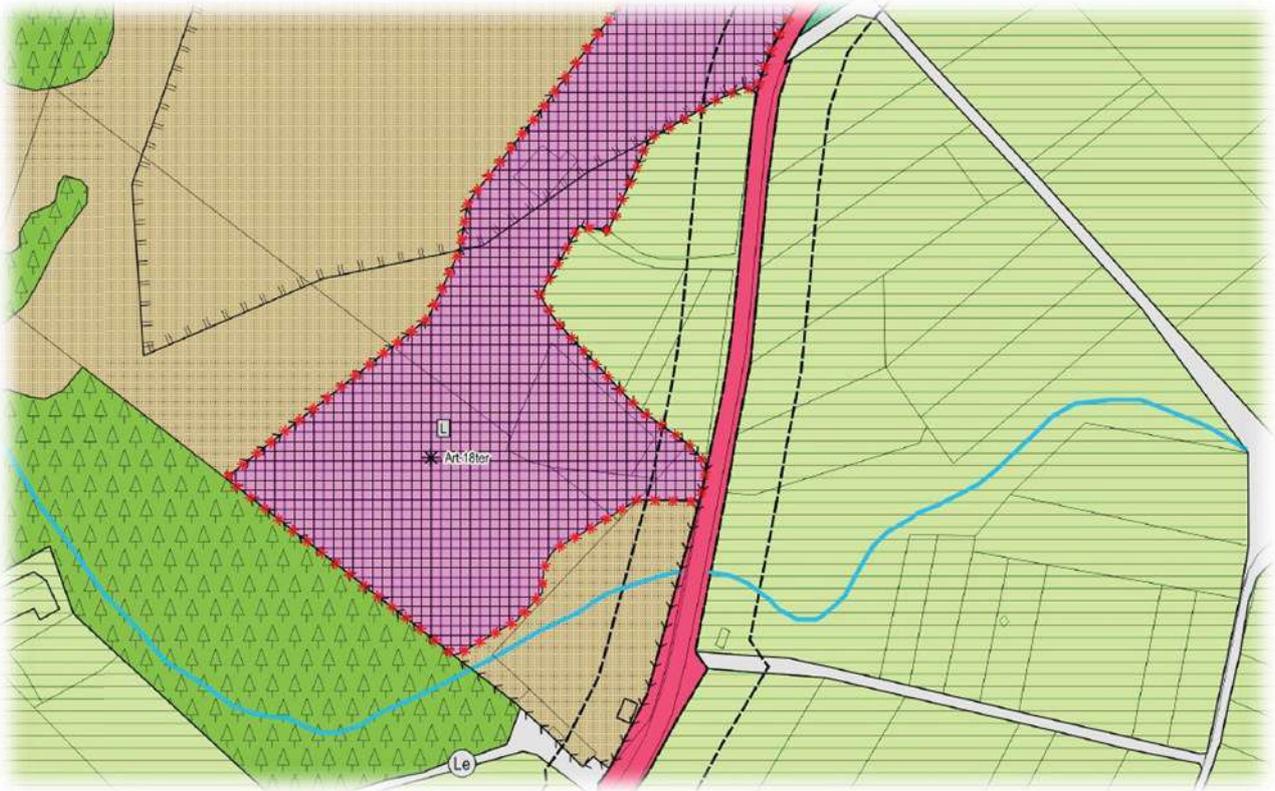


Comune di Mezzocorona
 Provincia Autonoma di Trento
 Committente:
 Comune di Mezzocorona

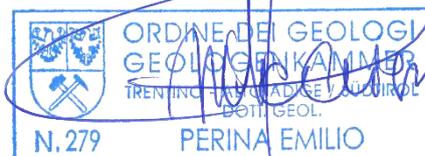
OGGETTO

STUDIO GEOLOGICO DEI VERSANTI ROCCIOSI ADIACENTI IL TRATTO DELLA S.P. 11 IN LOCALITÀ MASO NUOVO A MEZZOCORONA (CIG STUDIO GEOLOGICO: Z653CACE0C) A SUPPORTO DELLA VARIANTE 2/2024 AREE ESTRATTIVE – ADOZIONE DEFINITIVA AI SENSI DELL'ART. 37, COMMA 3, DELLA L.P. 15/2015 (PRATICA 3109). RIF. DELIBERA CONSIGLIARE N.24 DD. 13/08/2024 ADOZIONE PRELIMINARE NUOVO PROGRAMMA CAVE PRULIENNARE 2026



STUDIO DI COMPATIBILITÀ

Allegato C "Indicazioni e precisazioni per l'applicazione delle disposizioni concernenti le aree con penalità elevate, medie o basse e le aree con altri tipi di penalità" della D.G.P. 18/03/2022, n. 379: l.p. 27 maggio 2008, n. 5, articoli 14-18 e 48 - l.p. 4 agosto 2015, n. 15.



dott. geol. Emilio Perina

Levico Terme, luglio 2025

Rel. 977/25



Via Mons. D. Caproni, 58
 38056 Levico Terme (Tn)



PEC e.perina@geotaspec.it
 perina.emilio@gmail.com



347 1663624

PIVA 02303140228 / C.F. PRNMLE86M27L378K

INDICE

1. PREMESSA	2
1.1. CONTENUTI DELLO STUDIO	2
1.2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	2
2. STUDIO DI COMPATIBILITÀ	4
2.1. PREMESSA	4
2.2. ANALISI VINCOLI NORMATIVI DI RIFERIMENTO P.U.P.	4
2.3. INDAGINI EFFETTUATE	7
2.4. INQUADRAMENTO STRUTTURALE REGIONALE	7
2.5. INQUADRAMENTO GEOLGICO	11
2.6. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	14
2.7. ASPETTI CLIMATICI LOCALI.....	16
2.8. ASPETTI MACRO E MESO STRUTTURALI PARETE ROCCIOSA AREA CAVE	19
2.8.1. QUALITÀ AMMASSO ROCCIOSO (GSI)	21
2.8.2. POSIZIONI CRITICHE	24
2.9. DEFINIZIONI VOLUMI UNITARI (VRU).....	28
2.10. VERIFICA SCOSCENDIMENTO MASSI	31
2.10.1. SIMULAZIONE DI CADUT MASSI 3D – ROCPRO3D.....	32
2.10.2. DATI INGRESSO DI CADUTA MASSI 3D – ROCPRO3D.....	32
2.10.3. SINTESI RISULTATI MODELLAZIONE 3D	34
2.11. ANALISI CADUTA MASSI 2D LOTTO VARIANTE N°3.....	44
2.12. CONCLUSIONI	52

ALLEGATI

All.1. REPORT ANALISI SCOSCENDIMENTO MASSI

1. PREMESSA

1.1. CONTENUTI DELLO STUDIO

Su incarico e per conto del Comune di Mezzocorona (TN), è stato effettuato uno studio di compatibilità a supporto della Variante 2/2024 aree estrattive – Adozione definitiva ai sensi dell'art. 37, comma 3, della L.P. 15/2015 (pratica 3109). L'anno 2024, il giorno 02 del mese di dicembre alle ore 10:00, si è riunita la Conferenza di pianificazione, convocata in videoconferenza con nota prot. n. 755491 di data 07 ottobre 2024, per la verifica di coerenza del piano in argomento rispetto al Piano Urbanistico Provinciale. Dal sopraccitato verbale di pianificazione, si evince come essa sia costituita da n.12 Varianti al PRG. Dal medesimo verbale si evincono i pareri positivi per il punto 1-12-13, mentre i restati vengono subordinati ad appositi studi di compatibilità o prescrizioni di utilizzo dai vari Servizi Provinciali competenti in materia. Veniva pertanto prodotto dallo scrivete dott. Geol. Emilio Perina, il relativo studio di compatibilità a supporto della variante numero n°3 (Studio di compatibilità 910_25) adozione preliminare.

Per quanto concerne il presente studio si fa riferimento alle valutazioni inerenti alla sola area n. 3 di variante, al fine di espletare le richieste di integrazioni pervenute dal Servizio Geologico in relazione alla adozione definitiva.

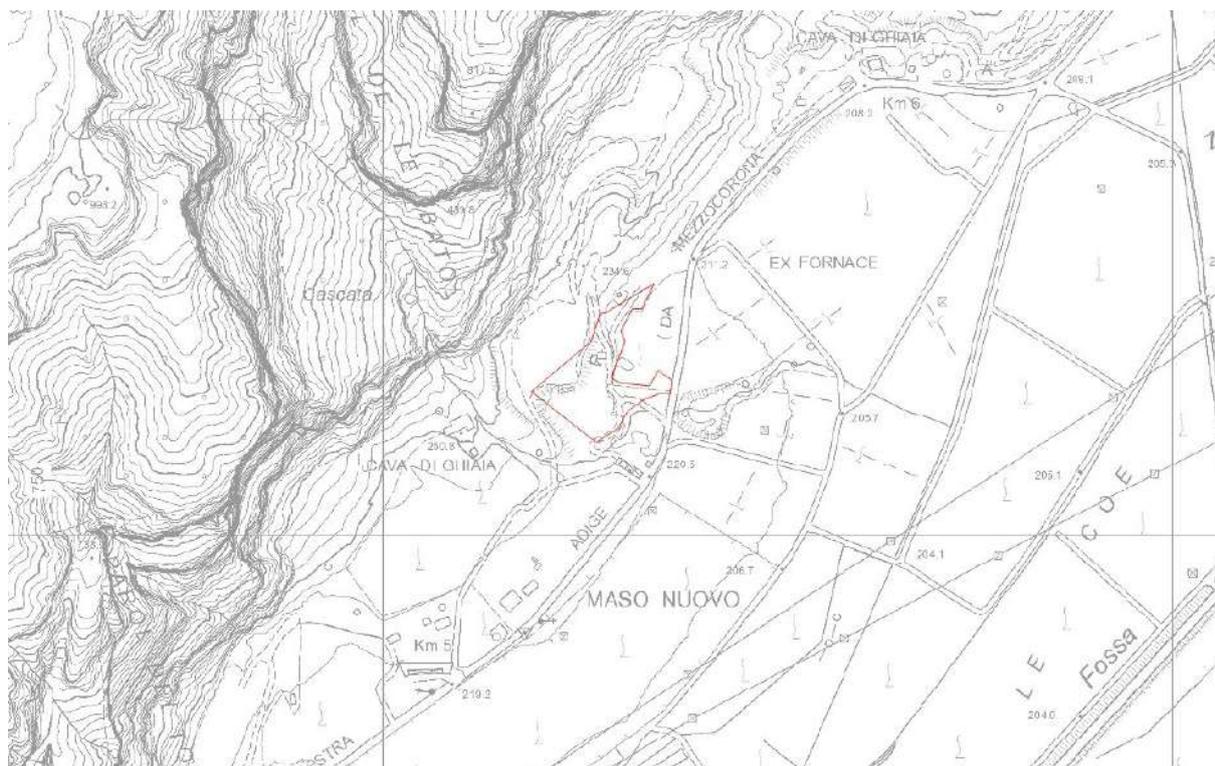


Fig. 1.1: estratto carta tecnica provinciale (CTP) e relativa area di variante n°3; scala 1: 5.000 (modificata a vista).

1.2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Normativa vincoli urbanisti (PUP)

D.P.R. 15/02/2006 – PIANO GENERALE DI UTILIZZAZIONE DELLE ACQUE PUBBLICHE

DGP. 22/12/2006 n. 2759 - DISPOSIZIONI TECNICHE E ORGANIZZATIVE PER LA REDAZIONE E L'AGGIORNAMENTO DELLE CARTE DELLE PERICOLOSITÀ

LEGGE PROVINCIALE 23 maggio 2007, n. 11 GOVERNO DEL TERRITORIO FORESTALE E MONTANO, DEI CORSI D'ACQUA E DELLE AREE

L.P. 27/05/2008, n. 5 – NORME DI ATTUAZIONE DEL P.U.P.

D.G.P. 30/05/2008, n. 1387 – DIRETTIVE PER L'APPLICAZIONE DEGLI ARTICOLI 16, 17, 19, 21, 29 E 32 DELLE NORME DEL PIANO DI UTILIZZAZIONE DELLE ACQUE PUBBLICHE E MODIFICA DELLA DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA PROVINCIALE N. 1984 DEL 22.09.2006 CON OGGETTO: "METODOLOGIA PER L'AGGIORNAMENTO DELLA CARTOGRAFIA DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO DEL PIANO GENERALE DI UTILIZZAZIONE DELLE ACQUE PUBBLICHE"

D.G.P. 26/03/2010, n° 627 - MISURE DI SEMPLIFICAZIONE A MODIFICAZIONE E INTEGRAZIONE DELLA DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA PROVINCIALE N. 1387 DI DATA 30 MAGGIO 2008

D.G.P. 27/05/2011, n. 1120 – NUOVE DISPOSIZIONI ORGANIZZATIVE PER L'ATTUAZIONE DEGLI ART.LI 16 E 17 DELLE NORME DI ATTUAZIONE DEL PGUAP. MEDIANTE MODIFICAZIONE DELLA DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA PROVINCIALE N. 627 DI DATA 26 MARZO 2010

L.P. 01/07/2011, n. 9 - DISCIPLINA DELLE ATTIVITÀ DI PROTEZIONE CIVILE IN PROVINCIA DI TRENTO

D.G.P. 30/10/2012, n° 2333 – MODIFICAZIONI ALLA DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA PROVINCIALE N. 1120 DEL 27 MAGGIO 2011 IN MATERIA DI DIRETTIVE PER L'APPLICAZIONE DELLE NORME DI ATTUAZIONE DEL PIANO GENERALE DI UTILIZZAZIONE DELLE ACQUE PUBBLICHE

D.G.P. 6/10/2014, n. 1708 – DISPOSIZIONI TECNICHE E ORGANIZZATIVE PER LA REDAZIONE E L'AGGIORNAMENTO DELLE "CARTE DELLA PERICOLOSITÀ" DI CUI ALL'ARTICOLO 10 DELLA LEGGE PROVINCIALE 1° LUGLIO 2011, N. 9

L.P. 4/08/2015, n 15 - LEGGE PROVINCIALE PER IL GOVERNO DEL TERRITORIO 2015

D.G.P. 3/12/2015, n. 2209 - APPROVAZIONE DEL PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI (PGRA) DELLA PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO, IN ATTUAZIONE DELLA DIRETTIVA 2007/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO DI DATA 23 OTTOBRE 2007.

D.G.P. 19/05/2017, n. 772, 785, 787, 788 – CRITERI E METODOLOGIA PER LA REDAZIONE E L'AGGIORNAMENTO DELLE CARTE DELLA PERICOLOSITÀ

D.G.P. 19/07/2019, n. 1066, 1067, 1078, 1080 – NUOVA ADOZIONE PRELIMINARE DELLA CARTA DI SINTESI DELLA PERICOLOSITÀ

D.G.P. 04/09/2020, n. 1317: l.p. 27 maggio 2008, n. 5, articoli 14-18 e 48 - l.p. 4 agosto 2015, n. 15, articoli 21-22 e 31: - APPROVAZIONE DELLA CARTA DI SINTESI DELLA PERICOLOSITÀ

D.G.P. 18/03/2022 n. 379 AGGIORNAMENTO DELL'ALLEGATO C DELLA DELIB. 1317 DEL 4/19/2020: "INDICAZIONI E PRECISAZIONI PER L'APPLICAZIONE DELLE DISPOSIZIONI CONCERENTI LE AREE CON PENALITÀ ELEVATE, MEDIE O BASSE E LE AREE CON ALTRI TIPI DI PENALITÀ

D.G.P. 29/09/2023 n. 1737 e n. 1748 PRIMO AGGIORNAMENTO DELLA CAP E DELLA CSP – NUOVE MAPPATURE E "DISPOSIZIONI TECNICHE PER LA REDAZIONE DELLA CARTA DI SINTESI DELLA PERICOLOSITÀ

Ai sensi dell'articolo 22, comma 2 della l.p. n. 15/2015, con l'approvazione della Carta di sintesi della pericolosità cessano di applicarsi le disposizioni del Piano generale di utilizzazione delle acque pubbliche in materia di uso del suolo (capo IV – Aree a rischio idrogeologico delle norme del PGUAP).

Scopo del presente studio sarà dunque anche quello di verificare i tipi di penalità sottese all'area d'intervento, al fine di verificarne la compatibilità delle opere con le medesime, ai sensi delle norme provinciali vigneti in materia.

2. STUDIO DI COMPATIBILITÀ

2.1. PREMESSA

Il seguente elaborato riporta le integrazioni allo studio di compatibilità redatto ai sensi dell'Allegato C "Indicazioni e precisazioni per l'applicazione delle disposizioni concernenti le aree con penalità elevate, medie o basse e le aree con altri tipi di penalità" della D.G.P. 18/03/2022, n. 379: l.p. 27 maggio 2008, n. 5, articoli 14-18 e 48 - l.p. 4 agosto 2015, n. 15.

2.2. ANALISI VINCOLI NORMATIVI DI RIFERIMENTO P.U.P.

La legge provinciale 1 luglio 2011, n. 9 "Disciplina delle attività di protezione civile in La legge provinciale 1 luglio 2011, n. 9 "Disciplina delle attività di protezione civile in provincia di Trento" pone in capo alla Provincia il compito di previsione dei pericoli e dei rischi (art. 6, comma 3) mediante la redazione e l'aggiornamento delle "carte della pericolosità" (art. 10, comma 1) che riguardano i pericoli connessi a fenomeni idrogeologici, valanghivi, alluvionali, sismici, a incendi boschivi, a determinate sostanze pericolose, a cavi sospesi o ad altri ostacoli alla navigazione aerea e ad ordigni bellici inesplosi.

Tali strumenti costituiscono la base di riferimento per definire la Carta di Sintesi della Pericolosità, prevista dall'art. 22 della legge provinciale 4 agosto 2015, n. 15 (Legge provinciale per il governo del territorio), la quale individua le aree a diversa penalità ai fini dell'applicazione delle disposizioni relative all'uso del territorio previste dalla legge provinciale 27 maggio 2008, n.5 "Approvazione del nuovo piano urbanistico provinciale".

In particolare, la Carta di Sintesi della Pericolosità è uno degli elementi costituenti il Piano Urbanistico Provinciale PUP (comma 4, lettera d, dell'articolo 21 della legge provinciale 4 agosto 2015, n. 15 e comma 1 dall'articolo 3 della legge provinciale 27 maggio 2008, n. 5) e ha il compito di individuare le aree caratterizzate da diversi gradi di penalità ai fini dell'uso del suolo, in ragione della presenza dei pericoli idrogeologici, valanghivi, sismici e d'incendio boschivo, descritti nelle Carte della Pericolosità (articolo 10 della legge provinciale 1 luglio 2011, n. 9 e articolo 14 dalle legge provinciale 27 maggio 2008, n.5).

In materia di pericolo, la Carta di Sintesi della Pericolosità rappresenta il nuovo strumento di riferimento per la pianificazione urbanistica e con la sua entrata in vigore cessano di applicarsi le disposizioni della Carta di sintesi geologica e le disposizioni in materia di uso del suolo del Piano Generale di Utilizzazione delle Acque Pubbliche (PGUAP). Ai sensi dell'articolo 22, comma 2 della l.p. n. 15/2015, con l'approvazione della Carta di sintesi della pericolosità cessano di applicarsi le disposizioni del Piano generale di utilizzazione delle acque pubbliche in materia di uso del suolo (capo IV – Aree a rischio idrogeologico delle norme del PGUAP).

La G.P. venerdì 29 settembre 2023 con delibere n°1737 e n°1748 ha approvato il primo aggiornamento delle CaP e della CSP quale risultato dell'attività di continuo aggiornamento delle strutture competenti in materia di pericolo idrogeologico e urbanistica rispetto ai processi naturali e antropici che interessano un territorio in costante evoluzione come il Trentino. Le nuove mappature sono entrate in vigore a partire dal 6 ottobre 2023, giorno successivo alla pubblicazione delle deliberazioni nel Bollettino Ufficiale della Regione Trentino-Alto Adige. Secondo la citata cartografia l'area di variante n°3 è classificata in penalità P3 media, P2 bassa e P1 trascurabili (art. 16-17-18 L.P. 27 maggio

2008, n.5)¹, ascrivibile entrambe a una pericolosità da crolli per quanto di analisi nel presente studio di compatibilità. Non sono altresì presenti zone di tutele speciali individuate dalla CSP, quali AFI (ambiti fluviali) o IMP (aree riservati a interventi di mitigazione del rischio). In particolare, come riportato nel verbale di pianificazione, si evidenzia quanto segue:

VARIANTE n°3:

*Il Servizio Geologico evidenzia che parte della variante ricade in Penalità P3 per crolli rocciosi. Pur prendendo atto che l'area ha già di fatto un utilizzo di "carattere produttivo", si richiede ai sensi dell'art.16 c.4 delle N.d.A. della CSP lo **studio di compatibilità in fase di pianificazione**, per la valutazione della pericolosità attuale e locale in considerazione del nuovo assetto morfologico estrattivo a monte dell'area stessa.*

L'analisi della consultazione delle Carta della Pericolosità che costruiscono la base della CSP ha evidenziato che le penalità assegnate al lotto oggetto di studio sono ascrivibile a una pericolosità ordinaria di classe H3 per crolli; si rileva altresì una pericolosità H2 residuale da crolli.

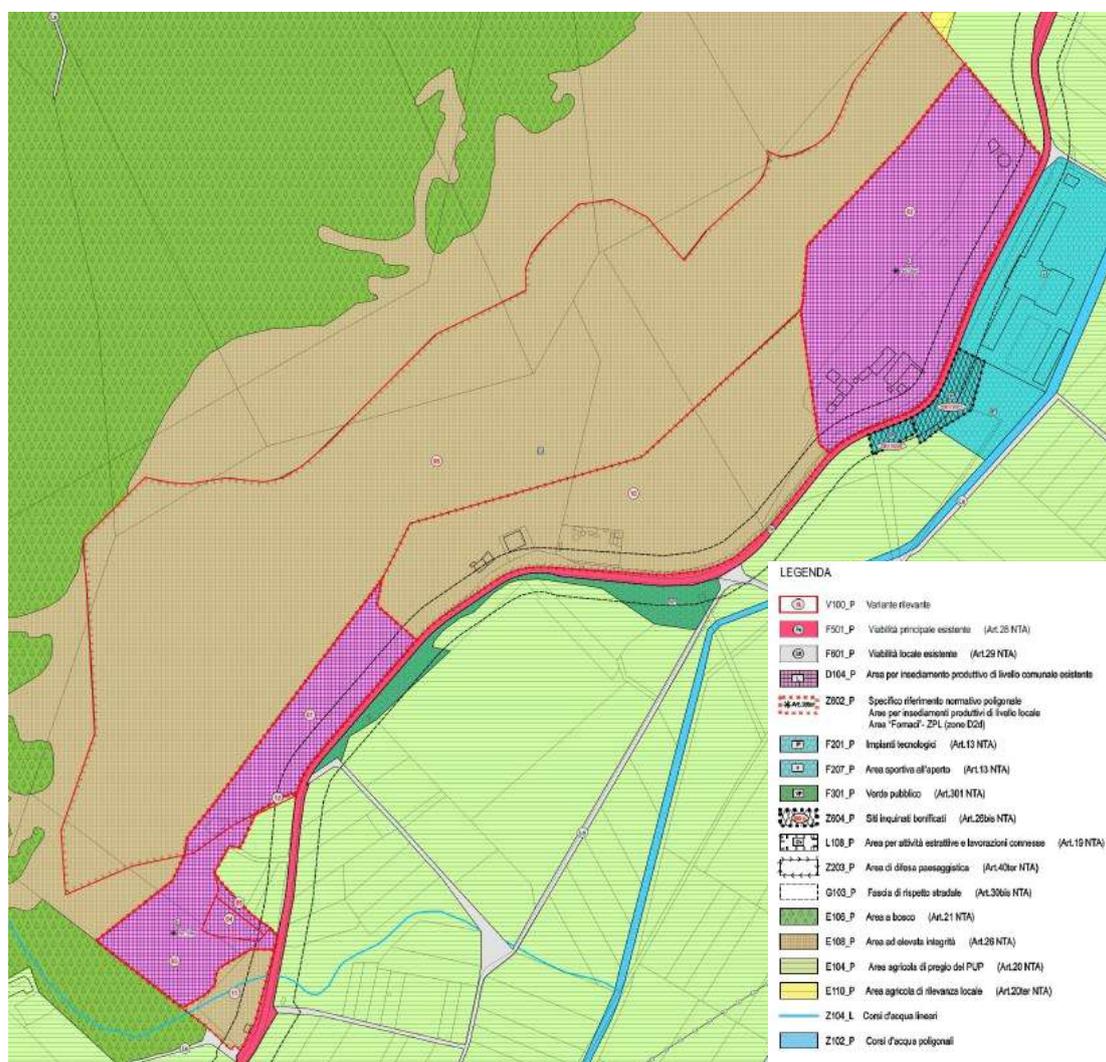


Fig. 2.1: estratto Piano Regolatore Generale Variante 2024 stato di raffronto; scala1: 2.000 (modificata a vista).

