *punti/m<sup>2</sup>* è risultata sempre maggiore del 60%, con picco del 98% per uno degli 8 tratti analizzati lungo il percorso. Il valore di 300 *punti/m<sup>2</sup>* è stato assunto valore minimo affinché la ripetizione periodica del rilievo cinematico possa essere ritenuta efficace per il monitoraggio del distacco di ciottoli dalle pareti rocciose. L'estensione di piano campagna, non coperto da vegetazione e inclinato più di 70°, che è stato osservato dal rilievo è risultata mediamente il doppio di quella prevista dalla simulazione. È interessante notare che in generale l'area rilevata coincide solo per circa il 30% con quella simulata. Ciò deriva: dalle differenti caratteristiche tecniche degli strumenti utilizzati per il rilievo e per la simulazione, dalla metodologia di elaborazione delle nuvole di punti, che potrebbe essere maggiormente affinata per ogni singolo tratto, dalla presenza della vegetazione, che nella simulazione è stata ipotizzata assente.

#### Bibliografia

- Ferro E., Cimini F., DeRosa L., Corsini A., Ronchetti F., Lelli F., Vitti A., Simeoni L. (2023). "GIS-Based Analysis of the Potential Effectiveness and Efficiency of Mobile Terrestrial LiDAR to Survey and Monitor Rockfall Areas Along 15 km of Highway E45". Proc.: CNRIG 2023, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering.
- Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abellán A., Derron M.H., Metzger R., Pedrazzini A. (2012) "Use of LIDAR in landslide investigations: a review", *Natural Hazards*, 61, 5–28.
- Kromer R., Hutchinson D.J., Lato M.J., Gauthier D.G., Edwards T. (2015) "Identifying rock slope failure precursors using LiDAR for transportation corridor hazard management", *Engineering Geology*, 195, 93-103.
- Kromer R., Lato M.J., Hutchinson D.J., Gauthier D.G., Edwards T. (2017) "Managing rockfall risk through baseline monitoring of precursors using a terrestrial laser scanner", *Canadian Geotechnical Journal*, 54, 953-967.
- Lato M.J., Hutchinson D.J., Diederichs M., Ball D., Harrap R. (2015) "Engineering monitoring of rockfall hazards along transportation corridors: using mobile terrestrial LiDAR", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 935-946.
- Lin Y., Hyypää J., Kaartinen H., Kukko A. (2013) "Performance Analysis of Mobile Laser Scanning Systems in Target Representation", *Remote Sensing*, 5, 3140-3155.
- Michoud C., Carrea D., Costa S., Derron M.H., Jaboyedoff M., Delacourt C., Maquaire O., Letortu P., Davidson R. (2015) "Landslide detection and monitoring capability of boat-based mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy", *Landslides*, 12, 403–418.
- Rosser N., Lim M., Petley D., Dunning S., Allison R. (2007) "Patterns of precursory rockfall prior to slope failure", *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112, 1-14.
- Simeoni L., Vitti A., Ferro E., Corsini A., Ronchetti F., Lelli F., Costa C., Quattrociochi D., Rover S., Beltrami A. (2024) "Mobile Terrestrial LiDAR survey for rockfall risk management along a highway", Proc.: II Fabre Conference – Existing bridges, viaducts and tunnels: research, innovation and applications (FABRE24), in press.
- Walton G., Malsam A., Oester Mapes N., Arpin B. (2023) "Forecasting and Mitigating Rockfall based on Lidar Monitoring: A Case Study from Colorado", *Transportation Research Record*, 2677, 863-870.
- Zhang W., Qi J., Wan P., Wang H., Xie D., Wang X., Yan G. (2016) "An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation", *Remote Sensing*, 8, 501-523.