¹ Allegato C "Indicazioni e precisazioni per l'applicazione delle disposizioni concernenti le aree con penalità elevate, medie o basse e le aree con altri tipi di penalità" della D.G.P. 18/03/2022, n. 379: l.p. 27 maggio 2008, n. 5, articoli 14-18 e 48 - l.p. 4 agosto 2015, n. 15.

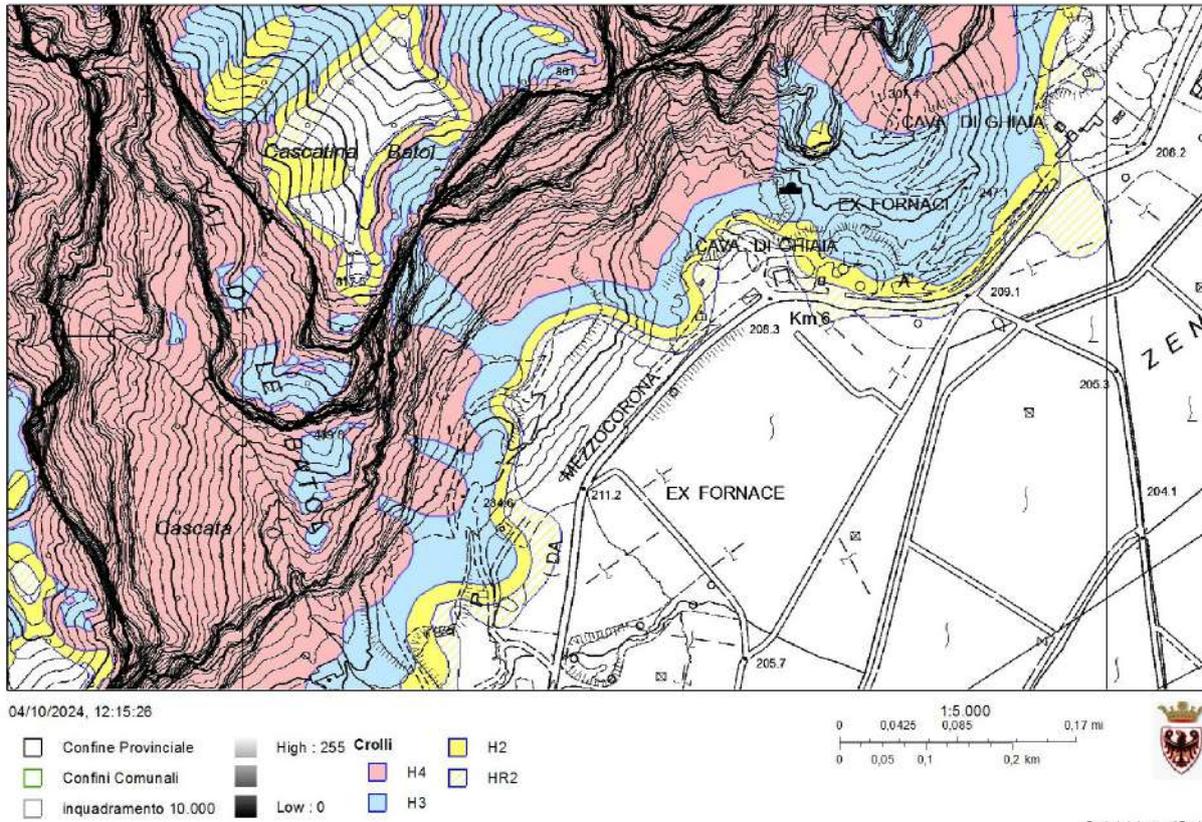


Fig. 2.2: estratto Carta della Pericolosità (CaP) pericolosità crolli; scala 1: 5.000 (modificata a vista).

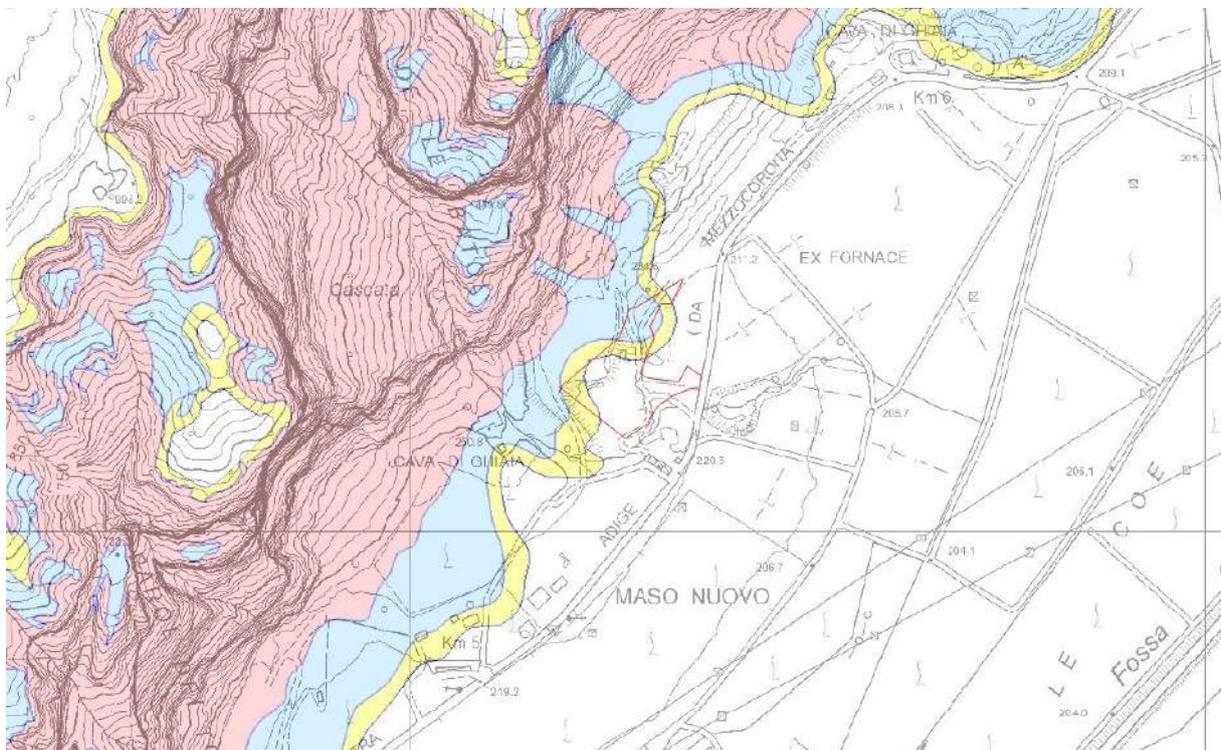


Fig. 2.3: sovrapposizione Carta della Pericolosità (CaP) da crolli e area di variante n°3 da mappa catastale; scala 1: 5.000 (modificata a vista).

2.3. INDAGINI EFFETTUATE

Al fine di raccogliere le informazioni necessarie a una corretta **valutazione delle caratteristiche strutturali e geomeccaniche dell'ammasso roccioso sotteso alla variante n°3**, sia per la **valutazione delle potenzialità deformativi a larga scala che alla scala dell'affioramento nonché delle analisi di scoscendimento massi 2D e 3D**, si fa riferimento anche alle indagini effettuate su una più ampia scala a supporto del futuro Piano Cave dell'intera parte pubblica, essendo alcune di esse a monte della stessa variante 3. In particolare, è stato eseguito un rilievo 3D fotogrammetrico con drone della parete rocciosa a monte della strada provinciale SP 21, suddiviso nelle seguenti quattro fasi:

- fase 01: pianificazione del volo con drone e dei Ground Control Points;
- fase 02: acquisizione dei dati fotogrammetrici con drone e dei Ground Control Points;
- fase 03: elaborazione dei dati acquisiti: analisi dettagliata del data set acquisito, analisi GCP acquisiti; elaborazione scatti fotografici tramite l'utilizzo di software specifico e conseguente generazione della nuvola di punti;
- fase 04: esportazione dei dati: Digital Surface Model (DSM) in formato .tiff; ortofoto georeferita in formato .tiff.

Per una corretta valutazione dell'andamento del substrato roccioso al di sotto delle attuali coperture oggetto di una futura coltivazione di cava, e una valutazione preliminare delle quantità del giacimento coltivabile, nonché per il corretto posizionamento delle opere di mitigazione della pericolosità da crolli, sono state eseguite specifiche indagini geofisiche, rielaborate e interpretate in relazione al contesto geologico locale. Al fine di calibrare i risultati sono state associate due tecniche sismiche tra loro disgiunte che prevedono una l'analisi dei tempi di primo arrivo (tomografia sismica) e l'altra l'analisi delle onde di superficie (Masw2D). Nel complesso sono stati realizzati 4 profili lungo massima pendenza ed uno di collegamento dei primi 3 per totali 945 metri. Tale indagine riportata nel presente rapporto è propedeutica alla prossima progettazione del piano cave in fase di stesura redatta dallo scrivente e dal dott. Forestale Mirco Baldo.

Nei capitoli successivi, dopo un inquadramento strutturale, geologico e geomorfologico generale, verranno trattati i singoli aspetti elencati utili per una migliore analisi dell'area di variante n°3.

2.4. INQUADRAMENTO STRUTTURALE REGIONALE

La catena alpina è un orogene collisionale a doppia vergenza con una lunga e complessa storia dovuta all'interazione tra le placche Europea e di Adria. Il territorio regionale è caratterizzato dal punto di vista geologico dalla presenza di due grandi unità strutturali della catena Alpina: il Sudalpino e l'Austroalpino. Il primo rappresenta il cuore dell'orogene Alpino ed è costituito da un ventaglio di sovrascorrimenti (thrust fan) NNW vergenti dominato da un metamorfismo alpino e da una deformazione duttile. Il secondo è una catena a pieghe e sovrascorrimenti SSE-SE vergenti (fold and thrust belt) caratterizzata da una tettonica fragile e da assenza di metamorfismo alpino. La classica suddivisione è una conseguenza di un'orogenesi polifasica che ha avuto inizio nel tardo Cretaceo e continua tuttora.

L'evoluzione dell'area del Sudalpino orientale è avvenuta tramite una serie di eventi tettonici che hanno coinvolto i margini delle placche Adriatica ed Europea. Durante il Permiano inferiore ampi corpi vulcanici hanno occupato una depressione tettonica di estensione superiore ai 2000 Km² tra il Lineamento Periadriatico a NO e la Linea della Valsugana a SE (Distretto vulcanico Atesino) (*D'Amico et al. 1980*). Tale vulcanismo è il prodotto di un'intensa attività sub-aerea di tipo fissurale che si protrasse tra 276 e 268 Ma (*D'Amico & Del Moro, 1988; Barth et al., 1994*). Dalla fine del Paleozoico (Permiano) alla metà del Mesozoico eventi di distensione litosferica hanno portato all'apertura dell'oceano Ligurepiemontese, collegato verso est al più vasto oceano della Tetide. Il Sudalpino rappresenta parte del margine passivo adriatico con ancora conservati i rapporti tra le unità paleogeografiche (bacini e piattaforme) mesozoiche. In particolare, il corridoio delle Giudicarie con la sua direzione NNE-SSW rappresenta l'eredità del margine occidentale tra la piattaforma carbonatica di Trento e il bacino lombardo (*Trevisan, 1930; Castellarin 1992*).

Nel Cretacico medio, l'inversione di movimento tra le placche ha portato alla chiusura del bacino Ligure-piemontese, mentre nel Terziario con la collisione dei margini passivi varie fasi compressive hanno dato origine alla conformazione strutturale attuale della catena alpina. Dal Pleistocene l'azione erosiva fluvio-glaciale all'interno di periodi di inter- e peri-glaciali, ha modellato le valli, talvolta con grossi eventi franosi (*Fuganti, 1969; Zanferrari et al., 1982*) legati anche a eventi sismici.

La presenza di corpi vulcanici sovrapposti ha favorito l'irrigidimento della crosta superficiale del Sudalpino. In fase di compressione (fase alpina), la differente reologia fra i corpi vulcanici e le rocce sedimentarie presenti ha permesso la formazione di uno scollamento con thrust progressivi verso sud, nell'area orientale rispetto alla Linea delle Giudicarie. Nell'area ad occidente di quest'ultima si sono formati invece back-thrust, mentre le faglie al margine del Distretto vulcanico e lungo la transizione piattaforma di Trento – Bacino lombardo sono state riattivate in transpressione sinistra.

la configurazione strutturale dal tardo Cretaceo è distinta nei seguenti sistemi tettonici (*Castellarin 2009*):

- Sistema tettonico pre-Adamello, nel quale sono presenti un thrust belt sud vergente e un dicco sub verticale, legati alle compressioni eo-alpine;
- Sistema strutturale dinarico, con formazione di una zona frontale esterna dinarica nel settore orientale del Sudalpino, rappresentata da thrust con trend NW-SE, SW vergenti, legata a compressione dinarica eocenica e/o più recente;
- Sistema Giudicarie - Val trompia –Valsugana, composto dalla presenza di due sistemi tettonici: associazione di strutture elvetica (insubrica) che forma thrust con trend WNW; influenza la pianura Padana, le alpi lombarde e il Trentino occidentale; legata agli eventi di post collisione dell'oligocene-miocene Giudicarie – Val Trompia – Valsugana Belt che riarrangia e incorpora strutture precedenti (Elvetica); forma una struttura larga e arcuata attorno al pre-Adamello Belt e al batolite dell'Adamello; legata alla compressione del Serravaliano-Tortoniano. La compressione neogenica ha influenzato ampiamente la parte settentrionale della piattaforma veneta con il thrust della Valsugana orientato ENE;
- Sistema scledense, legato alla compressione della fase Adriatica (Messiniano-Pliocene) con trend NW ha dislocato il sistema a thrust delle Giudicarie nel settore più orientale;

Lungo il bordo meridionale del Sudalpino, la catena delle Giudicarie, composta strutturalmente da thrust con trend ENE della linea della Valsugana, è divisa dalla zona di trasferimento della faglia Schio-Vicenza orientata NW provocando movimenti transpressivi sinistri. Essa delimita un blocco strutturale a forma di triangolo tra la catena delle Giudicarie, il Montello-Friuli Belt e la pianura Padana. Il confine tra queste due unità è costituito dal Lineamento Periadriatico detto anche Linea Insubrica, un fascio di linee

tettoniche ad andamento essenzialmente E-W che attraversa longitudinalmente l'intero orogene alpino e che in Trentino passa attraverso il passo del Tonale e la Val di Sole (prendendo il nome di linea del Tonale e linea delle Giudicarie nord). Situata poco distante dal Lineamento Insubrico che le corre a W, la Val di Tovel è attraversata da una serie di faglie orientate circa N-S, che si collegano ai principali lineamenti tettonici del Gruppo di Brenta: la Linea Palete-S. Maria Flavona e la Linea della Val Strangola, comprese tra altre importanti strutture, la Linea Ballino-Garda a W e la Linea Trento-Cles a E. Si tratta di paleolinee formatesi durante il rifting norico-giurassico che, originariamente a componente diretta, vennero riattivate in chiave transpressiva in occasione degli eventi deformativi collegati all'evoluzione postcollisionale neoalpina. Di grande importanza risulta la Linea Trento-Cles, particolarmente attiva tra il Norico e il Lias. Essa, ribassando il settore oggi occupato dal Gruppo di Brenta rispetto a quello dell'attuale Val di Non, produsse notevoli differenze di spessori e facies.

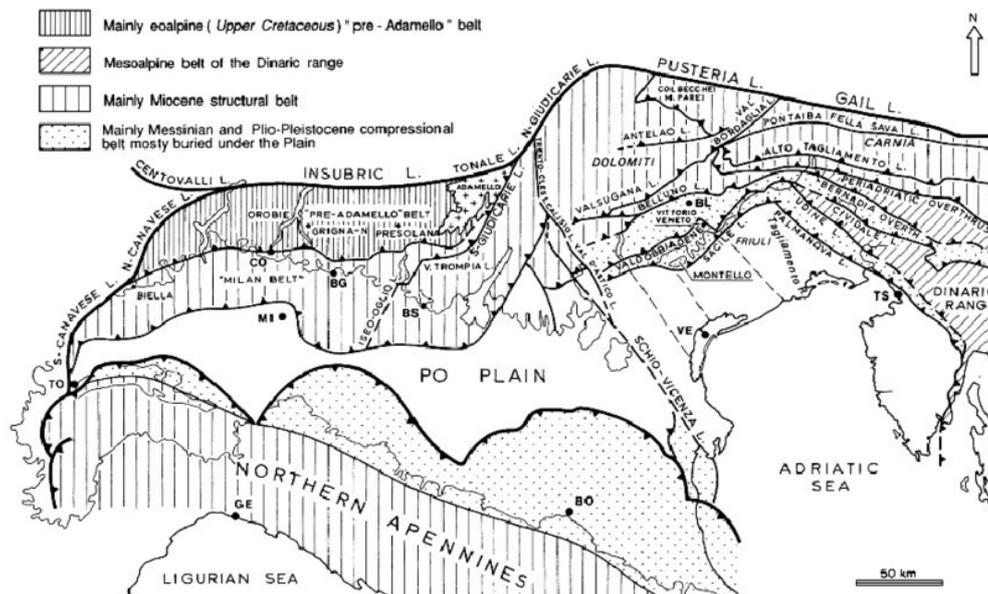


Fig. 2.4: schema tettonico delle Alpi Meridionali (Sudalpino). Da CASTELLARIN et alii (1992).

L'area in esame, dunque, al margine del complesso sistema di rampe e sovrascorrimenti della Val di Non, legati ai fenomeni transpressivi sinistri associati alla Linea delle Giudicarie. Tali sovrascorrimenti e raccorciamenti, a partire dalla Linea di Foiana rappresentano uno scollamento profondo a livello del basamento porfirico, che si spinge fino alla Val d'Adige. Tale sistema presenta un vettore di spostamento NW-SE e si sviluppa localmente in funzione delle caratteristiche geomeccaniche delle Formazioni rocciose interessate. Lo scollamento (Prosser G. 1990) si divide in tre pacchetti: una porzione basale compresa tra le Arenarie di Val Gardena e la sequenza werfaniana a prevalente comportamento plastico; una porzione intermedia costituita dalla successione dolomitica (Dolomia della Val d'Adige e della Dolomia Principale); la porzione superiore delle litologie comprese tra il Rosso Ammonitico e la Scaglia Cinerea a comportamento scarsamente competente. Il settore in esame si colloca all'estremità del sistema di rampe a basso angolo del più esteso Sistema Vigo Di Ton-Tramin/Termenò e Mezzocorona/Cortaccia al quale è associato un raccorciamento di 5-6 Km. In particolare, il complesso sistema di sovrascorrimenti e scaglie aumenta per la presenza di alcune scaglie minori costituite dalla Dolomia Principale, o da scollamenti a basso angolo entro la Dolomia della Val d'Adige.

Dagli stessi studi di Prosser G.² si evince come l'ellissoide di stress, determinato lungo il sentiero Favogna all'interno della Val D'Adige, mostri un netto andamento transpressivo con direzione di massima compressione orientata NNW-SSE con σ_1 173/5, σ_2 82/2 e σ_3 334/85 con rapporto di forma dell'ellissoide R pari a 0.47, a testimonianza di un contesto transpressivo. Le forti condizioni di stress tettonico localizzate in corrispondenza degli assi trascorrenti ad orientazione SO-NE del sistema giudicariense hanno determinato, sulle litologie a comportamento fragile, la formazione di fasce cataclastiche oltre ad una fitta e diffusa fessurazione a bassa persistenza dell'ammasso roccioso. Esiste poi uno complesso fessurativo ad alta persistenza costituito da piani verticali e subverticali che corrono parallelamente alle ripide pareti rocciose verticali, frutto dei progressivi fasi di smantellamento delle porzioni tabulari in cui si suddivide l'ammasso roccioso (fig. 2.6).

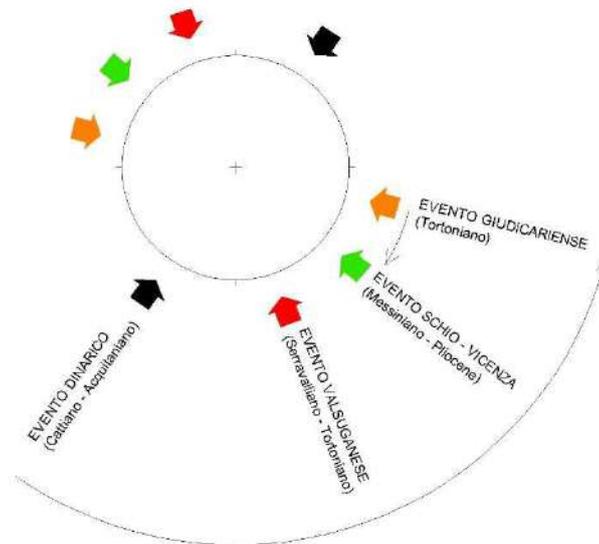


Fig. 2.5: schema tettonico delle Alpi Meridionali (Sudalpino). Da CASTELLARIN et alii (1992).



Fig. 2.6: vista verso N-NW della parete rocciosa ottenuta dalla nuvola di punti tramite drone.

² Prosser G. 1990 – Evoluzione e significato delle strutture tettoniche appartenenti al sistema della Linea delle Giudicarie Nord. – Tesi di Dottorato Università degli Studi di Padova.

2.5. INQUADRAMENTO GEOLGICO

Nel Subalpino la serie geologica copre un intervallo temporale che va dal paleozoico al quaternario ed è costituita da una notevole varietà litologica; alla base della colonna stratigrafica troviamo le rocce del basamento cristallino pre-permiano seguite dalle estese e potenti formazioni delle vulcaniti permiane (piattaforma Porfirica Atesina); queste ultime sono poi ricoperte da depositi continentali costituiti da arenarie e conglomerati continentali; la serie continua con sedimenti deposti in ambiente marino tipo arenarie, argilliti, marne e calcari, prosegue con potenti complessi carbonatici costituiti da calcari e dolomie triassico-cretaciche e si chiude con formazioni marnose e argillose eoceniche e con formazioni calcarenitiche Oligomioceniche. La Val d'Adige è situata nella porzione settentrionale delle Dolomiti di Brenta e rientra nel dominio strutturale delle Alpi Meridionali, caratterizzato da terreni prevalentemente calcareo-dolomiti tipici della serie triassico-giurassica dell'alto strutturale della Piattaforma di Trento. Si tratta di una serie essenzialmente calcareo-dolomitica compresa tra la Dolomia Principale (Norico) e la Scaglia Rossa (Cretaceo superiore). La successione si distingue per una stratigrafia intermedia tra il dominio della Piattaforma Veneta e quello del Bacino Lombardo, con facies bacinali che si spingono all'interno della piattaforma.

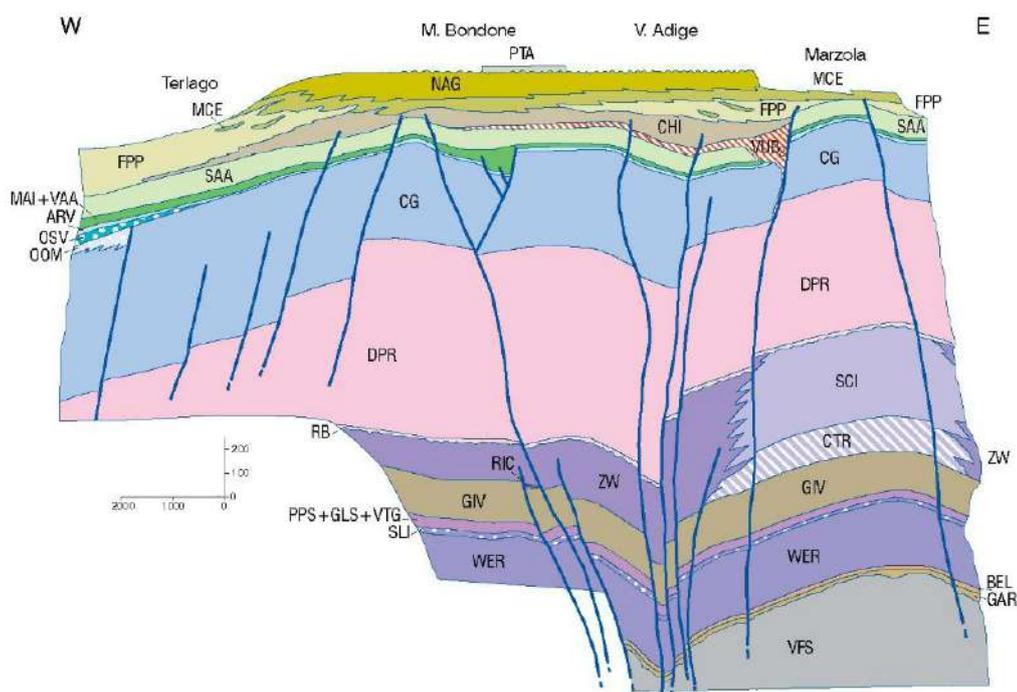


Fig. 2.7: schema dei rapporti stratigrafici delle Unità Sedimentarie tratto dalle "Note Illustrative della Carta Geologica D'Italia Foglio 060 Trento" – ISPRA, 2010.

Formazione di Werfen; SLI, dolomia del Serla inferiore; PPS, conglomerato del Piz da Peres; GLS, formazione a Gracilis; VTG, Conglomerato di Voltago; GIV, formazione di Giovo; RIC, Conglomerato di Richthofen; ZW, gruppo delle Zwischenbildungen; CTR, Formazione del Contrin; SCI, formazione dello Sciliar; RB, gruppo di Raibl; DPR, Dolomia Principale; CG, Gruppo dei Calcari Grigi; ARV, Rosso ammonitico veronese; MAI, Maiolica; VAA, scaglia variegata alpina; SAA, Scaglia rossa; CHI, formazione di Chiusole; VUB2, basalto della Val Lagarina - membro del Monte Biaena; FPP, formazione di Ponte Pià; MCE, calcare di Malcesine; NAG, calcare di Nago; PTA, argille di Ponte Arche.

In particolare, il versante oggetto di studio è caratterizzato dall'affioramento di una potente successione stratigrafica costituita nella porzione mediana – inferiore dalla Formazione dello Sciliar (SCI), costituita in prevalenza da dolomie saccaroidi bianche o

grigio chiare, fortemente ricristallizzate e, in subordine, da calcari dolomitici biancastri o grigio chiari. La stratificazione è grossolana, più evidente alla base dove sono talvolta riconoscibili dolomie stratificate organizzate in cicli peritidali con chiusure laterali a lingua e stromatoliti planari continue con fenestrate laminari (sheet crack). I livelli stromatolitici possono essere sostituiti da intervalli argillitici in strati millimetrici o dolomie marnose giallastre screziate in rosso. Il tetto dell'unità è caratterizzato dalla presenza di breccie e filoncelli di dolomie cristalline scure.

Segue un livello meno persistente appartenente alla Formazione di Travenanzes (TVZ), costituito da prevalenti dolomie grigio- biancastre, talora con fiamme gialle in strati decimetrici cui si intercalano livelletti centimetrico- millimetrici di peliti verdi e grigie. Verso l'alto compaiono dolomie siltose chiare con stromatoliti. Gli ultimi metri dell'unità sono costituiti da dolomie grigio chiare fino a biancastre in strati di spessore metrico a giunti piani separate da livelletti centimetrici di peliti rosse.

L'alto stratigrafico delle pareti vede l'affioramento della Dolomia Principale DPR, dalla quale è riconoscibile una litozona a stratificazione decimetrica di dolomie subtidali giallastre. Nel complesso, la formazione si presenta ben stratificata ed appare costituita da una monotona successione di cicli peritidali metrici. Nella porzione inferiore dell'unità costituente le pareti sommitali dell'area, nei cicli peritidali si distingue una parte basale subtidale, con dolomie microcristalline a Megalodonti e Gasteropodi, cui si sovrappone un intervallo a lamine con tappeti algali interessati da processi di disseccamento (mud crack e sheet crack). L'ambiente deposizionale è quello di una vasta ed articolata piattaforma carbonatica dolomitizzata precocemente, con prevalenti facies lagunari e di piana tidale maggiormente subsidente nella porzione occidentale. Età: Carnico sup.- Norico.

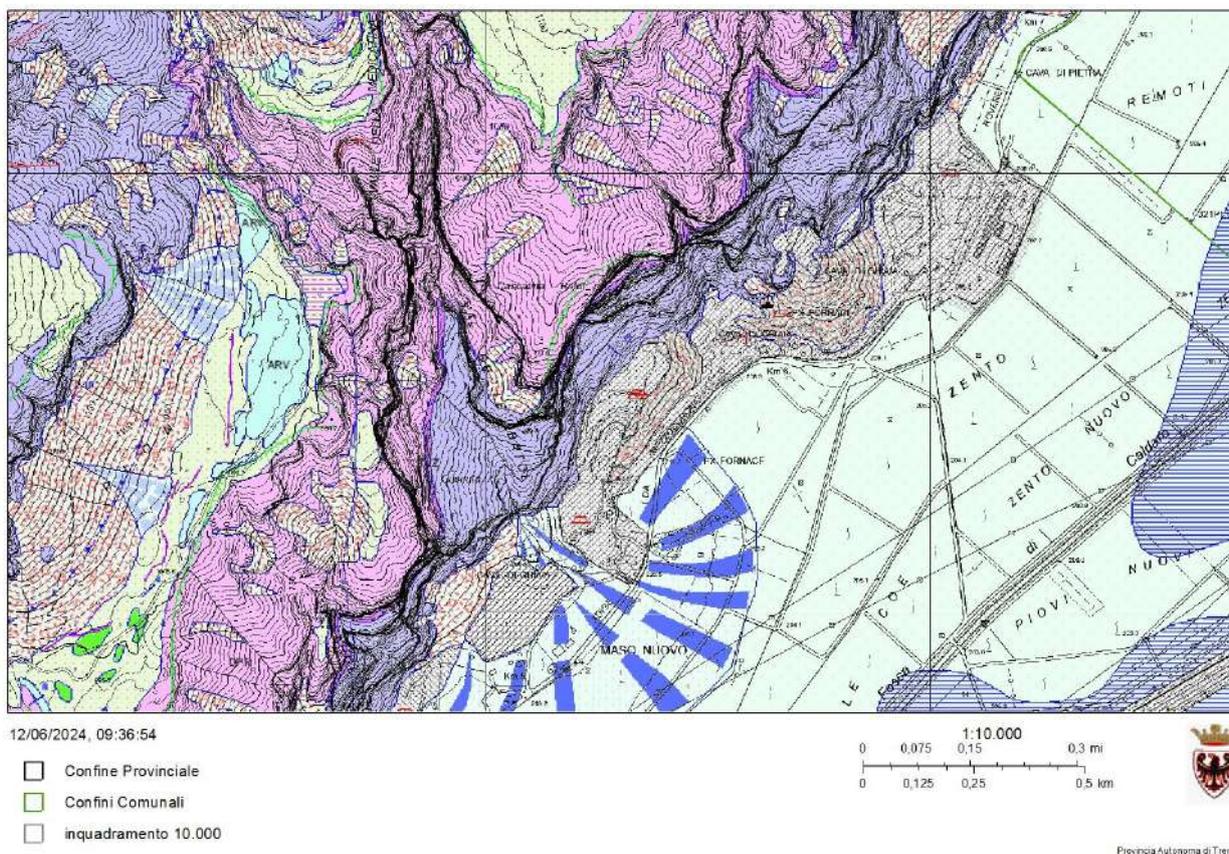


Fig. 2.8: ubicazione dell'area sulla "Carta Geologica della Provincia autonoma di Trento" fonte P.A.T.; scala 1: 10.000 (modificata a vista). Servizio di diffusione on line dei dati del Sistema Informativo Ambientale e Territoriale provinciale (S.I.A.T.).



Foto 2.9: vista della parete a monte dell'intera area di cava nonché della variante n 3 (porzione a sx).



Foto 2.10: vista della parete sottesa all'area di variante n 3.

2.6. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Nell'area di transizione tra le pareti rocciose e i depositi olocenici di fondovalle della piana alluvionale del Fiume Adige, si rileva un imponente deposito detritico costituito da detriti di falda, in gran parte smantellati dall'attività estrattiva degli ultimi decenni, derivanti dalla progressiva degradazione naturale delle pareti sovrastanti e fortemente connessi dalla presenza di fasce cataclastiche oltre ad una fitta e diffusa fessurazione a bassa persistenza dell'ammasso roccioso. Le principali forme di accumulo sono il conoide in loc. Maso Nuovo, in corrispondenza di un profondo solco vallivo coincidente con una zona di frattura orientata NO-SE, e il conoide in loc. Ex-Fornaci e altri minori formatosi dalle pareti rocciose sovrastanti, interessate ed alimentate da una struttura cataclastica appartenente a un importante elemento strutturale allineato in direzione NE-SO. Tali cono detritici si sviluppano ad alto grado e mantellano la base di gran parte del versante. Essi sono prevalentemente costituiti da frammenti litoidi, principalmente dolomitici, di forma spigolosa e caratterizzati da diversa pezzatura, il tutto in matrice sabbiosa debolmente limosa. I frammenti litoidi hanno dimensioni mediamente variabili da 3-4 cm a 15-20 cm, nel deposito sono poi presenti anche blocchi di lato decimetrico (40-50 cm) e/o massi superiori al metro.

Il terzo accumulo è l'imponente falda detritica, in corrispondenza della Concessione Stradasfalti, dove l'accumulo è organizzato ai piedi di una estesa parete in cui gli effetti residui di un distacco colossale hanno dato luogo progressivamente ad un accumulo di materiale la cui distribuzione è guidata dall'andamento del substrato roccioso sottostante, il quale localmente descrive dei terrazzi morfologici a bassa inclinazione degradanti verso il fondovalle. Le pezzature dei materiali, prevalentemente granulari a grossi blocchi, presentano delle variazioni locali più o meno classate in particolare in corrispondenza del conoide del Maso Nuovo, frutto di un certo trasporto alluvionale-torrentizio a discapito di quello prettamente gravitativi degli altri depositi costituenti l'area.

Nella porzione più meridionale dell'area di cava pubblica, nonché lungo il margine orientale della variante n. 3 e nell'area a monte della stessa, è stata rilevata la presenza di un complesso litostratigrafico costituito da depositi di limi di lavorazione, in giacitura diretta sopra i depositi di falda detritica precedentemente descritti. L'area ubicata a monte della variante n. 3 (cfr. foto 2. 12) evidenzia una configurazione stratigrafica organizzata su due livelli morfologicamente distinti: un livello superiore, in posizione suborizzontale, composto da materiali coesivi (limi di lavorazione) in adiacenza diretta alle pareti rocciose, con spessori dell'ordine di 30÷40 m; e un livello inferiore, anch'esso a morfologia suborizzontale, costituito da depositi granulari sciolti con spessori analoghi (30÷40 m), interpretabili come sedimenti di falda detritica.

Emblematico è la morfologia della parete, la quale presenta una parte centrale più chiara che mostra i segni del collasso (strappi) della matrice rocciosa per superamento della resistenza a taglio/trazione, mentre le facce più scure laterali ad essa presentano forme più articolate connesse alle testate dei piani di clivaggio a grande scala che determinano una fascia d'ammasso a più bassa resistenza. La formazione di tali partner fessurativi, paralleli alle pareti verticali, appaiono correlati allo stress da decompressione glaciale con forte compressione della resistenza a trazione disponibile, più che a quello tettonico; dinamiche ampiamente trattate negli studi di propagazione degli stati di tensioni su pareti naturali presenti in letteratura³.

³ Analisi e propagazione degli stati di tensioni su pareti naturali presenti in letteratura (Eberhardt, Stead e Coggan 2003).



Foto 2.11: detriti di falda in corrispondenza della Concessione Stradasfalti, tali depositi si rilevano nella porzione nord della variante n°3.

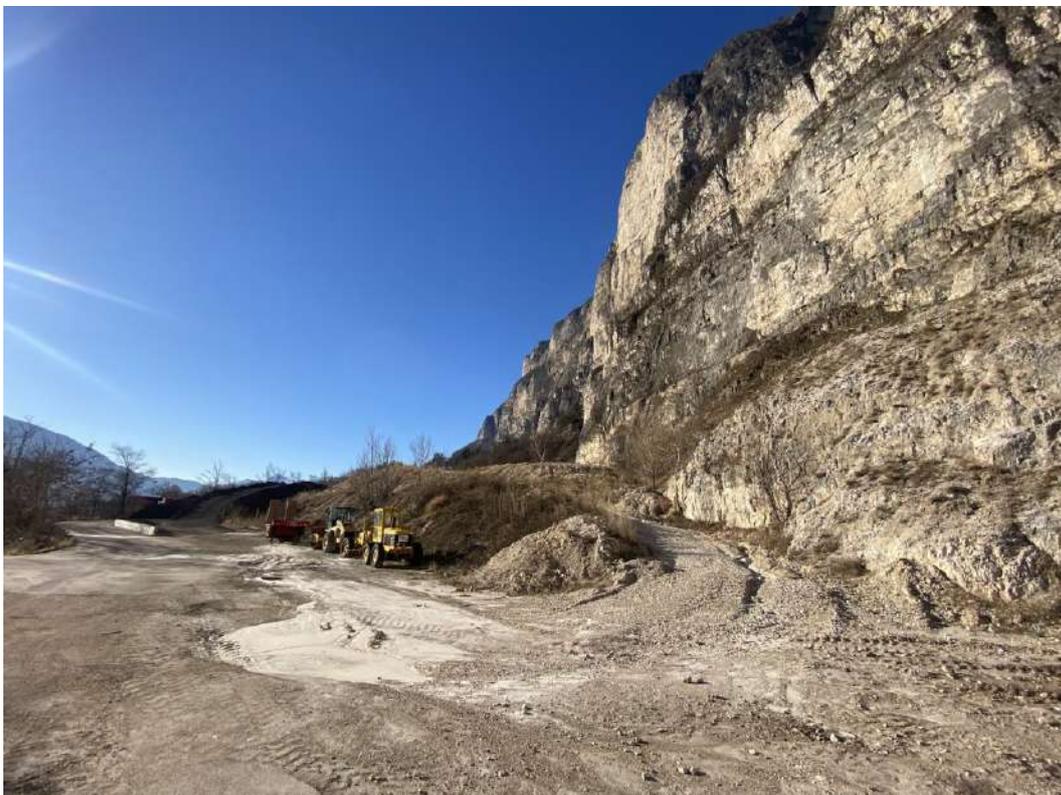


Foto 2.12: vista del pendio (area cava) a monte della variante n°3.

2.7. ASPETTI CLIMATICI LOCALI

La caduta massi è un tipico problema dovuto ad influenze interne ed esterne al pendio interessato, insieme all'azione della gravità. I fattori esterni sono l'alterazione chimica superficiale delle rocce, le variazioni di temperatura, il gelo, lo scorrimento superficiale dell'acqua, l'azione del vento, l'erosione al piede del pendio e la pressione esercitata dalle radici delle piante. I fattori interni sono legati agli sforzi residui della roccia di tipo geologico, alle fratture presenti, alle discontinuità. Da tenere particolarmente in considerazione l'azione dell'acqua ed i cicli di gelo e disgelo: la massima frequenza di caduta di massi avviene infatti nei periodi di elevate precipitazioni e quando le temperature oscillano intorno ai 0° C. In particolare, dall'analisi dei dati resi disponibili dall'archivio storico di Meteotrentino si evince come durante il periodo invernale (indicativamente da dicembre a marzo) vi siano delle continue oscillazioni della temperatura prossime ai 0° C., alternate a una serie di precipitazioni anche consistenti in termini di intensità e durata. Si è dunque deciso di analizzare i dati climatici relativi ai periodi invernali, in cui si sono registrati i crolli riportati dalle testimonianze degli operatori di cava e riscontrate durante i sopralluoghi di campo, al fine di individuare una correlazione sistematica tra l'aumento della frequenza e/o l'aumento dei fattori predisponenti al fenomeno da crollo e le temperature climatiche in questo periodo. A tal proposito si riportano di seguito i dati della stazione meteo ritenuta significativa per l'area d'indagine in termini di posizione, altitudine e orientazione della valle. La stazione di interesse è la stazione T0408 Mezzolombardo (Maso Delle Part), della quale si riportano i seguenti dati:

Stazione: T0408
Tavoletta n.: 32 060020
Coordinate Est/Nord: 662399/5117007
Latitudine: 46°11'14.2" N
Longitudine: 11°06'16.0" E
Note: ATTIVA - TP - Stazione presso sito IASMA

I grafici analizzati e riportati in seguito mostrano come a partire dalla metà di dicembre fino alla fine di marzo e inizio aprile vi sia un progressivo calo delle temperature con continue oscillazioni nei dintorni dei 0° C. Le temperature poi si innalzano e non presentano significativi oscillazioni nei pressi dei 0°C. Viste le condizioni generali di forte fessurazione della parete rocciosa con aperture da pochi mm a centimetriche che isolano volumi rocciosi instabili, vista la presenza localmente di materiale marnoso nelle fratture e di un elevato contenuto d'acqua (prossimo alla saturazione in corrispondenza di alcune venute e percolazione dall'alto stratigrafico) e/o condizioni di umidità, vi è una netta correlazione tra l'aumento delle portabilità da crollo e le condizioni climatiche in essere durante il periodo invernale. Tale fenomeno detto Crioclastismo è il processo di disgregazione meccanica di una roccia causato dalla pressione provocata dall'aumento di volume dell'acqua contenuta entro le fessure rocciose quando questa ghiaccia. Con il ciclo climatico di gelo-disgelo, la roccia, prima compatta, si disgrega in un detrito ghiaioso con spigoli vivi, questo processo è tipico delle zone in cui vi sono escursioni termiche attorno agli 0°C che continuamente inducono cambi di stato fisico all'acqua presente. Infatti, quando l'acqua congelando diventa ghiaccio, il suo volume aumenta del 9%. In circostanze particolari, questa espansione è capace di spostare o fratturare rocce. Ad una temperatura di -22 °C, si sa che lo sviluppo di ghiaccio è in grado di generare pressioni fino a più di 207 MPa, più che sufficiente per fratturare qualsiasi tipo di roccia. Il crioclastismo può agire su una scala temporale piuttosto estesa, che va da minuti ad anni, così come può riguardare sia il distacco di granuli minerali che la fratturazione dei massi ed è principalmente

guidato dalla frequenza e dall'intensità dei cicli gelo-disgelo e dalle proprietà dei materiali soggetti all'erosione. Va ricordato come non sempre il crioclastismo causato dall'espansione volumetrica è dovuta alla pressione dell'acqua congelata; Qualche volta è anche causato da tensioni che si manifestano nell'acqua non congelata. Quando lo sviluppo del ghiaccio provoca tensioni nell'acqua contenuta nel poro causando la rottura della roccia, il risultato è chiamato idrofrattura. L'idrofratturazione è favorita da grandi pori interconnessi o da grandi gradienti idraulici nella roccia. Se al contrario i pori sono piccoli, un raffreddamento molto veloce nelle parti della roccia può espellere l'acqua, e se questa viene espulsa più veloce di quanto possa migrare, la pressione può aumentare, fratturando la roccia. Si evidenzia come per l'area di studio vi sia un notevole aumento della frequenza dei crolli durante il periodo compreso tra dicembre e fine marzo – metà aprile in funzione della cosiddetta “coda” dell'inverno. La stessa esposizione del versante, principalmente a SE, favorisce il rapido innalzamento e abbassamento delle temperature per effetto della esposizione diretta alla luce solare. Tale effetto è testimoniato anche dalle differenti dinamiche tra i due versanti della valle per il tratto in esame.

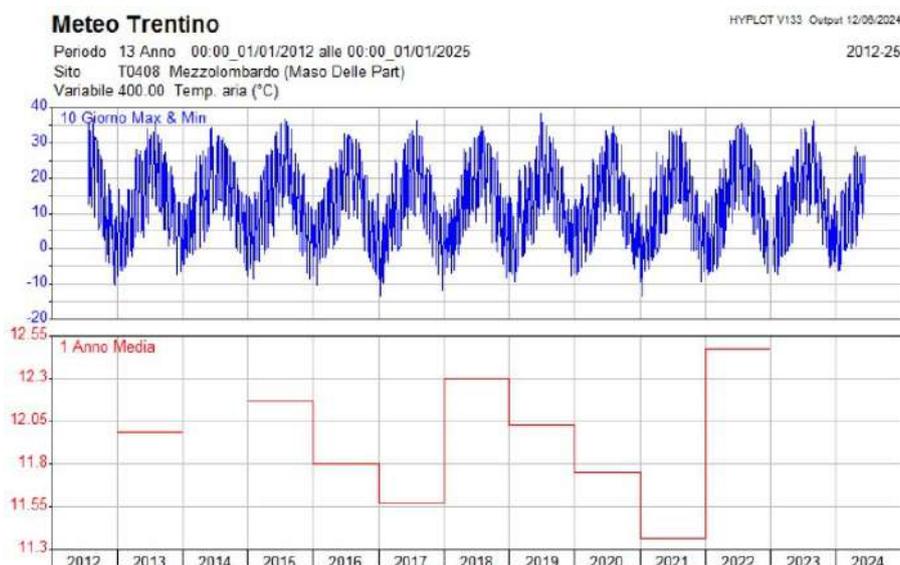


Fig. 2.13: andamento delle temperature aria (gradi Celsius) da 01/01/2012 a 01/01/2025 per la stazione di T0408 Mezzolombardo (Maso Delle Part).

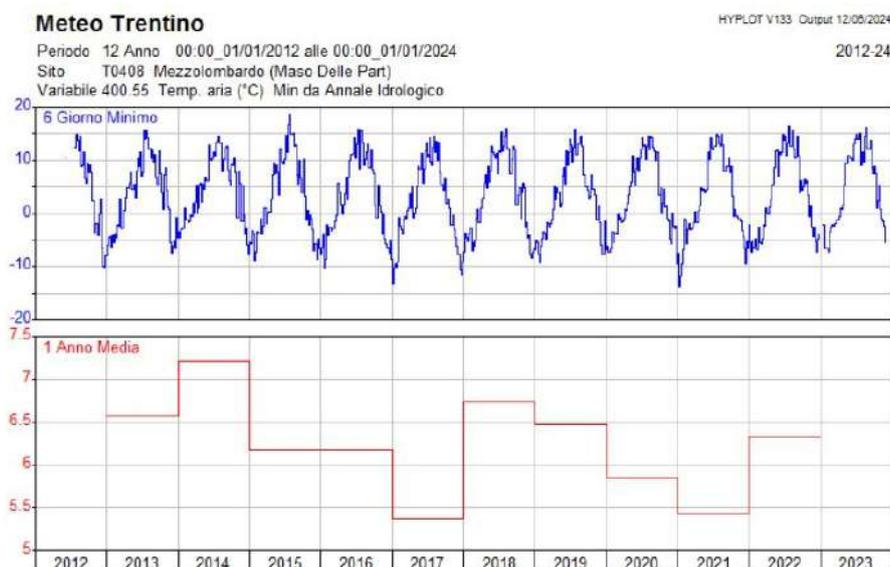


Fig. 2.14: andamento delle temperature Min (gradi Celsius) da 01/01/2012 a 01/01/2024.



Fig. 2.15: andamento delle temperature Max (gradi Celsius) da 01/01/2012 a 01/01/2024.

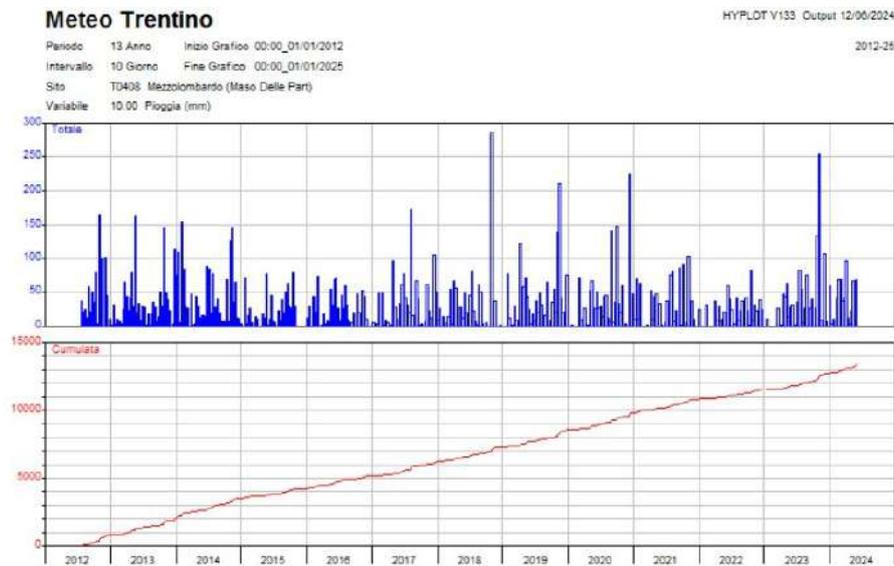


Fig. 2.16: andamento piogge (mm) da 01/01/2012 a 01/01/2025.

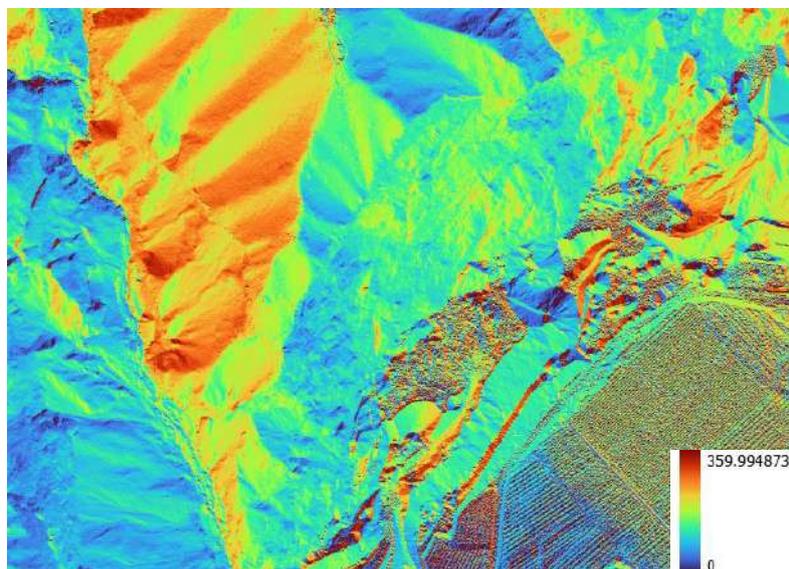


Fig. 2.17: esposizione in gradi (°) della parete rocciosa ottenuta dall'analisi del Lidar PAT 2014.

2.8. ASPETTI MACRO E MESO STRUTTURALI PARETE ROCCIOSA AREA CAVE

Di seguito si riportano anche le considerazioni sviluppate nell'ambito della progettazione del futuro Piano Cave, il quale interessa anche una porzione della parete rocciosa sovrastante la variante n. 3. Tali valutazioni risultano pertanto funzionali a una più approfondita comprensione delle condizioni geomeccaniche del versante, le cui caratteristiche sono estendibili anche alla porzione più meridionale della parete rocciosa sottesa alla medesima variante n. 3. Le spinte di origine tettonica creano all'interno dell'ammasso roccioso una serie di fratture, raggruppate in famiglie per omogeneità di orientamento, che possono portare all'isolamento di volumi rocciosi unitari la cui dimensione è proporzionale alla spaziatura delle fratture stesse. Il settore in esame è dominato dalla presenza di sistemi sub-verticali condizionati dal regime trascorrente caratteristico dell'area. La fascia alta della parete, verticale e caratterizzata dalla presenza di marcati aggetti impostati lungo i piani di strato è rappresentata dalle dolomie stromatolitiche chiare, dalle dolomicriti grigio scure all'apice e dalle doloareniti oolitiche della Formazione della Dolomia Principale (DPR). La base presenta una inclinazione media minore rispetto alla parte alta e alterna fasce verticali ad avancorpi variamente articolati è costituita dalle dolomie stromatolitiche grigio chiare e scure in banchi metrici appartenenti alla Formazione dello Sciliar (SCI). Le caratteristiche del litotipo unite alle modalità di orientazione di tali piani in relazione al fronte della parete determinano le condizioni di innesto per il distacco di una porzione rocciosa. Giunti subverticali, relitto delle spinte tettoniche che hanno deformato l'area isolano porzioni rocciose, spesso lastriformi, in precaria condizione di stabilità. Il rilievo geostrutturale è stato ottenuto analizzando la nuvola di punti 3D con Cloud Compare utilizzando l'algoritmo Compass2.0⁴. Dalla misurazione dei principali piani rilevati, circa 1100, viene elaborata la proiezione stereografica riportata nella figura 2.18.

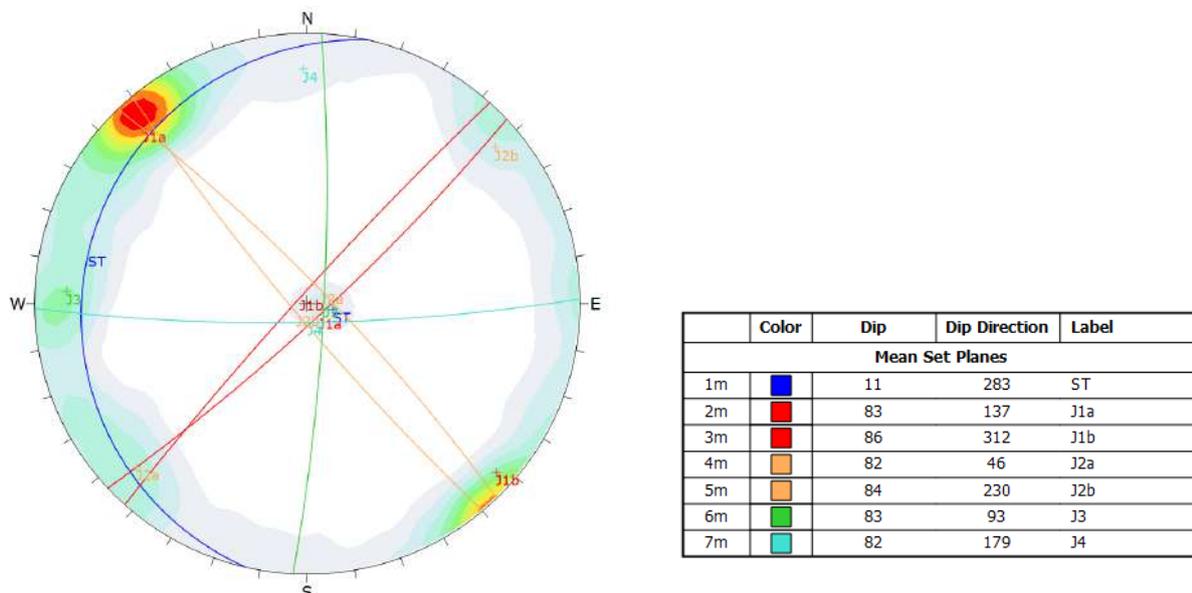


Fig. 2.18: orientazione dei principali sistemi di discontinuità.

⁴ Thiele, S. T., Grose, L., Samsu, A., Micklethwaite, S., Vollgger, S. A., and Cruden, A. R.: Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data, *Solid Earth Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/se-2017-83>, in review, 2017

In forma sintetica l'orientazione dei 4 principali sistemi sub verticali rappresentata sulla nuvola di punti 3D è riportata nella Figura 2.19, nella Figura 2.20, nella Figura 2.21 e nella Figura 2.22. Tali figure rappresentano le porzioni sottese all'intera area di cava pubblica la porzione a sinistra il tratto più settentrionale della variante° 3. Il capitolo seguente riporta la sintesi dei dati geomeccanici costituita dai prospetti dei principali sistemi individuati a cui si aggiungono delle immagini della nuvola di punti elaborata dove, al dato RGB della nuvola stessa, si sovrappongono le porzioni di nuvola di punti appartenenti a ciascun sistema individuato mantenendo il colore associato a ciascun sistema nella proiezione stereografica (fig. 2.18), ad esempio al sistema color rosso nella proiezione stereografica corrisponde a porzioni di nuvola di punti colorata in rosso.



Fig. 2.19: rappresentazione famiglie J1a/J1b.



Fig. 2.20: rappresentazione famiglie J2a/J2b.



Fig. 2.21: rappresentazione famiglia J3.



Fig. 2.22: rappresentazione famiglia J4.

In base alla morfologia vengono individuate quattro zone che mantengono una analogia dal punto di vista strutturale ma risultano utili per fornire una rappresentazione del condizionamento dei vari sistemi della morfologia della parete. La zona A identifica l'avancorpo sud che delimita la parete, la zona B corrisponde alla parete principale e le zone C e D sono rappresentative dei due avancorpi rispettivamente in destra e sinistra del rio che incide la parete principale. Nell'Allegato A si riportano vari prospetti del settore in esame, e precisamente i prospetti A, B, C e D, sui quali vengono indicati i principali sistemi di frattura individuati. Sempre nello stesso allegato si riportano varie immagini della nuvola di punti 3D e la relativa rappresentazione della disposizione dei principali sistemi individuati.

2.8.1. QUALITÀ AMMASSO ROCCIOSO (GSI)

Dall'analisi dei valori di spaziatura delle discontinuità vengono individuati i valori del grado di suddivisione dell'ammasso (J_v) ed il volume del blocco (V_b) e valutato la qualità dell'ammasso roccioso attraverso il Geological Strength Index (G.S.I.) di Hoek nella

formulazione di Cai et alii. Il grado di suddivisione dell'ammasso roccioso (J_v) che si lega alle dimensioni del blocco unitario (V_b) è definibile in base alla forma e alla tipologia dei blocchi che caratterizzano l'ammasso roccioso (fig. 2.23).

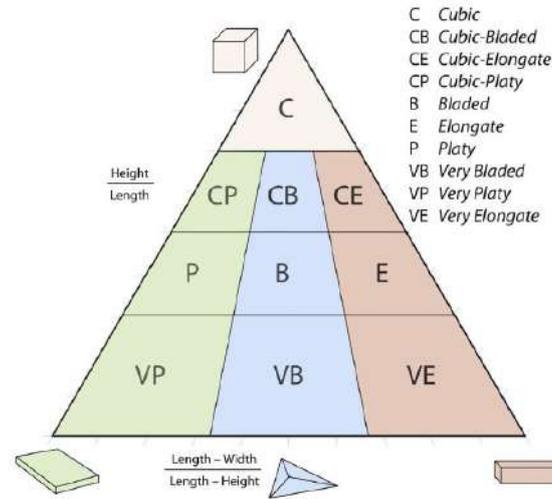


Fig. 2.23: diagramma della forma dei blocchi ^{5,6}.

Il volume unitario del blocco roccioso, V_b , è determinato dalla spaziatura e dall'orientazione dei giunti, dal numero di set di giunti e dalla persistenza degli stessi. Le dimensioni del volume unitario sono espressione della densità dei giunti e nel caso di almeno 3 giunti persistenti può essere calcolato con l'espressione di Palmstrom (2005) ⁷:

$$V_b = \frac{s_1 \cdot s_2 \cdot s_3}{\sin \cdot \gamma_1 \cdot \sin \cdot \gamma_2 \sin \cdot \gamma_3}$$

dove: s_i e γ_i sono rispettivamente la spaziatura tra i giunti e l'angolo tra i giunti stessi.

La qualità intrinseca dell'ammasso roccioso è valutata attraverso la determinazione del Geological Strength Index (G.S.I.) di Hoek. Vista la tipologia dello studio, al fine di consentire un'adeguata quantificazione dei parametri di ingresso del diagramma per la determinazione del G.S.I. si è seguito l'approccio di Cai et al. (2004)⁸. Nello specifico i parametri quantitativi d'ingresso per la determinazione del G.S.I. sono il Volume Unitario dei Blocchi rocciosi (V_b) ed il Joint Condition Factor (J_c); anche parametri base per la determinazione dell'indice RMI di Palmström. Il Joint Condition Factor (J_c) è definito dalla rugosità e dall'alterazione della superficie dei giunti e dal tipo di riempimento:

$$J_c = \frac{J_w \cdot J_s}{J_A}$$

dove: J_w è l'ondulazione ad ampia scala (in metri da 1 a 10 metri); J_s è la rugosità a piccola scala (in centimetri da 1 a 20 cm) e J_A è il fattore di alterazione del giunto.

⁵ SNEED, E.D. AND FOLK, R.L., 1958, Pebbles in the Lower Colorado River, Texas: a study in the particle morphogenesis: Journal of Geology, v. 66, p. 144-150.

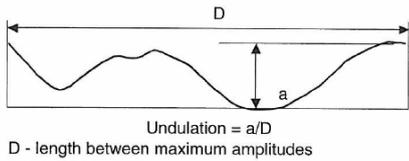
⁶ GRAHAM DJ, MIDGLEY NG (2000) Graphical representation of particle shape using triangular diagrams: an excel spreadsheet method. Earth Surf Proc Land 25:1473-1477.

⁷ PALMSTROM, ARILD. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). Tunnelling and Underground Space Technology. 20. 362-377. 10.1016/j.tust.2005.01.005.

⁸ CAI, M., KAISER, P. K., UNO, H., TASAKA, Y., MINAMI, M. (2004): Estimation of rock mass strength and deformation modulus of jointed hard rock masses using the GSI system. Int. J. RockMech. Min. Sci. 41(1), 3-19.

Nel complesso i volumi unitari assumono forme che variano da prismatiche a tabulari. Le forme dominanti dei blocchi variano da VP/P a VE/E. La spaziatura dei principali sistemi varia da decimetrica a metrica e la condiziona dei giunti varia da buona a scadente. Nel settore in esame sono identificate due zone, A e B; la zona A è rappresentativa delle fasce rocciose con ammasso fratturato e la zona B rappresentativa delle fasce molto fratturate che mediamente corrispondono a fasce fittamente stratificate e/o fasce con giunti ad alta persistenza.

Waviness terms	Undulation	Rating for waviness J_W
Interlocking (large-scale)		3
Stepped		2.5
Large undulation	> 3%	2
Small to moderate undulation	0.3–3%	1.5
Planar	< 0.3%	1



Undulation = a/D
D - length between maximum amplitudes

Tabella 1.1: termini per descrivere l'ondulazione ad ampia scala (J_W).

Smoothness terms	Description	Rating for smoothness J_S
Very rough	Near vertical steps and ridges occur with interlocking effect on the joint surface	3
Rough	Some ridge and side-angle are evident; asperities are clearly visible; discontinuity surface feels very abrasive (rougher than sandpaper grade 30)	2
Slightly rough	Asperities on the discontinuity surfaces are distinguishable and can be felt (like sandpaper grade 30–300)	1.5
Smooth	Surface appear smooth and feels so to touch (smoother than sandpaper grade 300)	1
Polished	Visual evidence of polishing exists. This is often seen in coating of chlorite and specially talc	0.75
Slickensided	Polished and striated surface that results from sliding along a fault surface or other movement surface	0.6–1.5

Tabella 2.2: termini per descrivere la rugosità a piccola scala (J_S).

Term	Description	J_A	
Rock wall contact	<i>Clear joints</i>		
	Healed or "welded" joints (unweathered)	Softening, impermeable filling (quartz, epidote, etc.)	0.75
	Fresh rock walls (unweathered)	No coating or filling on joint surface, except for staining	1
	Alteration of joint wall: slightly to moderately weathered	The joint surface exhibits one class higher alteration than the rock	2
	Alteration of joint wall: highly weathered	The joint surface exhibits two classes higher alteration than the rock	4
	<i>Coating or thin filling</i>		
Filled joints with partial or no contact between the rock wall surfaces	Sand, silt, calcite, etc.	Coating of frictional material without clay	3
	Clay, chlorite, talc, etc.	Coating of softening and cohesive minerals	4
	Sand, silt, calcite, etc.	Filling of frictional material without clay	4
	Compacted clay materials	"Hard" filling of softening and cohesive materials	6
	Soft clay materials	Medium to low over-consolidation of filling	8
	Swelling clay materials	Filling material exhibits swelling properties	8–12

Tabella 2.3 Joint alteration factor (J_A).

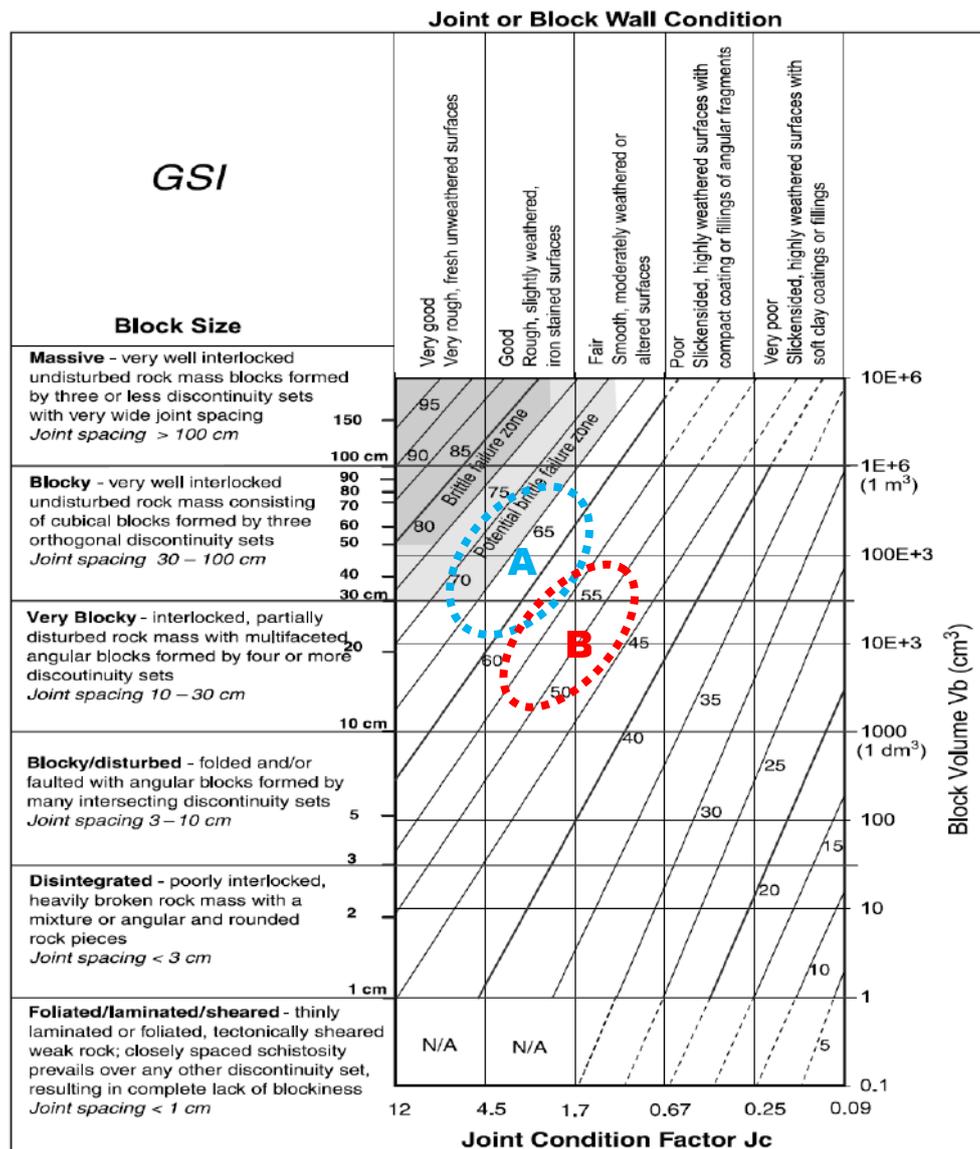
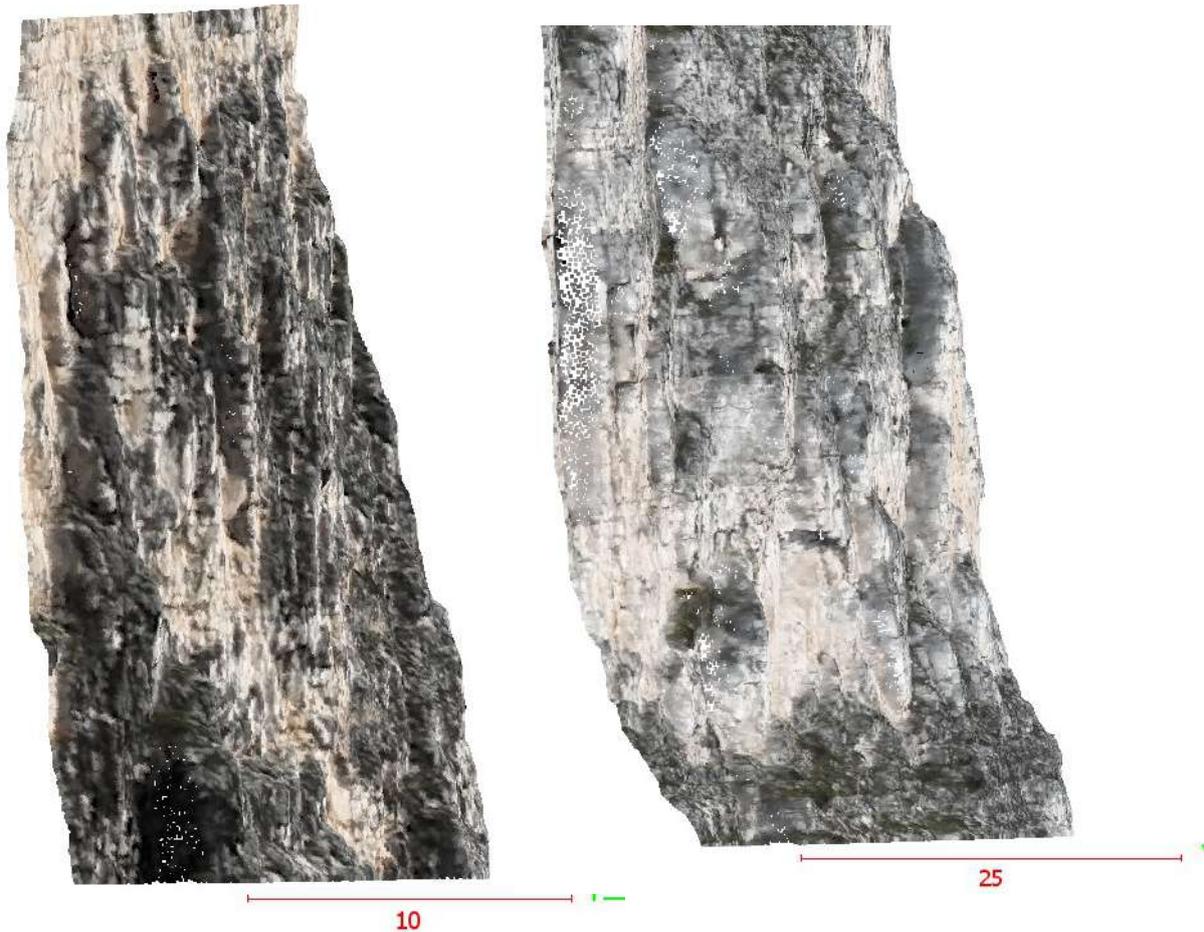


Fig. 2.24: classificazione ammasso roccioso: Geological Strength Index (GSI) - Cai M. & alii. (2004).

2.8.2. POSIZIONI CRITICHE

In linea generale lungo le pareti sottese al piano cave nonché alla porzione di parete sottesa alla varante numero 3, si riconoscono sostanzialmente tre diverse tipologie di instabilità, caratterizzate da differenti cinematismi possibili e da differenti geometrie dei volumi rocciosi. Esse si ripetono con una certa frequenza e distribuzione lungo l'intera parete rocciosa.

1) **Elementi lastriformi mobilizzabili per column collapse o column/block toppling**; solidi lastriformi di varie dimensioni definiti principalmente dai sistemi J1 e J2 e suddivisi in varia misura dai piani di strato e in misura minore dai sistemi J3 e J4. La rottura può avvenire per ribaltamento qualora la stratificazione particolarmente ravvicinata favorisca la rottura per compressione dei livelli di base ed il progressivo arretramento del profilo e/o per scivolamento lungo il piano di appoggio come evidenziato dall'analisi cinematica. È una tipologia diffusa in quanto condizionata dalla persistenza e dalla spaziatura dei giunti J1 e J2 che caratterizza l'intero settore in esame.



2) Volumi aggettanti mobilizzabili per rottura della porzione strapiombante (overhang failure); in questi casi orizzonti più competenti continui ed aggettanti sono isolati per successivo franamento delle porzioni fratturate e/o meno competenti sottostanti; i giunti di svincolo sono definiti dai sistemi subverticali che spesso sono associati ai sistemi J1 e J2 ed in misura minore dai sistemi J3 e J4. È una tipologia che generalmente è associata ai giunti di strato.



3) Conci mobilizzabili per scivolamento a cuneo (wedge slide), sono determinati dallo scivolamento di blocchi lungo la linea di intersezione tra due piani. I sistemi principali sono subverticali i cinematismi di scivolamento maggiormente frequenti sono relativi a porzioni aggettanti che scivolare/staccarsi lungo l'intersezione di piani subverticali.

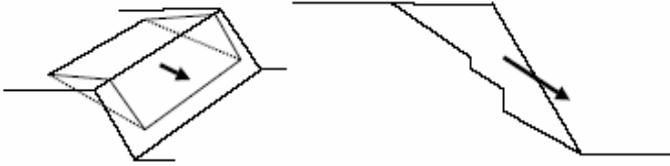
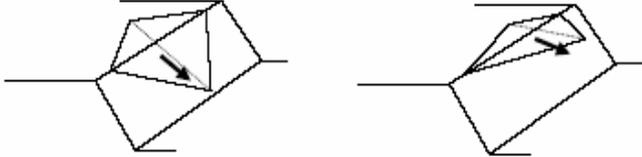
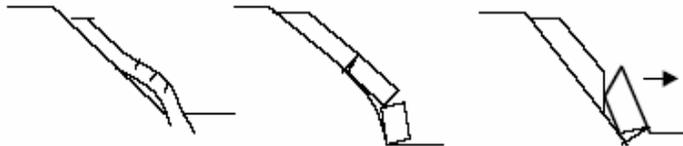
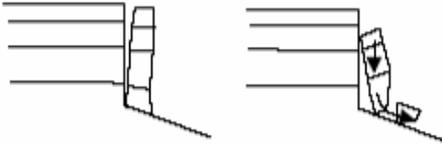
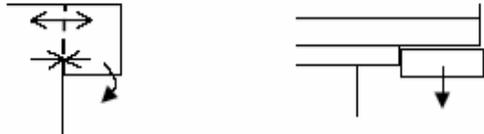
Configuration	Mechanism
	Plane slide
	Wedge or plane slide
	Rotational or multiblock slide
	Slab failure
	Column collapse
	Column or block toppling
	Overhang failure

Fig. 2.25: tipici meccanismi di collasso usati per identificare ammassi rocciosi potenzialmente instabili⁹.

La distribuzione dei principali volumi critici è riportata nella Fig. 2.26 per la zona A, nella fig. 2.27 per la zona B e nella fig. 2.28 per le zona C e D. In parete di riconoscono volumetrie potenzialmente critiche che superano ampiamente le decine di metri cubi.

⁹ D. Hantz, J. Vengeon, C. Dussauge-Peisser (2003) An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment - Natural Hazards and Earth System Sciences.

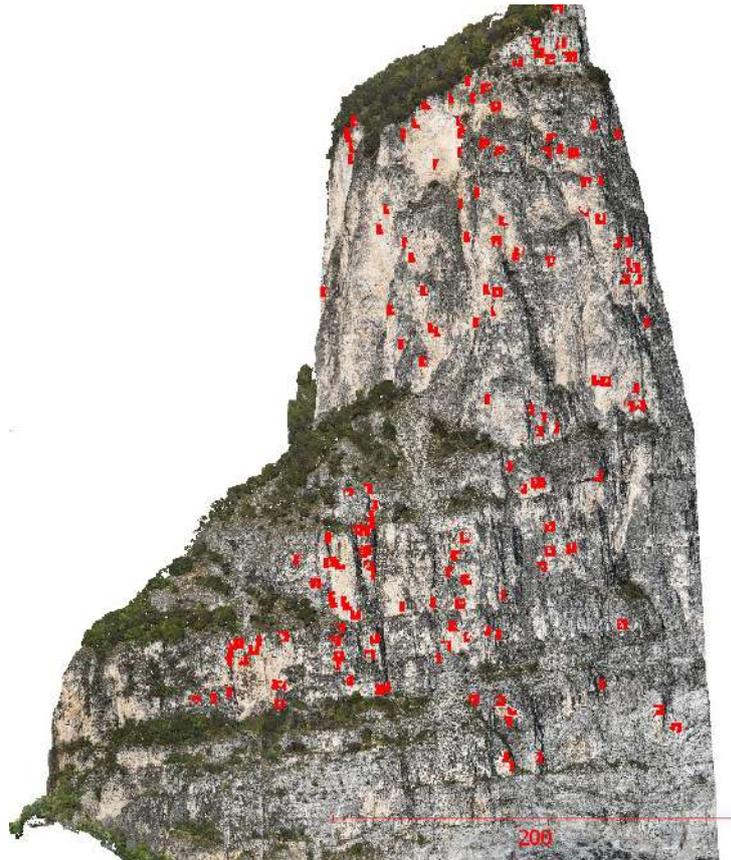


Fig.2.26: volumi potenzialmente critici zona A.

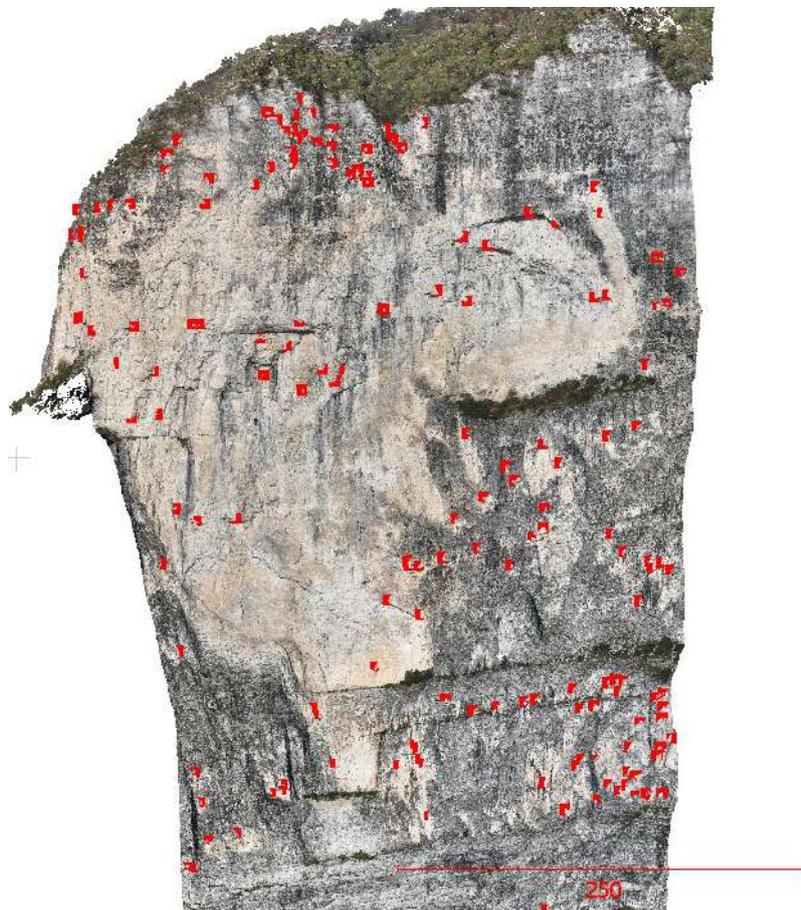


Fig. 2.27: volumi potenzialmente critici zona B.

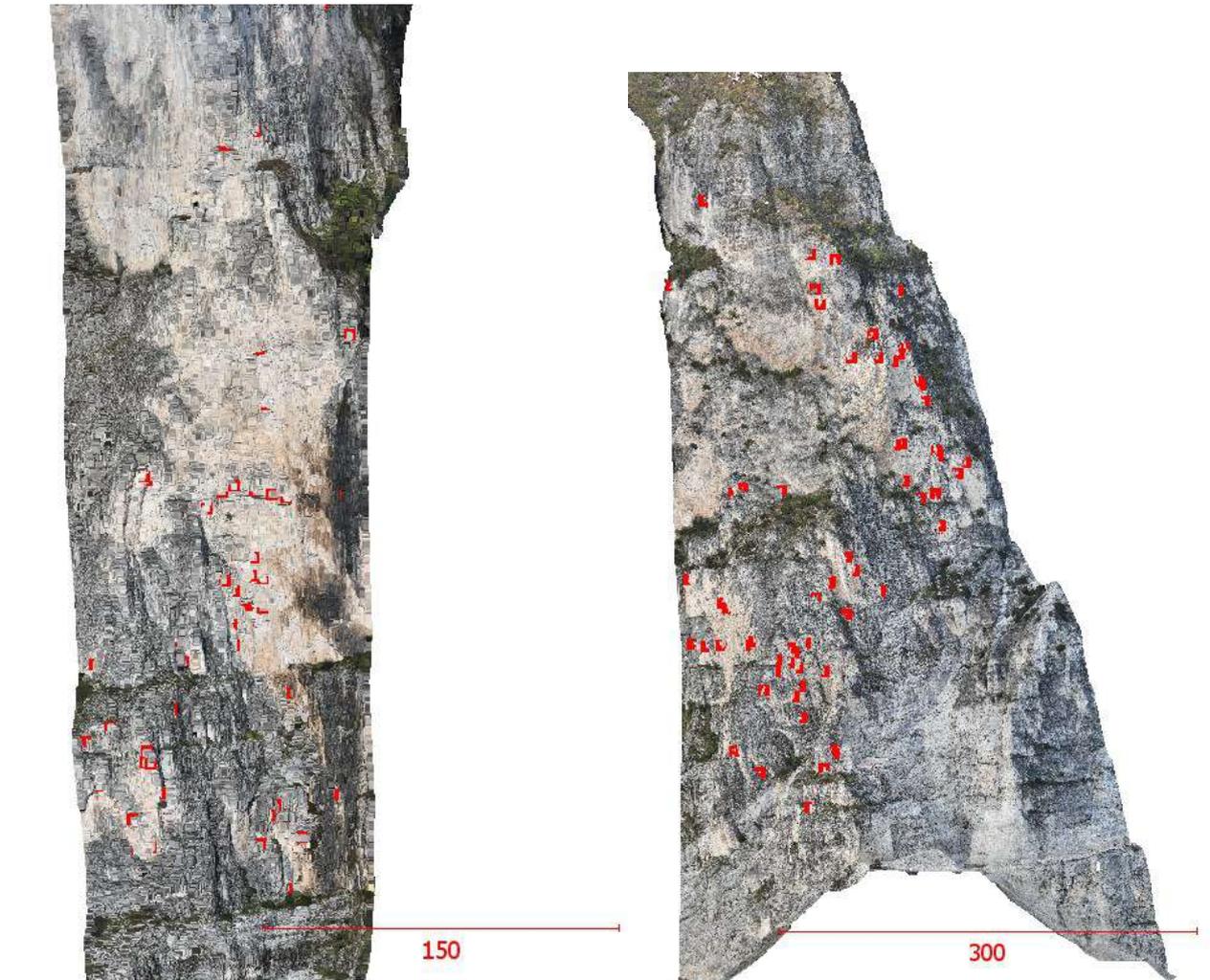


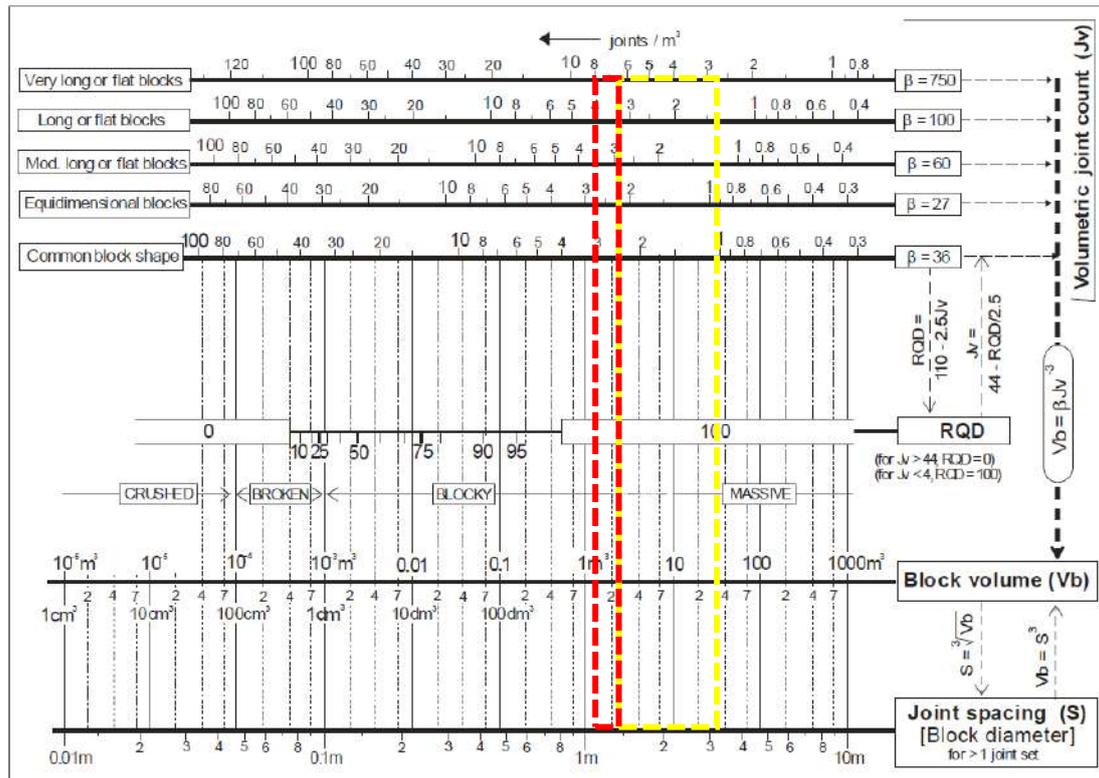
Fig. 2.28: volumi potenzialmente critici zona C(sx) e D(dx).

2.9. DEFINIZIONI VOLUMI UNITARI (VRU)

Nel sito in esame non ci sono dati sufficienti tali da costruire una curva che associ a ogni valore di volume una frequenza espressa in termini di numero cumulato di blocchi o di frequenza relativa cumulata, denominata in letteratura IBSD (InSitu Block Size Distribution). Nel caso specifico la definizione del volume del blocco di progetto passa attraverso la valutazione della spaziatura (s) dei principali sistemi individuati in parete e del grado di fratturazione dell'ammasso (J_v), l'utilizzo di tali tecniche tradizionali può essere applicate anche alla nuvola di punti tridimensionale ottenuta con tecniche aereofotogrammetriche.

Nel caso in esame le volumetrie maggiormente propense al distacco sono frequentemente comprese tra 2 e 10 m³ mentre sopra i 10 m³ si tratta di volumi costituiti da molteplici volumi unitari con grado di criticità variabile ovvero ad esempio volumi aggettanti di dimensioni considerevoli dove la fascia maggiormente critica corrisponde alla fascia di ciglio dell'aggetto ma l'intero aggetto è potenzialmente soggetto ad un deterioramento nel tempo delle condizioni di stabilità.

Nella tabella a seguire sono messi in relazione forma e dimensioni dei blocchi e frequenza delle discontinuità attraverso la quale è stato estratto il volume del blocco di progetto.



Tab. 2.4: relazione tra forma/dimensione dei blocchi e frequenza delle discontinuità¹⁰.

La valutazione delle dimensioni dei volumi in parete si confronta con la dimensione dei blocchi al piede della parete al fine di delineare curva volumi-frequenza nell'area di accumulo, indicata con l'acronimo RBSD (Rock Block Size Distribution). Nel caso specifico al piede della parete è presente una attività di coltivazione che non facilita una analisi critica degli effetti di tali crolli (fig. 2.29).

In base al grado di alterazione dei blocchi e dalle fratture rilevate si è cercato di discriminare quelli ascrivibili a crolli (mire blu e verdi grafico fig. 2.30) e i mega blocchi presenti nella matrice del deposito (mire rosse grafico fig.2.31). Dalle immagini e grafici seguenti si evince come su n°50 blocchi ascrivibili a crolli solo n°3 superino il metro cubo, per una media prossima a 0,2 m³. I mega blocchi nella matrice mostrano una volumetria nettamente maggiore prossima a 1,89 m³. In seguito, si riportano gli istogrammi inerenti ai volumi dei blocchi differenziando prima quelli ascrivibili a crolli e successivamente mettendo a confronto le volumetrie di quest'ultimi con quelli dei mega blocchi presenti nella matrice.

Come ricordato in precedenza le attività di coltivazione ai piedi delle pareti a seguito delle continue movimentazioni possono avere alterato significativamente tale dato. Nel complesso si osserva come le volumetrie più frequenti ascrivibili a crolli hanno una dimensione prossima ai 0,2 m³ e si collocano a ridosso della parete rocciosa con una frequenza maggiore nei primi 30-40 metri dal piede della stessa. Dato questo che si riflette con le simulazioni di scoscendimento massi 2D e 3D riportate in seguito.

In linea generale si rileva una frammentazione dei blocchi nelle fasi di rimbalzo e rotolamento lungo il pendio tanto che al piede della parete non si rilevano blocchi con dimensioni superiori ai 2 m³ e pertanto si ritiene rappresentativo un volume del blocco di progetto VRU pari a 2 m³ al quale verranno applicate delle variazioni volumetriche cautelative nelle seguenti modellazioni 2D-3D.

¹⁰ Palmström A. (2001) - Measurement and characterization of rock mass jointing. In "In-situ characterization of rocks". Sharma V.M. and Saxena K.R. eds., A.A. Balkema, pp. 49-97.

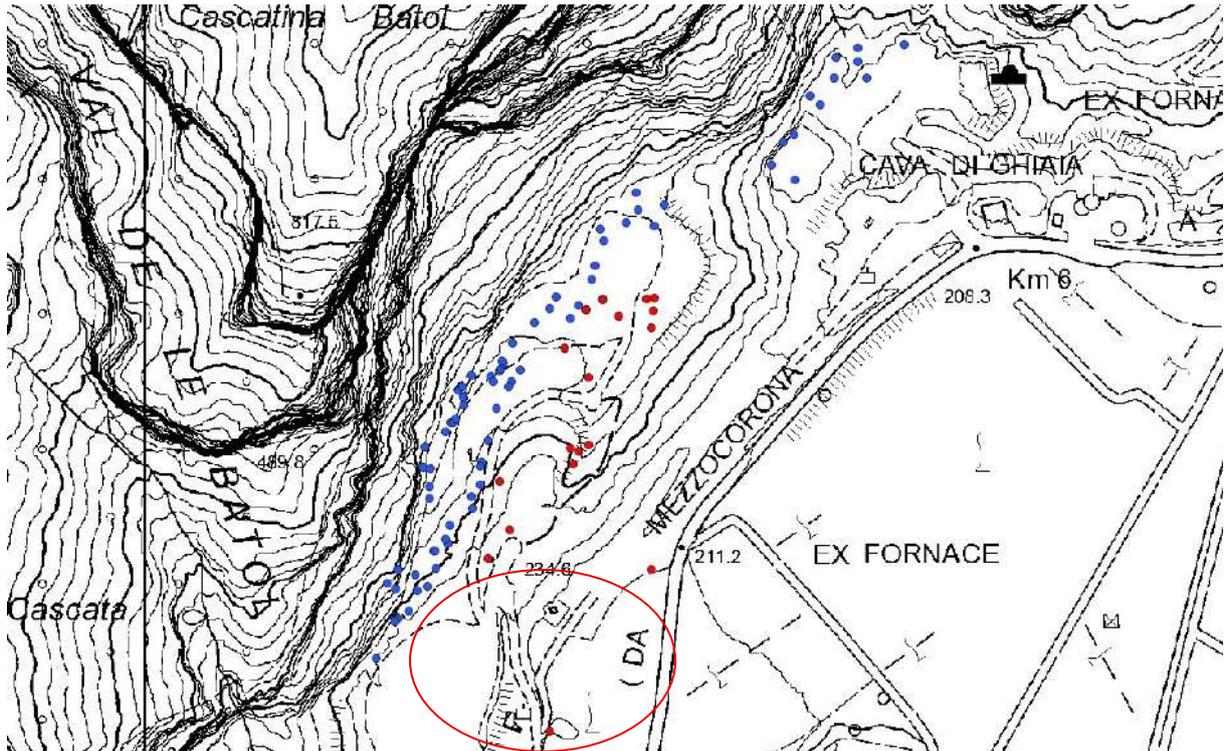


Fig. 2.29: massi rilevati ai piedi delle pareti rocciose dell'area cava; in blu quelli potenzialmente ascrivibili a crolli, in rosso i mega blocchi nella matrice del giacimento oggetto di coltivazione. Si osserva come i blocchi ascrivibili a crolli si arrestino ai piedi della parete rocciosa anche a monte dell'area di variante n°3 (poligono rosso).

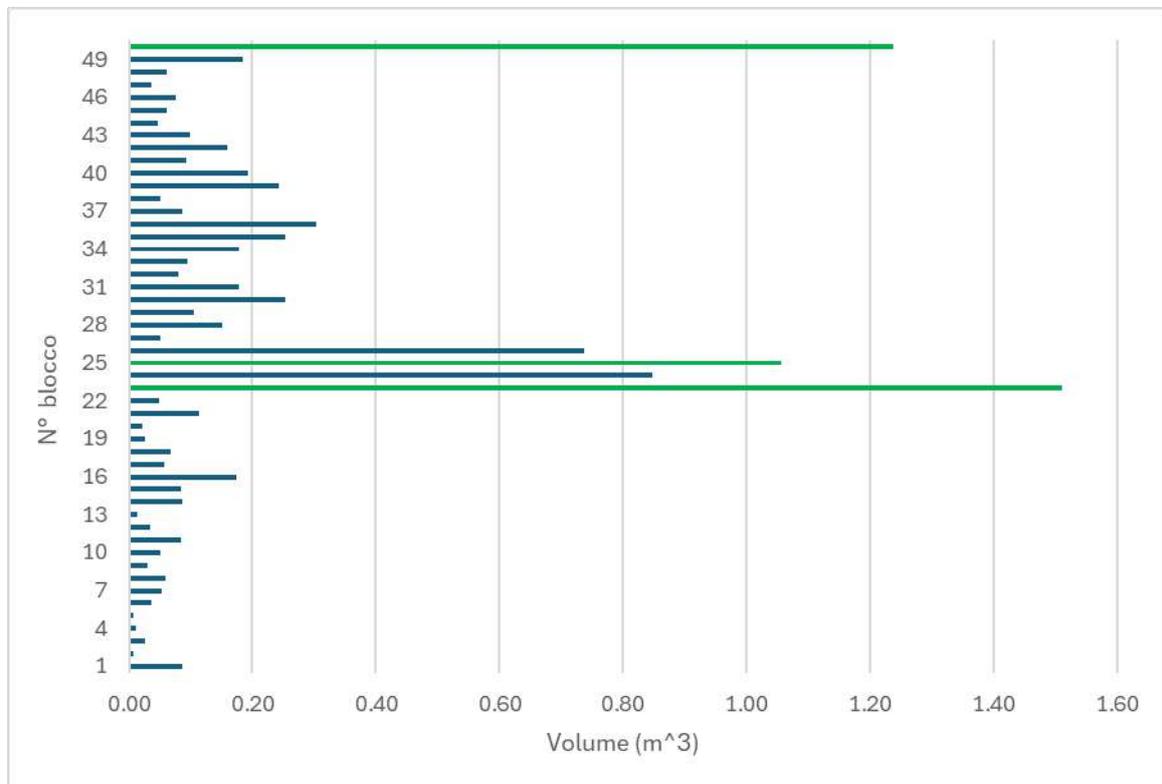


Fig. 2.30: volumi blocchi potenzialmente ascrivibili a crolli: in verde le volumetrie > 1 m³.

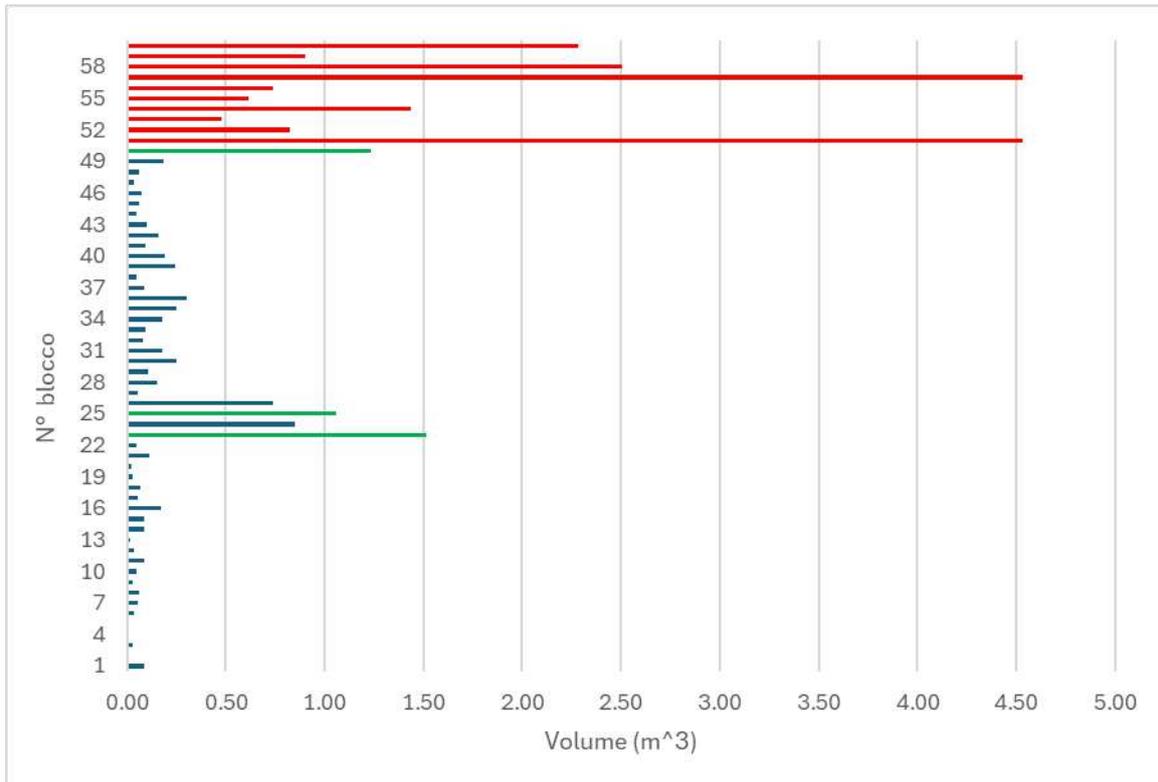


Fig. 2.31: volumi blocchi potenzialmente ascrivibili a crolli a confronto con mega blocchi nella matrice del giacimento oggetto di coltivazione.

2.10. VERIFICA SCOSCENDIMENTO MASSI

Al fine di limitare, per quanto possibile, le problematiche legate all'incertezza del fenomeno si sono effettuate delle simulazioni probabilistiche ed analisi statistiche in grado di meglio adattarsi all'incertezza del fenomeno stesso.

L'approccio tridimensionale consente di valutare, per una data zona sorgente, il grado di dispersione delle traiettorie lungo il versante in oggetto, evidenziando in modo più chiaro la massima distanza di espansione e le fasce entro cui tendono a convogliarsi i percorsi di caduta.

Il codice di calcolo utilizzato è: **RocPro3D**: software intuitivo e integrato che supporta la maggior parte dei passaggi necessari per la modellazione stocastica tridimensionale di traiettorie di caduta massi. Si tratta di un'evoluzione del suo predecessore, il software PiR3D (Cottaz et al., 2010¹¹), che nel 2013 ha integrato un approccio ibrido lumped-mass.

Si riportano di seguito le valutazioni tecniche derivanti dalle modellazioni 3D effettuate sull'intera parete rocciosa sottesa al piano cave di iniziativa pubblica attualmente in fase di progettazione dallo scrivente. Si evidenzia che il settore meridionale di tale parete coincide in parte con il settore centro-settentrionale della parete rocciosa sottesa all'area di variante n°3. Le analisi condotte sono finalizzate alla caratterizzazione geomorfologica e strutturale del versante, con particolare riferimento alla valutazione della pericolosità da caduta massi, mediante simulazioni numeriche utili alla definizione delle opere di mitigazione necessarie.

¹¹ Cottaz Y., Barnichon J.D., Badertscher N., Gainon F. (2010). PiR3D, an effective and user-friendly 3D rockfall simulation software: formulation and case-study application. In Rock Slope Stability Symposium, Paris.

2.10.1. SIMULAZIONE DI CADUT MASSI 3D – ROCPRO3D

L'utilizzo di RocPro3D comprende sei fasi principali, sintetizzate nella seguente figura 2.32. Il codice consente di scegliere le equazioni traiettometriche dei blocchi nella formulazione lumped-mass o ibrida.

Con la formulazione lumped-mass (LM), il blocco è strettamente assimilato a un punto materiale, che viene utilizzato per calcolare le interazioni geometriche (posizione d'impatto, scorrimento) con il terreno. In termini di cinematica, il blocco è quindi soggetto solo a traslazione, senza alcuna rotazione.

Con la formulazione ibrida (LM-R, per Lumped-Mass - Rotation), il blocco è assimilato strettamente a un punto materiale per calcolare le interazioni geometriche (posizione di impatto, scorrimento) con il terreno. Tuttavia, in termini di cinematica, è soggetto a una rotazione (oltre che a una traslazione) perché ha esplicitamente una massa, una forma e una dimensione (diametro).

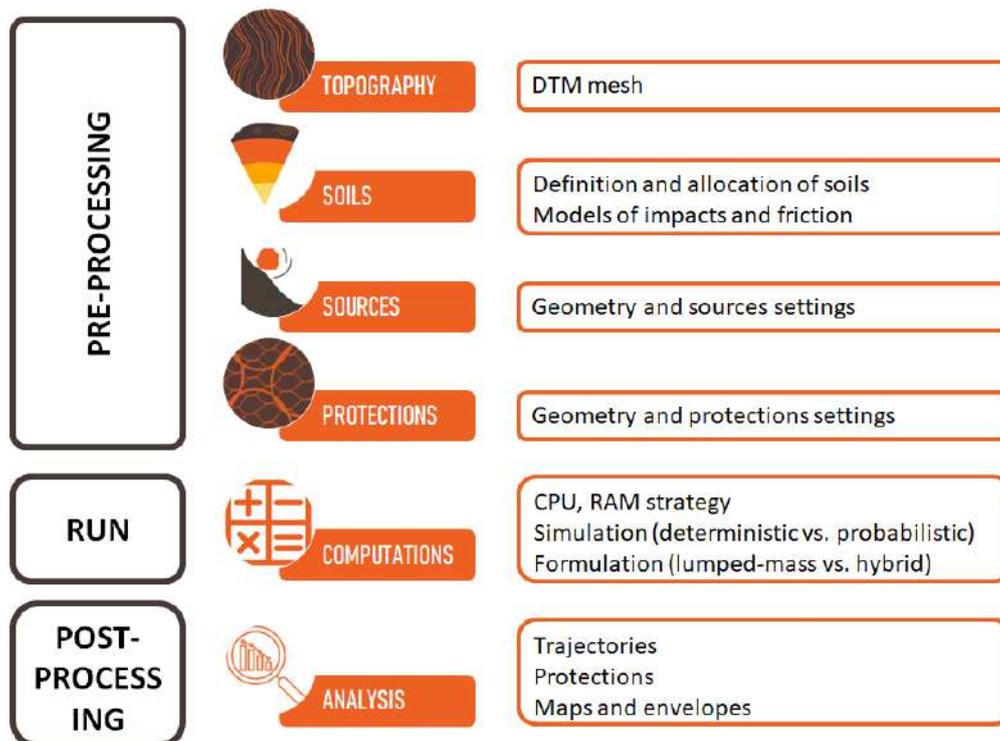


Fig. 2.32: stages nell'utilizzo di RocPro3D.

2.10.2. DATI INGRESSO DI CADUTA MASSI 3D – ROCPRO3D

SCENARI

Viene valutata l'intensità del fenomeno utilizzando come base il dtm estratto dal rilievo Lidar 2014.

TOPOGRAFIA

Viene utilizzato il dtm estratto dal rilievo Lidar 2014 della PAT con maglia di 1x1 metri.

TIPOLOGIA DI SUOLI

La distribuzione della tipologia di suoli è riportata nell'immagine seguente (in allegato le simulazioni riportanti le immagini della distruzione dei suoli lungo il versante):

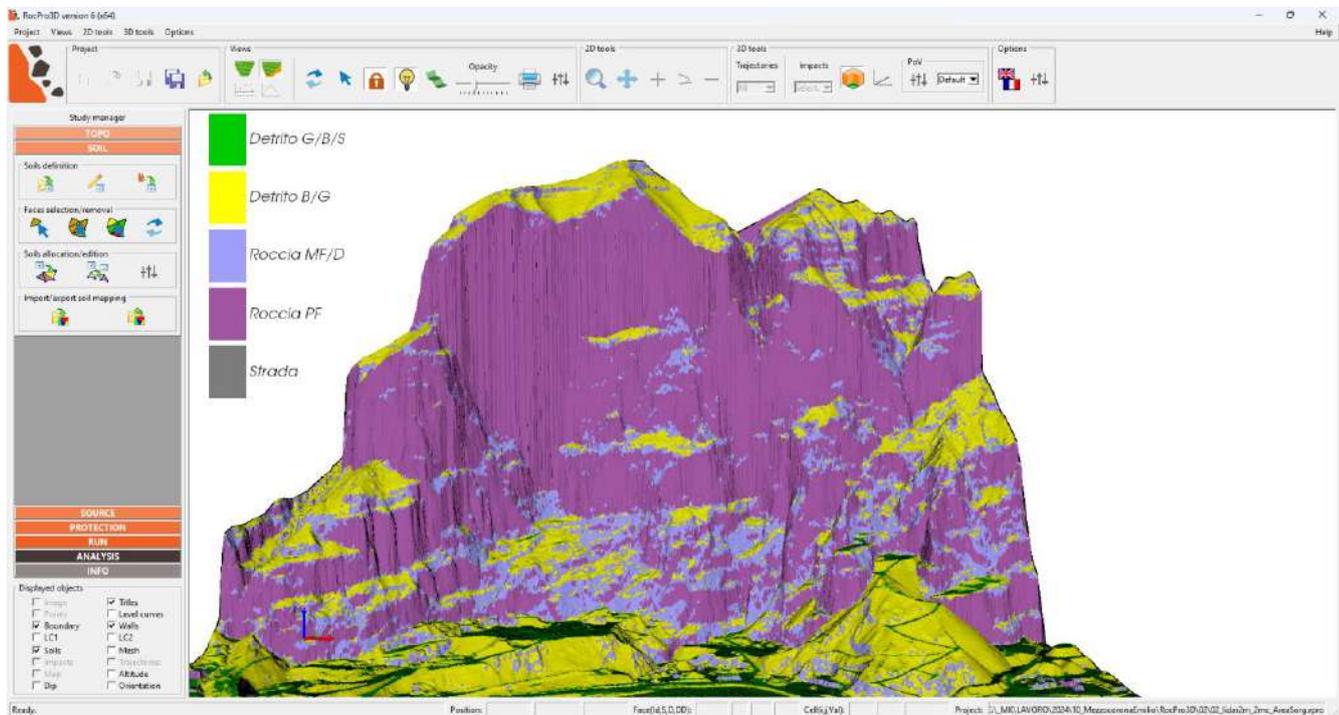


Fig. 2.33: distribuzione tipologia di materiale lungo l'area di studio.

I parametri geomeccanici delle tipologie di suolo utilizzate sono riportate nella seguente tabella:

Suolo	Rn	Rt	s_R	Rn(Vn)	m_k	b_lim	b_lim'
Detrito G/B/S	0.30	0.80	0.0048	10	0.9	2	30
Detrito B/G	0.31	0.81	0.016	10	0.9	2	30
Roccia MF/D	0.36	0.87	0.0125	10	0.75	1	25
Roccia PF	0.4	0.9	0.011	20	0.55	1	20

Tabella 2 Parametri geomeccanici delle differenti unità geologiche: coefficiente di restituzione normale (Rn), coefficiente di restituzione tangenziale (Rt), Deviazione standard (s_R), Modello di dissipazione dell'energia Rn (Vn), Parametri di rotolamento – Coefficiente di attrito m_k; Transizione free-fall - sliding/rolling angolo acuto (b_lim) e angolo ottuso (b_lim').

SORGENTE

Le caratteristiche del blocco di progetto sono riportate nella tabella seguente:

	Forma	Diametro (m)	Densità (kg/m ³)	Volume medio (m ³)	Variazione (Dm)	Volume min	Volume max	Peso min (kg)	Peso max (kg)
Blocco di progetto	Sfera	1.6	2600	2.145	50	1.072	3.217	2788	8364

Individuate le aree maggiormente critiche vengono lanciati **n°500 massi/m** con una **variazione percentuale del volume del masso** dello 50%. La velocità iniziale del blocco è di 0.5 m/s con una variazione del 10%. L'**altezza di caduta iniziale** è pari 0,0 metri.

Nel caso in esame, considerata la morfologia della parete, sono state scelte delle sorgenti lineari poste lungo il ciglio dei settori verticali principali.

OPERE DI PROTEZIONE

In questa fase vengono ubicate delle tracce poste a multipli di 25 metri dalla parete.

CALCOLO

Viene utilizzata la **formulazione ibrida (LM-R, per Lumped-Mass - Rotation)** con un approccio probabilistico per i parametri fisici del suolo. Il punto di riferimento per l'altezza delle traiettorie è il centro della sfera.

2.10.3. SINTESI RISULTATI MODELLAZIONE 3D

Di seguito si riportano le immagini relative alle modellazioni di caduta massi 3D dell'intera area del piano cava in fase di progettazione. **Si evidenzia che la porzione più settentrionale della parete rocciosa sottesa all'area di variante n. 3 coincide fisicamente con il settore meridionale dell'intera parete oggetto di modellazione tridimensionale nell'ambito del piano cave di iniziativa pubblica. Tale sovrapposizione topografica, unita alla sostanziale omogeneità delle caratteristiche geomeccaniche, strutturali e litologiche, consente di estendere le valutazioni effettuate sull'intera parete anche all'area specifica della variante. Ne consegue che le analisi 3D preliminari risultano funzionali non solo alla comprensione generale del comportamento della parete, ma costituiscono altresì un elemento indispensabile per la corretta calibrazione delle successive modellazioni bidimensionali dei fenomeni di caduta massi relative all'area di variante. Inoltre, esse forniscono un contributo significativo alla definizione della distribuzione areale potenziale dei blocchi instabili e al miglioramento dell'interpretazione dei possibili scenari di propagazione.**

Dalle analisi sopra descritte si evince che le aree sorgenti dei fenomeni di caduta massi sono state individuate in corrispondenza delle creste sommitali e delle porzioni mediane dell'intera parete rocciosa (individuate in figura con linee arancioni). Tale scelta risulta cautelativa e giustificata dalle condizioni geomorfologiche e strutturali osservate lungo i versanti in esame (vedi rilievo geomeccanico). Sono inoltre state riportate in figura alcune sezioni di controllo (rappresentate con tratteggio azzurro parallelo alla parete), corrispondenti a ipotetiche fasce di protezione poste a diverse quote, finalizzate alla valutazione dell'efficacia della barriera naturale costituita dalla morfologia esistente nel contenimento dei blocchi instabili. Le simulazioni condotte mostrano che la maggior parte dei blocchi mobilizzati tende ad arrestarsi lungo la porzione di monte del giacimento attualmente presente, con percentuali di arresto superiori al 95% nei primi 40-60 metri dal piede delle pareti rocciose. In particolare, lungo la terza fascia di protezione (procedendo da monte verso valle) si osserva che quasi la totalità dei blocchi si arresta prima di raggiungerla. Analogamente, lungo la quarta fascia non si rileva la presenza di blocchi, ad eccezione di alcune traiettorie isolate di tipo balistico "proiettile", la cui previsione risulta complessa anche per i software di modellazione tridimensionale. Tali traiettorie,

statisticamente inferiori all'1% (<1%), sono evidenziate nelle figure allegate in termini di frequenza e distribuzione areale."

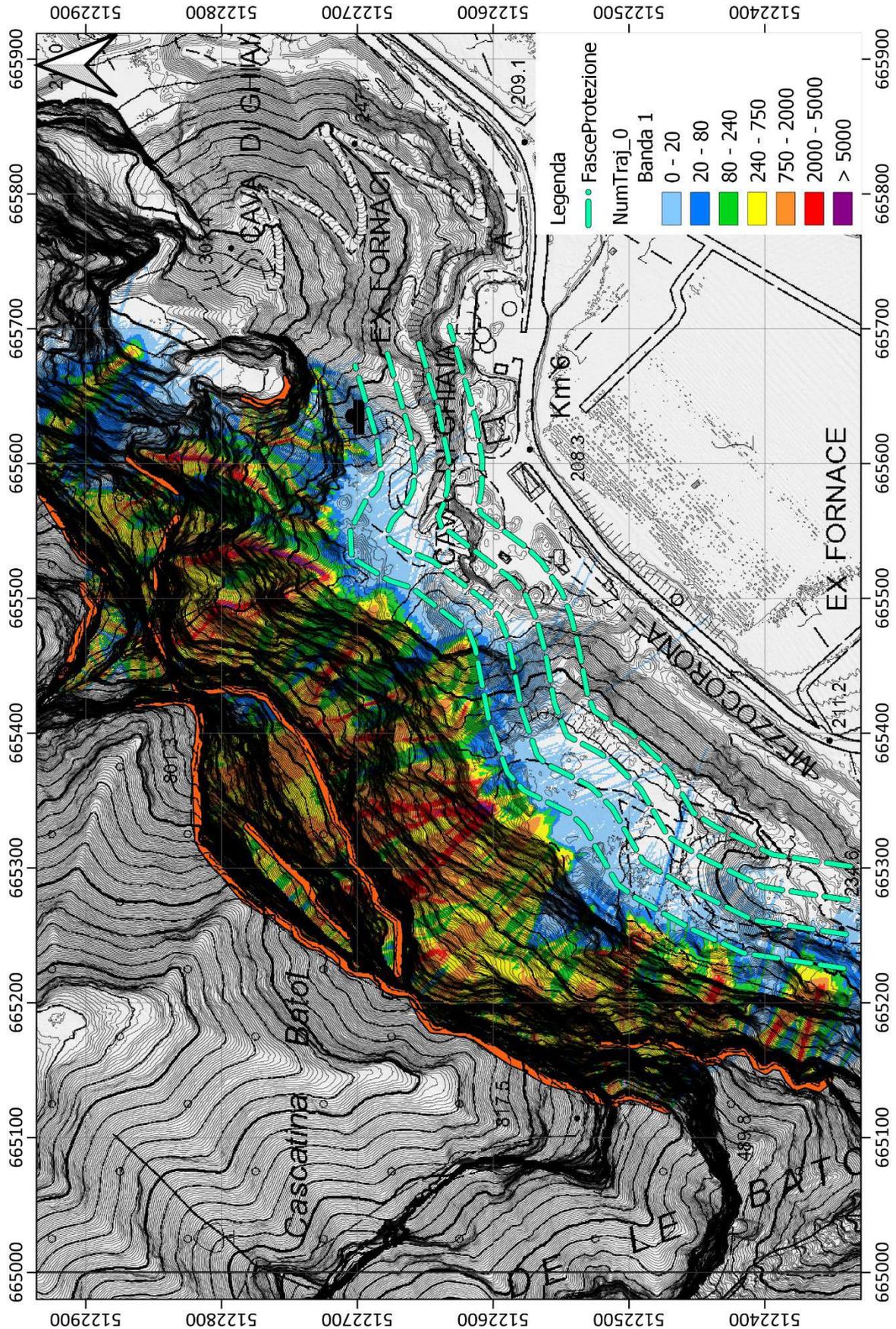
Le simulazioni indicano che le opere previste nell'ambito della variante n. 3 risultano compatibili con le attuali condizioni di pericolosità da caduta massi rilevate localmente. È opportuno sottolineare che il limite dell'area di variante n. 3 si colloca a una distanza planimetrica di circa 70÷80 metri rispetto al piede della parete rocciosa. Tra tale limite e la base della scarpata sono interposti due terrazzamenti morfologici principali, già descritti in precedenza: il primo costituito prevalentemente da depositi limo rielaborati, il secondo da accumuli detritici grossolani derivanti da fenomeni gravitativi progressi anch'essi parzialmente rimaneggiati.

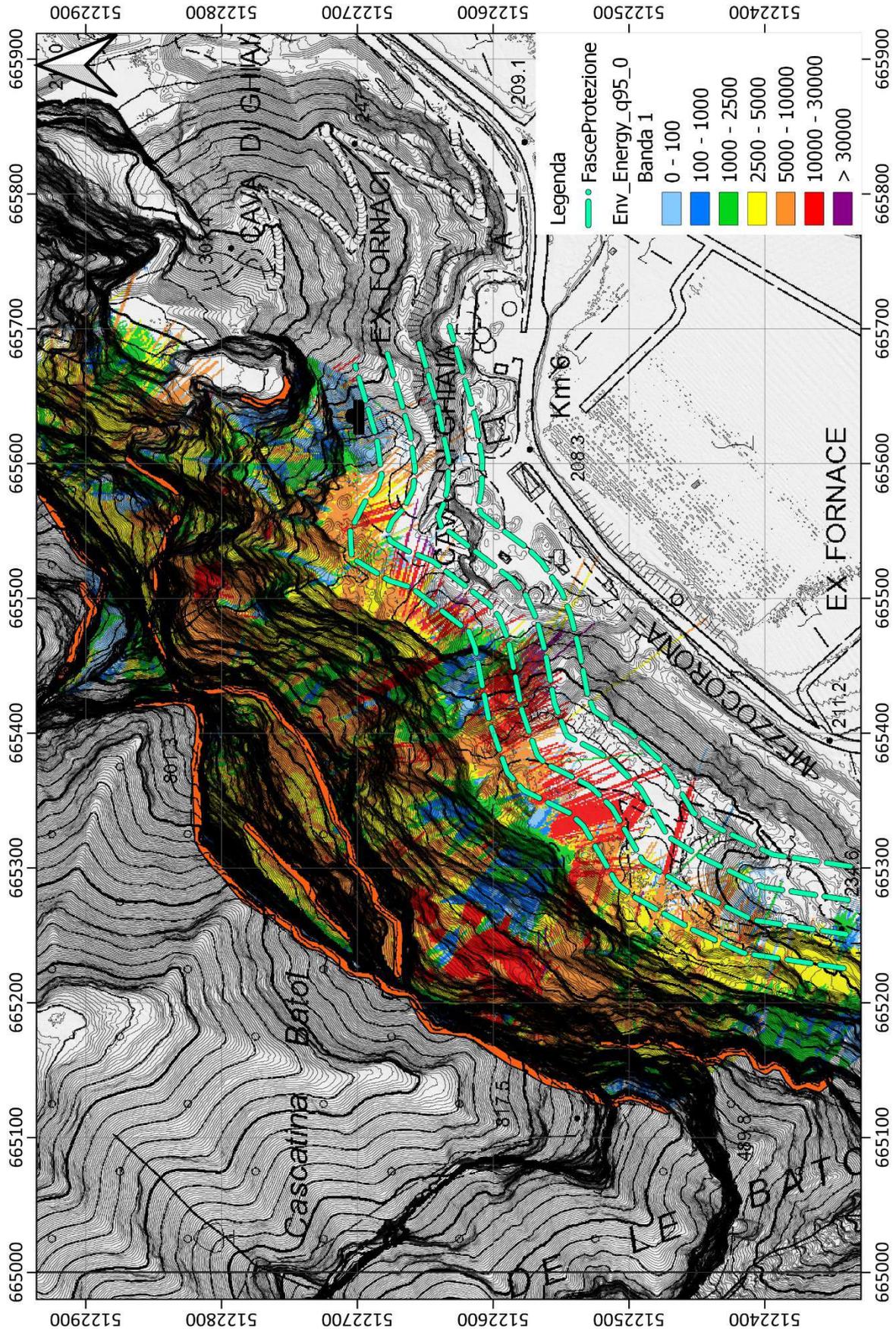
Tali elementi morfologici naturali e antropici contribuiscono a incrementare la capacità di attenuazione dell'energia cinetica dei blocchi scoscesi, agendo come barriere passive di tipo diffuso. Questo assetto, unito agli esiti delle modellazioni 2D riportate in seguito e 3D effettuate, conferma la compatibilità dell'intervento con la pericolosità da caduta massi. A ulteriore conferma, si rileva l'assenza di eventi franosi documentati o di crolli storici che abbiano interessato l'area di variante n. 3.

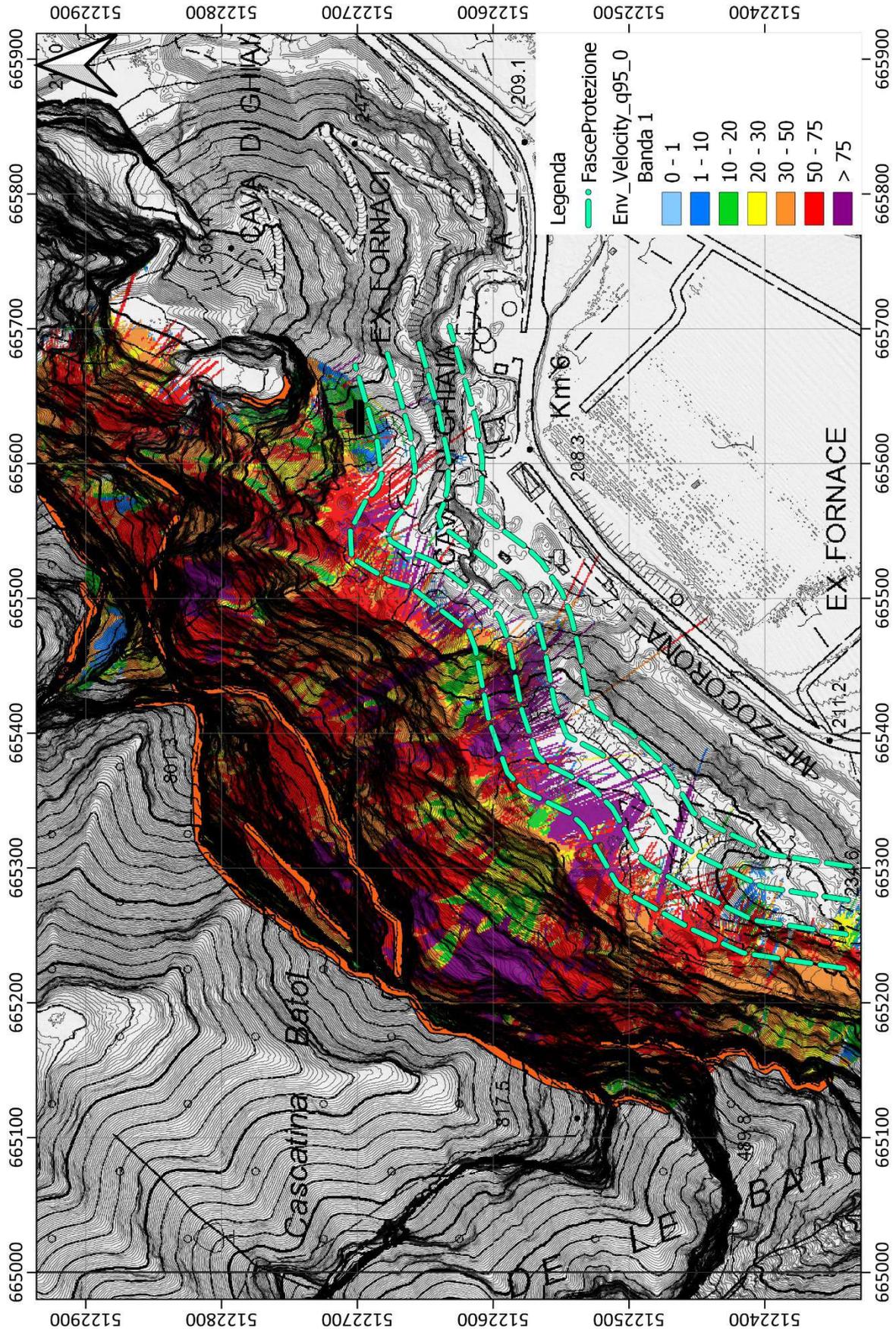
Si rinvia, inoltre, alle valutazioni da effettuarsi in una fase progettuale più avanzata, nell'ambito della pianificazione estesa dell'intero piano di iniziativa privata relativo all'area di variante n. 3 e ai lotti di proprietà privata situati a monte di essa, attualmente in prossimità dell'avvio della progettazione. In tale contesto, la nuova configurazione morfologica derivante dalle previste opere di ripristino ambientale potrà modificare sensibilmente le condizioni di propagazione dei blocchi instabili. Le simulazioni di caduta massi – sia tridimensionali che bidimensionali – attualmente riportate, si basano infatti sulla morfologia attuale dei luoghi, rilevata ante operam, la quale sarà oggetto di sostanziali modifiche in fase di ripristino e riqualificazione.

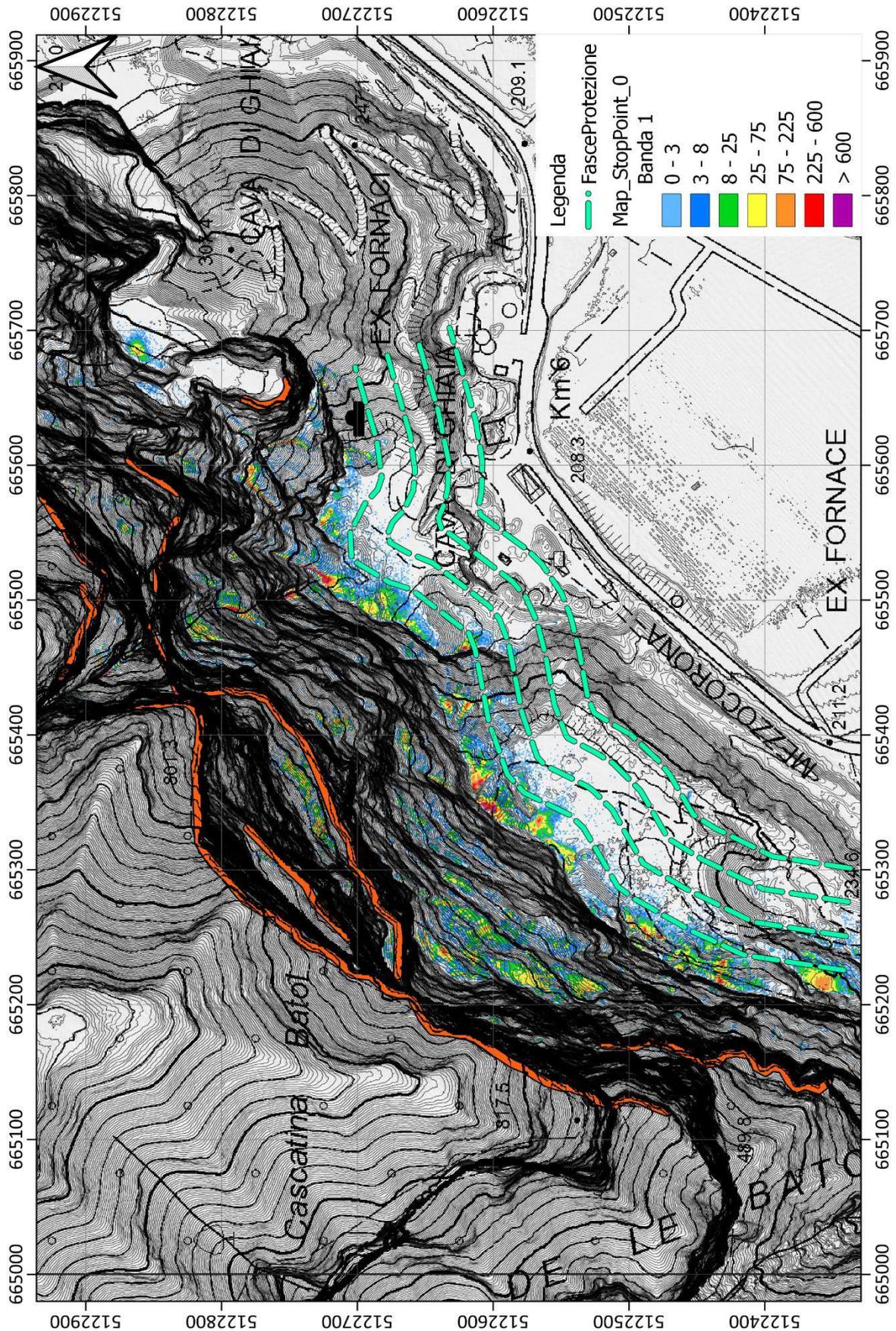
Si sottolinea pertanto che, al termine delle attività estrattive e a seguito dell'attuazione delle opere di rimodellamento ambientale previste lungo il giacimento a monte dell'area di variante n. 3, sarà opportuno prevedere ulteriori misure di mitigazione del rischio da caduta massi. Tra queste, si segnala l'opportunità di introdurre un'opera di contenimento di tipo passivo, quale un vallo-tomo, in grado di intercettare eventuali traiettorie balistiche residue non completamente mitigate dalle opere previste o non perfettamente riproducibili attraverso modellazioni numeriche tridimensionali e bidimensionali, soggette a margini di incertezza intrinseci.

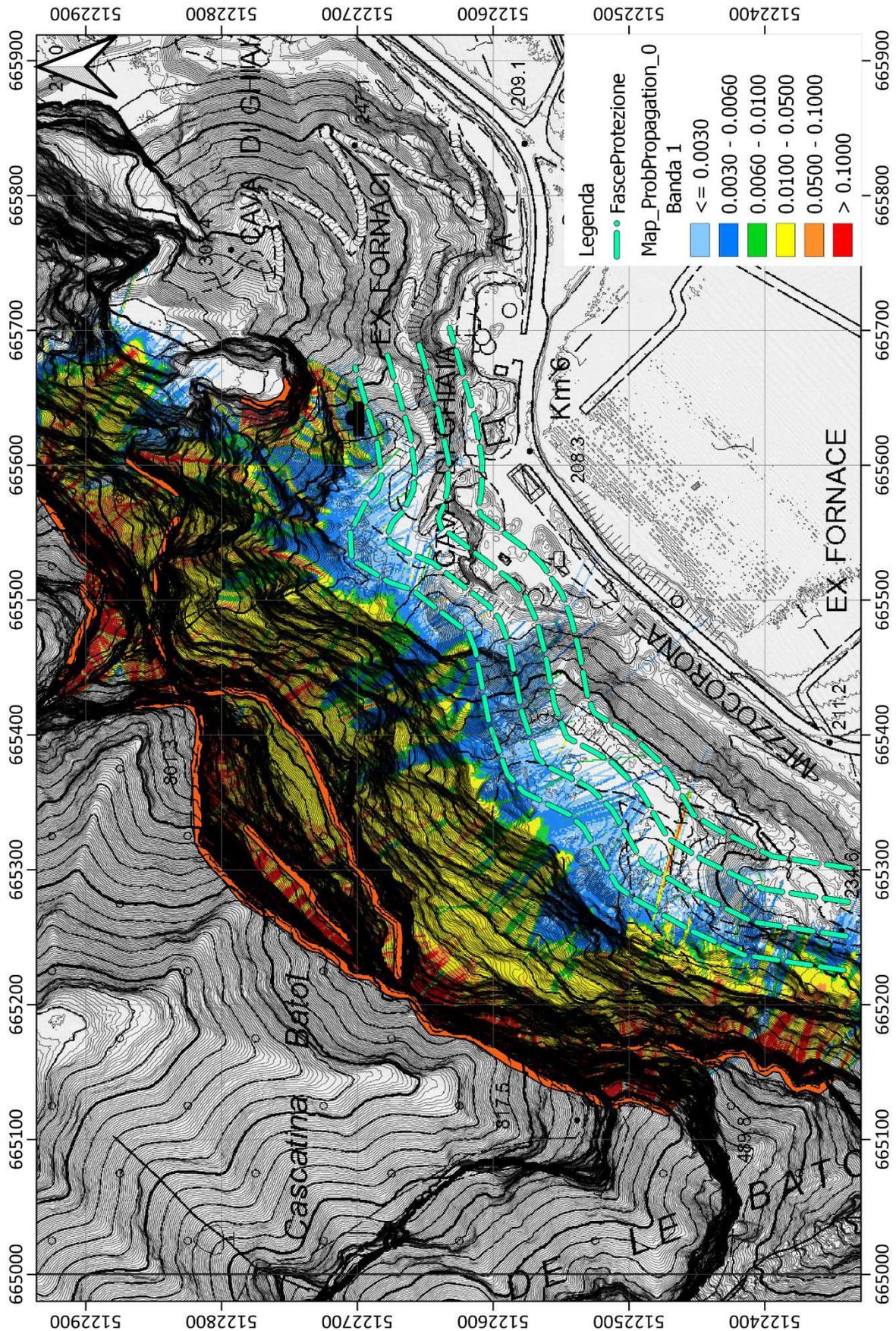
L'ubicazione, la geometria e le caratteristiche dell'opera dovranno essere definite in funzione del modello morfologico finale del piano cave, delle fasi attuative delle opere di ripristino ambientale e dell'evoluzione del profilo di versante post-intervento. A seguire, si riportano le risultanze delle simulazioni bidimensionali condotte lungo l'area di variante n. 3, finalizzate all'analisi di dettaglio delle aree puntuali individuate nella variante, in relazione al limite della lavorazione del giacimento (area produttiva).

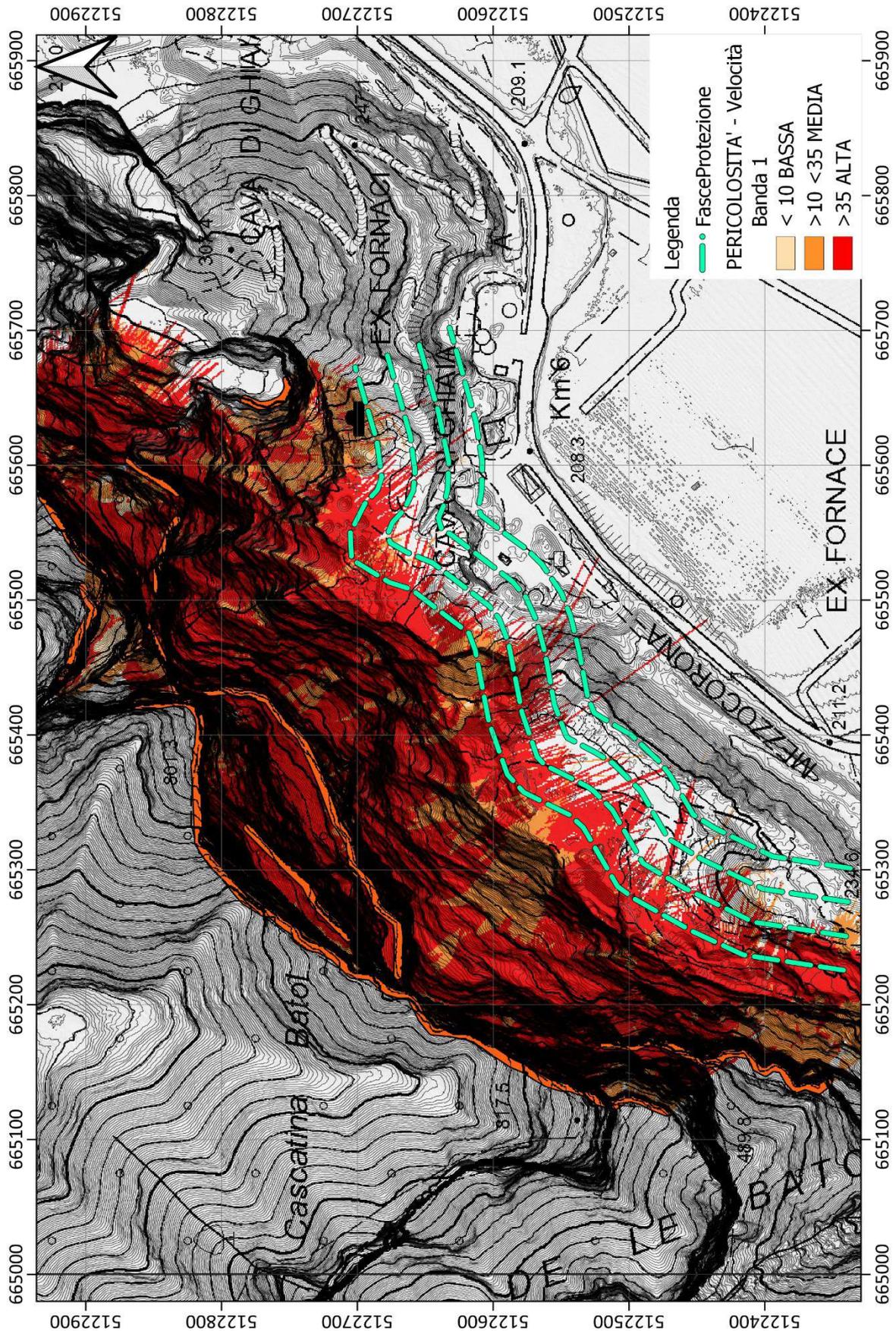


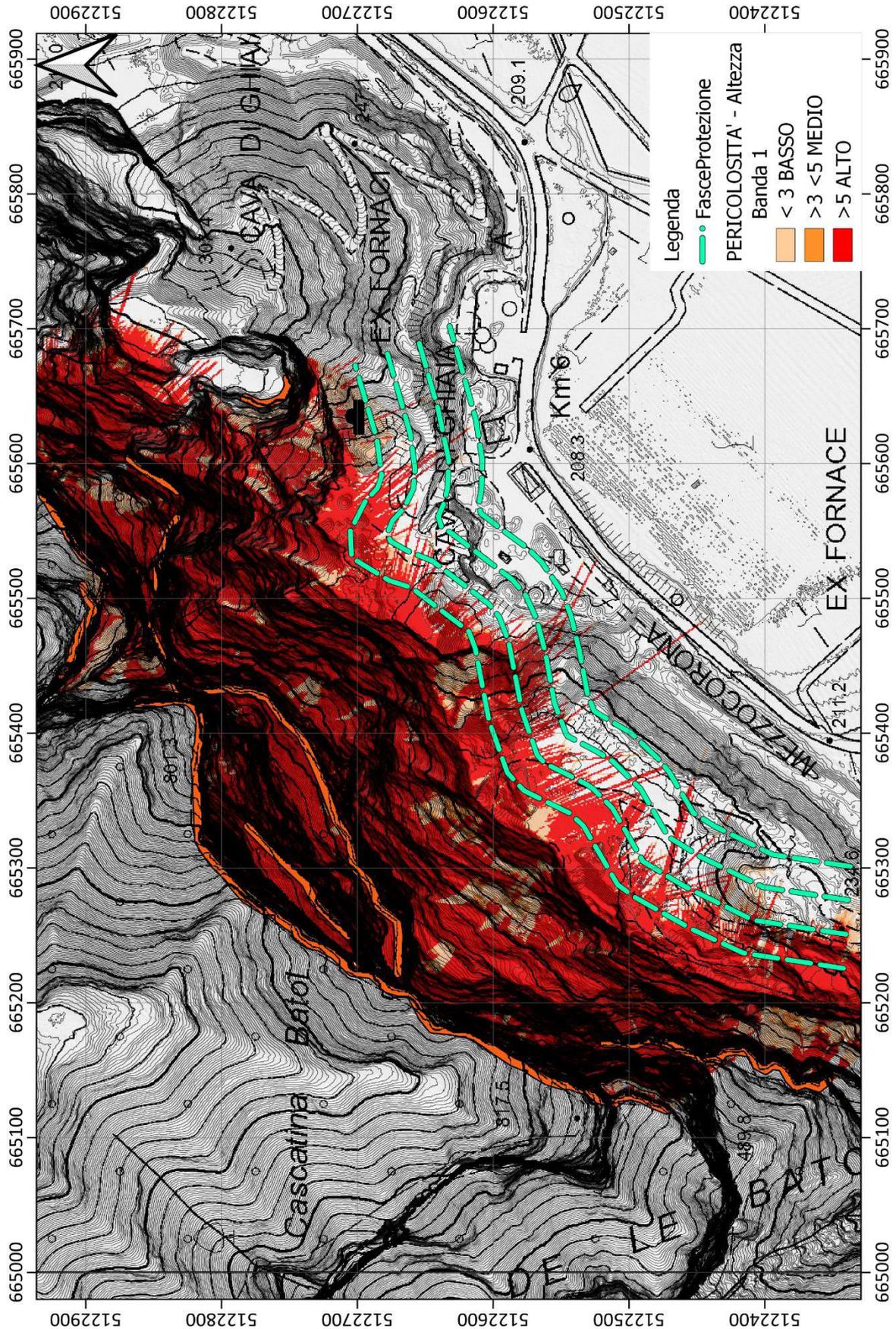












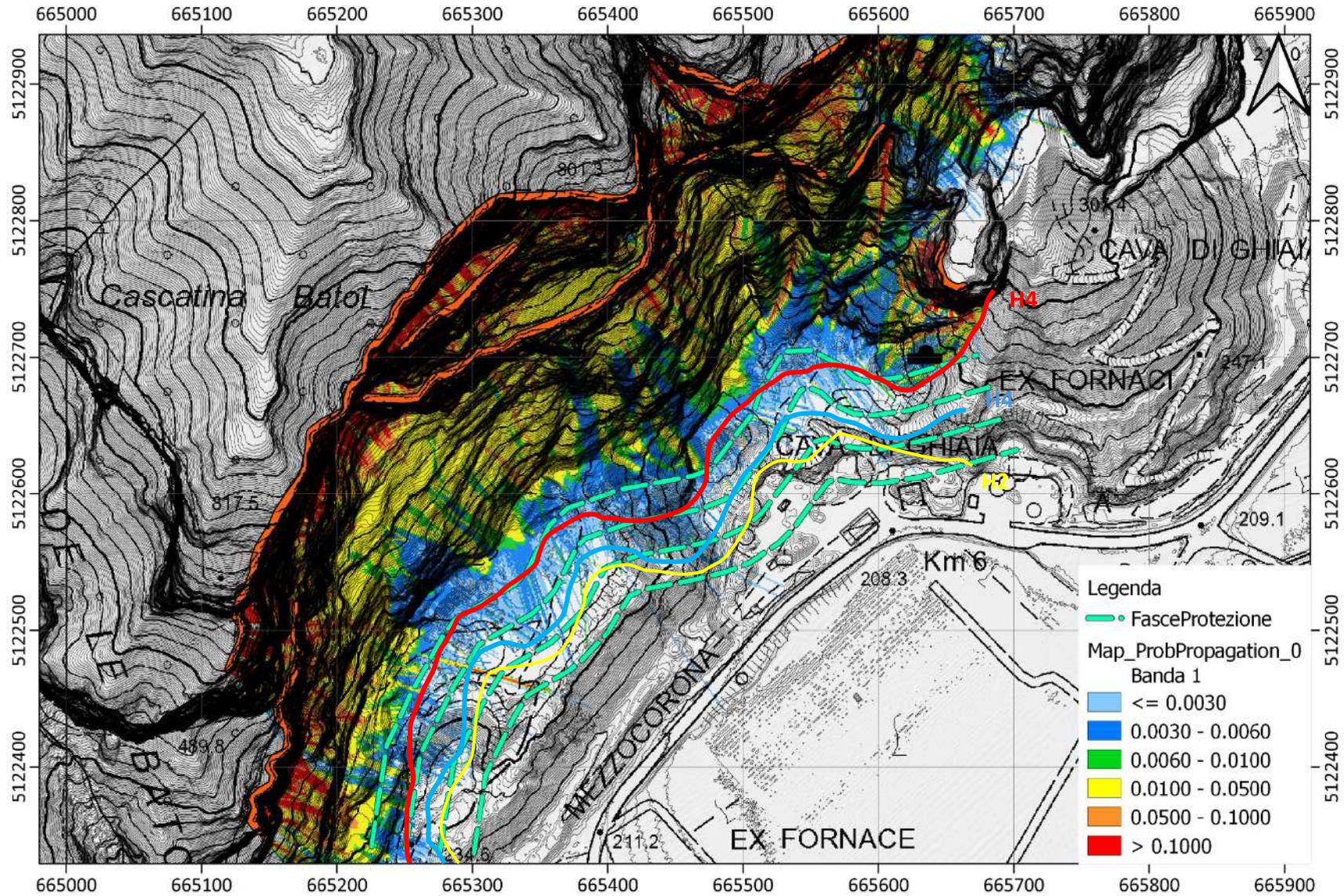


Fig. 2.35: sovrapposizione dei limiti della Carta di Sintesi della Pericolosità alla probabilità di propagazione delle traiettorie con proposta dei limiti delle classi di pericolosità.

2.11. ANALISI CADUTA MASSI 2D LOTTO VARIANTE N°3

Ignorando cautelativamente quanto sopra esposto (assenza di blocchi lungo l'area di n°3 di variante – area per insediamento produttivo di livello comunale esistente), sono state effettuate delle verifiche geocinematiche di scoscendimento massi lungo una sezione perpendicolare all'intero versante ed al sedime dell'area di variante (sezione più gravosa), così come è riportato nelle figure sotto allegate.

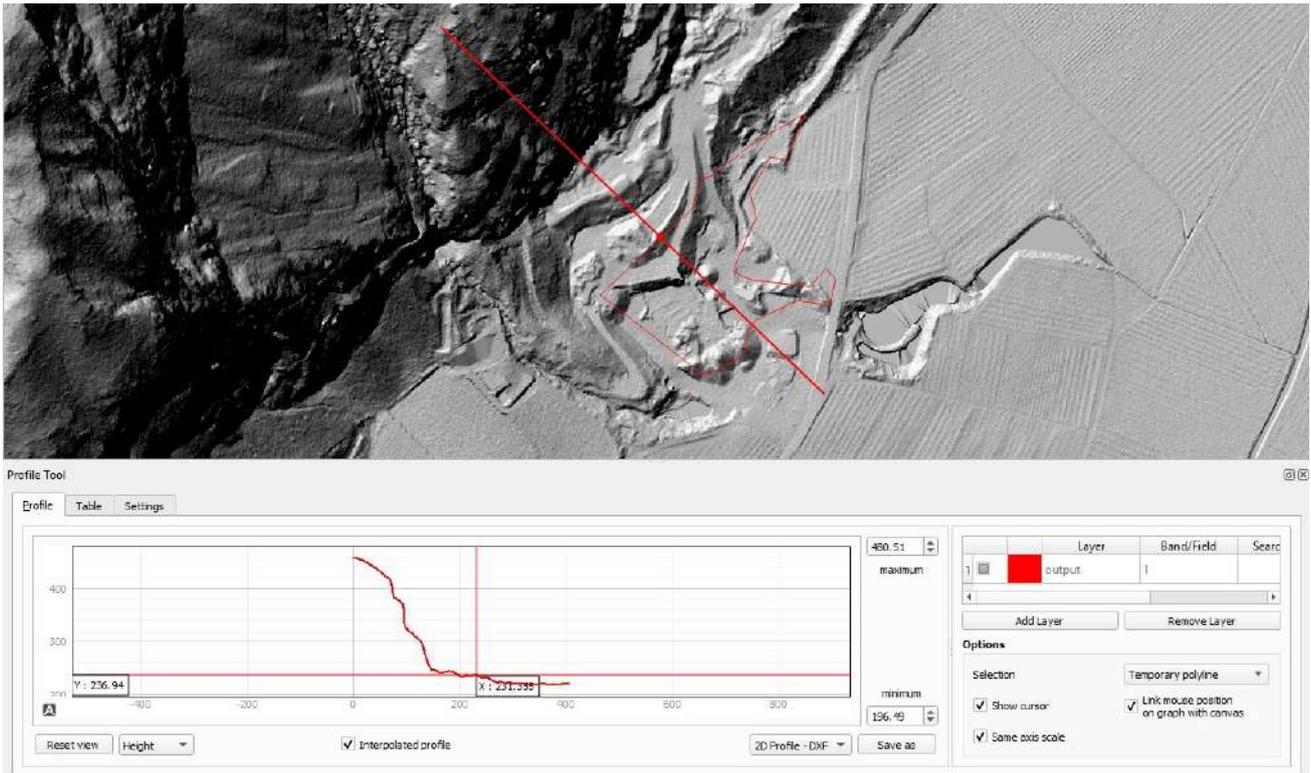


Fig. 2.36: traccia della sezione utilizzata per le verifiche di scoscendimento massi. L'inizio dell'area produttiva della variante n°3 coincide con ascissa $x = 232$ circa della sezione.

Lo studio dei parametri di caduta massi può essere effettuato, una volta noti la topografia, la zona di caduta, i volumi coinvolti ed il tipo di terreno presente, attraverso appositi codici di calcolo che consentono di "individuare", mediante interpolazione statistica, punti di arresto, energia, velocità ed altezza di rimbalzo dei massi in caduta nelle varie sezioni di studio. Il codice di calcolo utilizzato per le verifiche geocinematiche è il ROCFALL della ROCSCIENCE, software specifico per le verifiche rotolamento massi.

Al momento è usanza comune ed accettata l'elaborazione computerizzata per l'analisi di fenomeni di caduta massi; diversi metodi di calcolo del percorso di caduta di massi sono disponibili in letteratura.

Essi si distinguono sulla base delle approssimazioni introdotte. Il metodo più semplice è definito modello del lumped mass, in quanto considera il blocco in caduta simulata come puntiforme con massa concentrata nel punto. Anche nel caso di studio di cadute simultanee di più massi, la consuetudine, ma anche i limiti imposti da elaborazioni al calcolatore con i metodi attuali, devono essere affrontati con l'approccio del lumped mass.

Il principio fondamentale è quello secondo cui un blocco, soggetto ad un movimento di caduta o rotolamento lungo un pendio, rispetta in ogni istante la condizione di massima

efficienza del moto. Di conseguenza sia le traiettorie, sia il tipo di moto assunto durante il percorso sono quelli che determinano la minor perdita di energia cinetica.

Il rimbalzo è un movimento che può essere conseguente all'impatto di un blocco sul pendio. Gli urti sono classificati in elastico ed anelastico a seconda che in essi si conservi o meno l'energia cinetica. I coefficienti di restituzione possono essere determinati dal principio della conservazione della quantità di moto. Per urti completamente anelastici, $K = 0$, per urti completamente elastici $K = 1$. L'analisi sperimentale dei fenomeni che si osservano nell'urto di un masso su una scarpata ha evidenziato che le caratteristiche del moto successive all'impatto dipendono dalla forma del blocco, dalla geometria e rugosità del profilo del pendio nonché dalla quantità di energia dissipata nell'urto, quest'ultima legata alle caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti la superficie d'impatto e del blocco in caduta, nonché all'angolo di incidenza. Le verifiche geocinematiche di crollo eseguite con il codice di calcolo Rocfall in 2D vengono simulate con l'inserimento di un **VRU** (volume roccioso unitario)¹² considerato un volume di **2,0 m³**, **applicando cautelativamente una variazione di volume così come riportato nella seguente tabella**, in analogia ai valori utilizzati per la modellazione 3D.

Rocks to Throw					
Number of Rocks	1000	Overall			
Rock Types	Group 1				
Initial Conditions					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Horizontal Velocity (m/s)	0.5	Normal	0.15	0.45	0.45
Vertical Velocity (m/s)	0.5	Normal	0.15	0.45	0.45
Properties					
Name	Group 1				
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Mass (kg)	5576.1	Normal	100	300	300
Density (kg/m ³)	2600	Normal	0.15	0.45	0.45

Fig. 2.37: caratteristiche VRU utilizzato nelle simulazioni di scoscendimento massi.

Per quanto riguarda i valori dei coefficienti R_n (coefficiente di restituzione normale) e R_t (coefficiente di restituzione tangenziale), sulla base di quanto osservato in sede dei sopralluoghi condotti e dei dati bibliografici disponibili, per i vari tratti del versante sono stati adottati i valori di riferimento codificati RocFall, applicando cautelativamente delle variazioni a tali valori in analogia ai valori utilizzati per le modellazioni 3D. La sezione mostra dunque una prima parte di parete rocciosa dove la roccia alterna delle pareti più massive a porzioni connotate da pendenze minori e fortemente alterate (ripiani) con presenza di vegetazione e materiale detritico. La porzione basale è inizialmente caratterizzata dalla presenza di depositi di limi estesi fino all'area produttiva sottostante. In seguito, si riportano alcune foto esplicative dell'area interessata dalla variante n°3.

Si riportano a titolo esplicativo i valori dei coefficienti di alcuni dei materiali utilizzati nelle verifiche di scoscendimento massi, i restanti vengono riportati nelle relazioni di calcolo allegate al presente rapporto.

¹² Nonostante i rilevamenti di campo abbiano individuato volumetrie prossime a 0,15 m³, si è deciso di tenere un volume paritario agli agglomerati di blocchi di roccia presenti in subaffioramento.

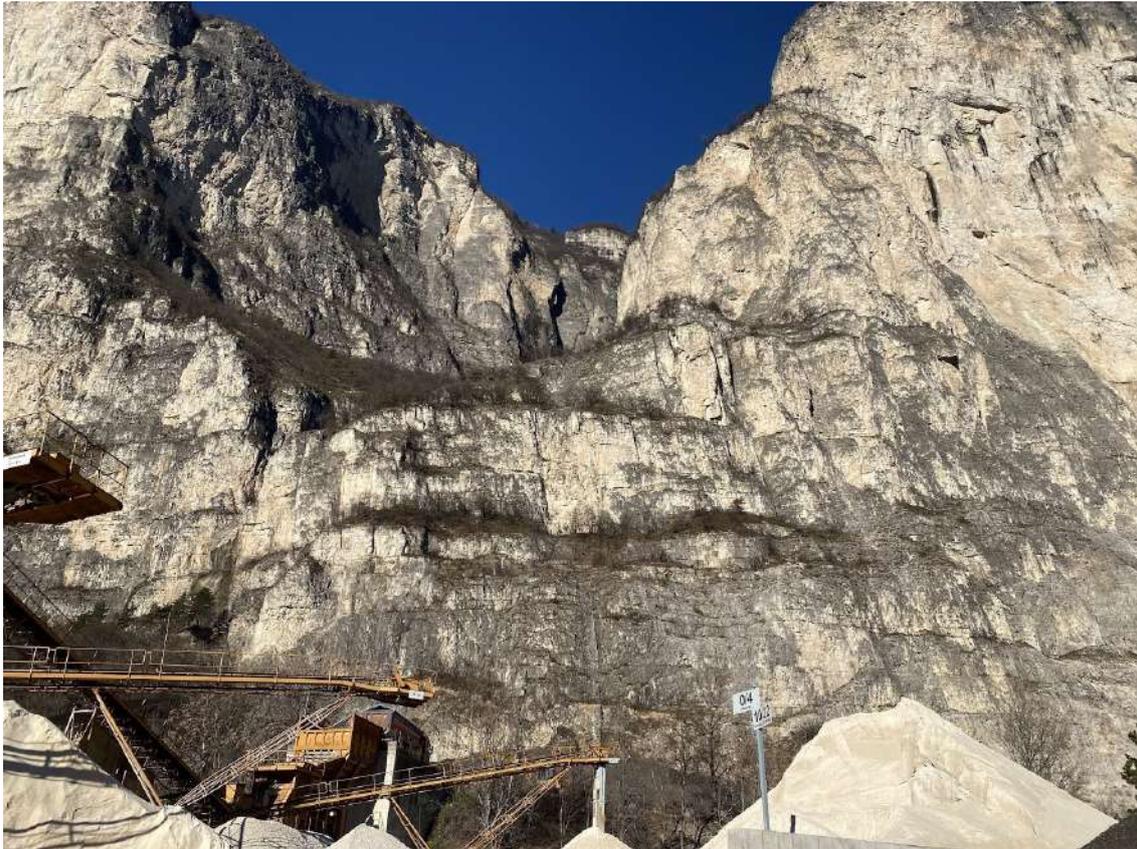


Foto 2.38: vista sulla porzione di parete a monte dell'area di variante n°3.

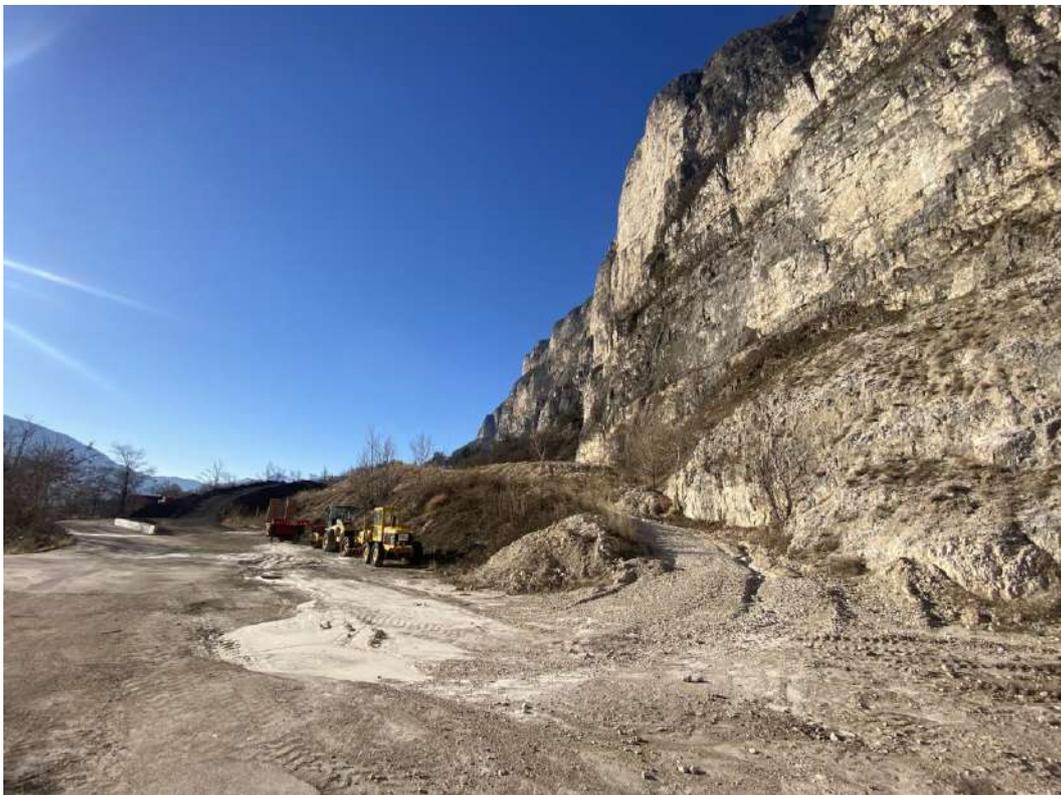


Foto 2.39: vista sui depositi di limi a monte dell'area di variante n°3 ubicati lungo la sezione di controllo.

Silts antropic deposit

"Silts antropic deposit" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.31	Normal	0.03	0.09	0.09
Tangential Restitution	0.81	Normal	0.03	0.09	0.09
Friction Angle (°)			Calculated from Rt		
Slope Roughness (°)		None			

Limestone weathered

"Limestone weathered" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.36	Normal	0.04	0.12	0.12
Tangential Restitution	0.87	Normal	0.04	0.12	0.12
Friction Angle (°)			Calculated from Rt		
Slope Roughness (°)		None			

Limestone clean

"Limestone clean" Properties					
Color					
	Mean	Distribution	Std.Dev.	Rel. Min	Rel. Max
Normal Restitution	0.4	Normal	0.03	0.09	0.09
Tangential Restitution	0.9	Normal	0.03	0.09	0.09
Friction Angle (°)			Calculated from Rt		
Slope Roughness (°)		None			

Fig. 2.40: caratteristiche dei coefficienti Rn e Rt dei materiali più significativi e le variazioni adottate.

Come si può osservare nella sezione di fig. 2.41, puramente rocciosi sono stati considerati i tratti di versante sommitale (parete) e in roccia molto fratturata/alterata in corrispondenza dei terrazzamenti, laddove DTM rilievo drone, foto e ricognizioni individuano anche il sub-affioramento del substrato roccioso. Ai restanti settori del pendio sono stati attribuiti valori di Rn e Rt maggiormente "regimanti" i blocchi in movimento, come del resto osservato in occasione dei sopralluoghi condotti, seppure comunque definiti con criteri estremamente cautelativi. La base del versante è stata considerata cautelativamente regimante, anche se sia costituita da limi soffici derivanti dalle lavorazioni di cava, poggianti su materiali alluvionali detritici grossolani.

Allo scopo di discriminare con ampio margine di sicurezza la pericolosità dell'area, contrariamente a quanto rilevato in sede di indagine, le verifiche sono state comunque effettuate considerando "sorgente" di crollo entrambe le porzioni sommitali e mediana del versante sia in condizioni di parete rocciosa affiorante che in sub-affioramento (blocchi isolati). **Le analisi effettuate considerano per ogni tratto sorgente 1000 massi in**

distacco (totale di 2000 lungo la sezione). In seguito, si riportano i grafici caratteristici delle traiettorie dei 2000 blocchi simulati lungo la sezione di progetto, e delle relative altezze di volo, energie e velocità. L'output completo del programma di calcolo relativo alla verifica è allegato al termine della relazione. Si osserva come la maggior parte dei blocchi si arrestano tra la progressiva 145 – 205, pertanto prima di raggiungere l'area produttiva di variante n°3.

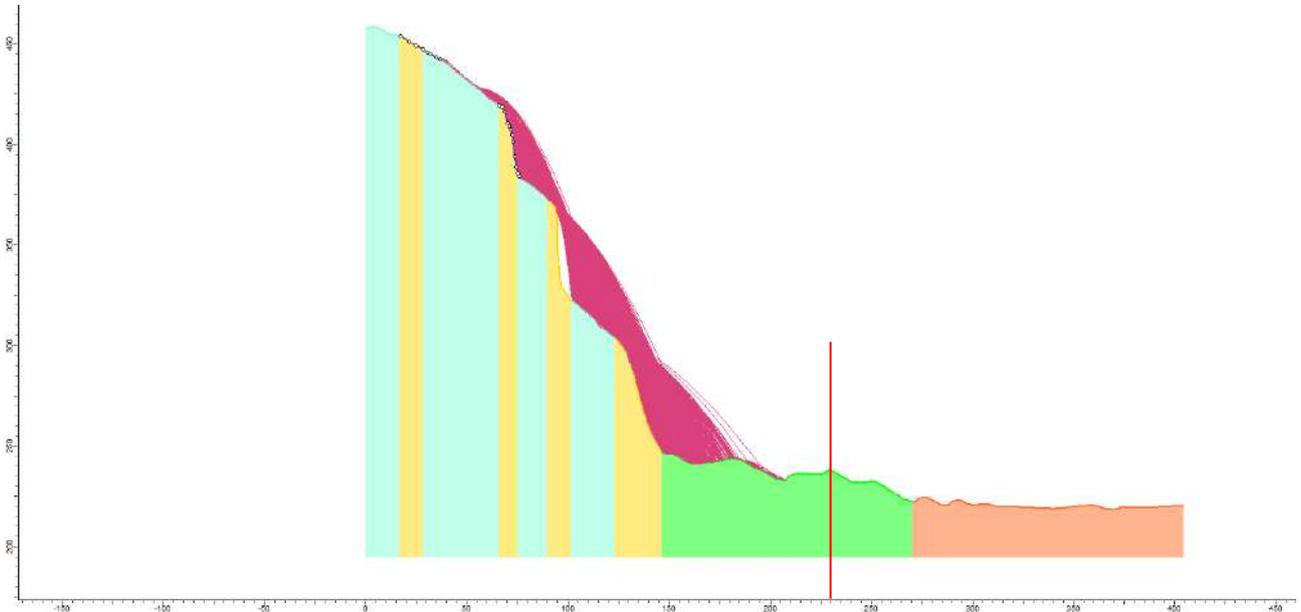


Fig. 2.41: traiettorie lungo la sezione di controllo dei 1000 per area sorgente dei blocchi simulati. In linea rossa il limite a monte dell'area di variante n°3 – area produttiva.

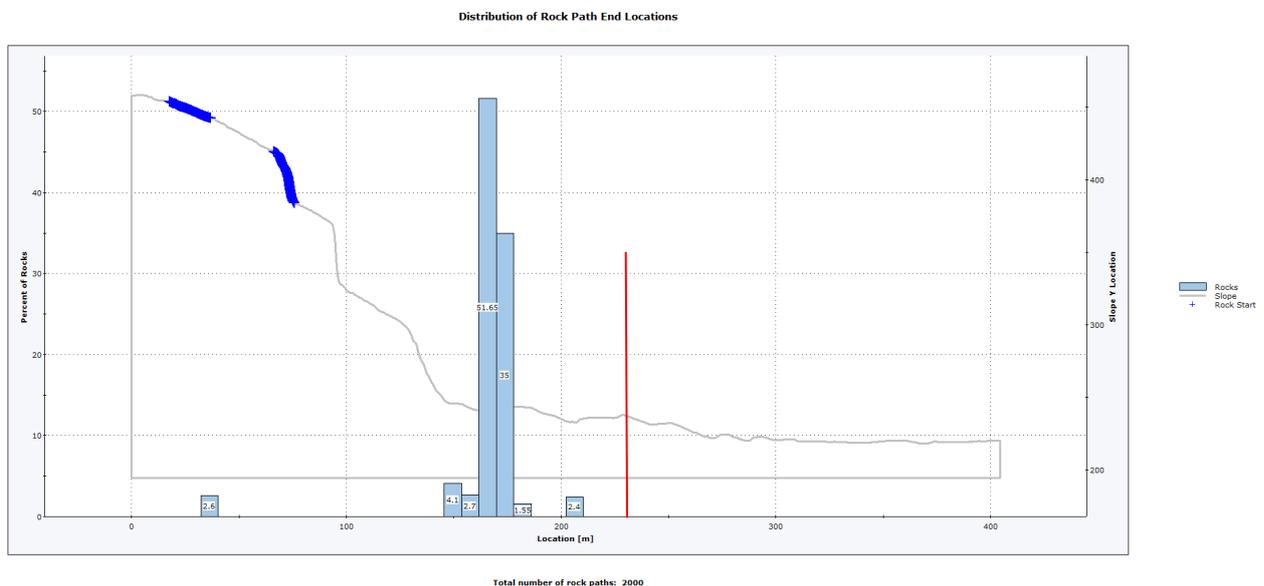


Fig. 2.42: distribuzione delle zone di arresto in percentuale (%) dei 1000 blocchi simulati per le n°2 aree sorgenti lungo la sezione di verifica. In linea rossa il limite a monte dell'area di variante n°3 – area produttiva.

Distribution of Rock Path End Locations

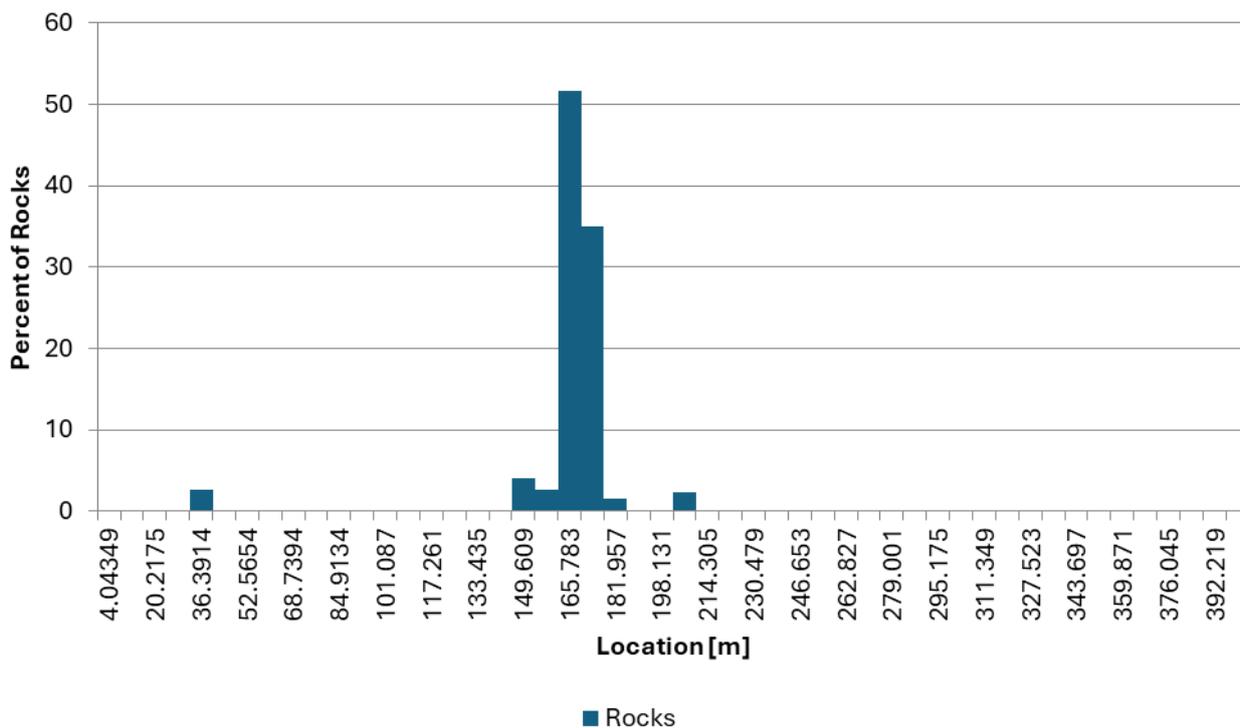


Fig. 2.43: grafico istogramma della distribuzione delle zone di arresto in percentuale (%) dei 1000 blocchi simulati per le n°2 aree sorgenti lungo la sezione di verifica (totale blocchi 2000). Si osserva come la maggior parte dei blocchi si arrestano tra la progressiva 145 – 205, pertanto prima di raggiungere l'area produttiva di variante n°3 (progressiva 233 metri).

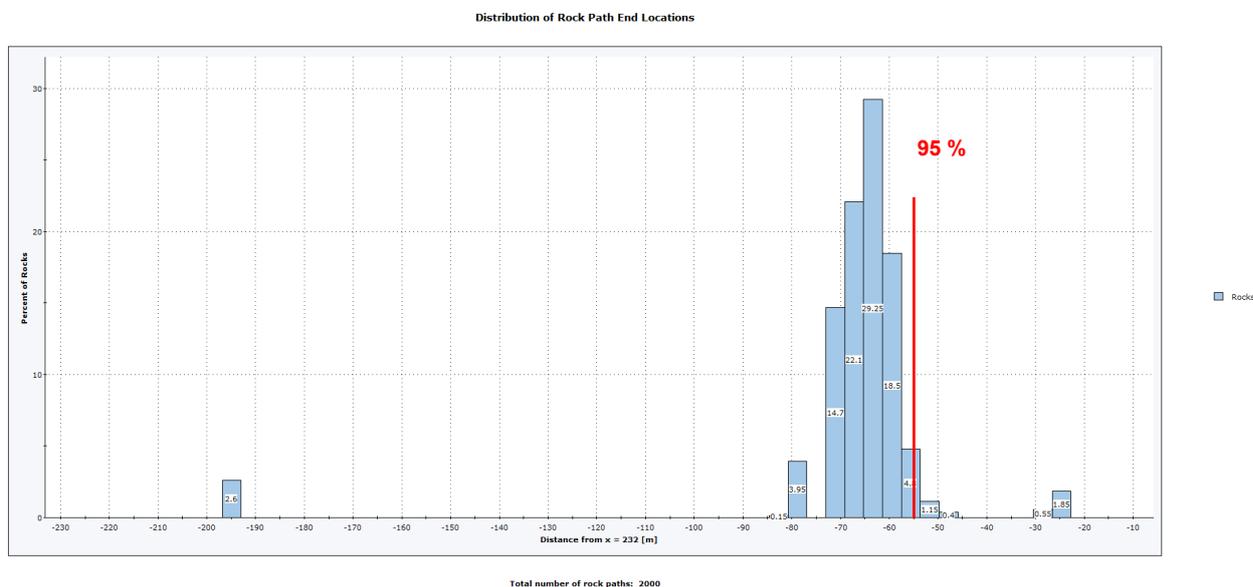
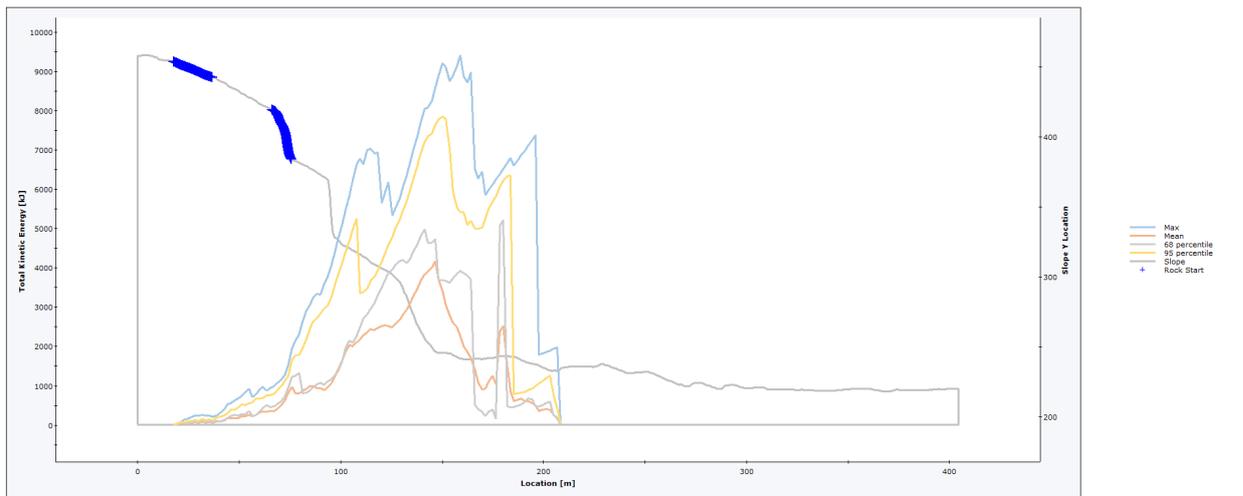
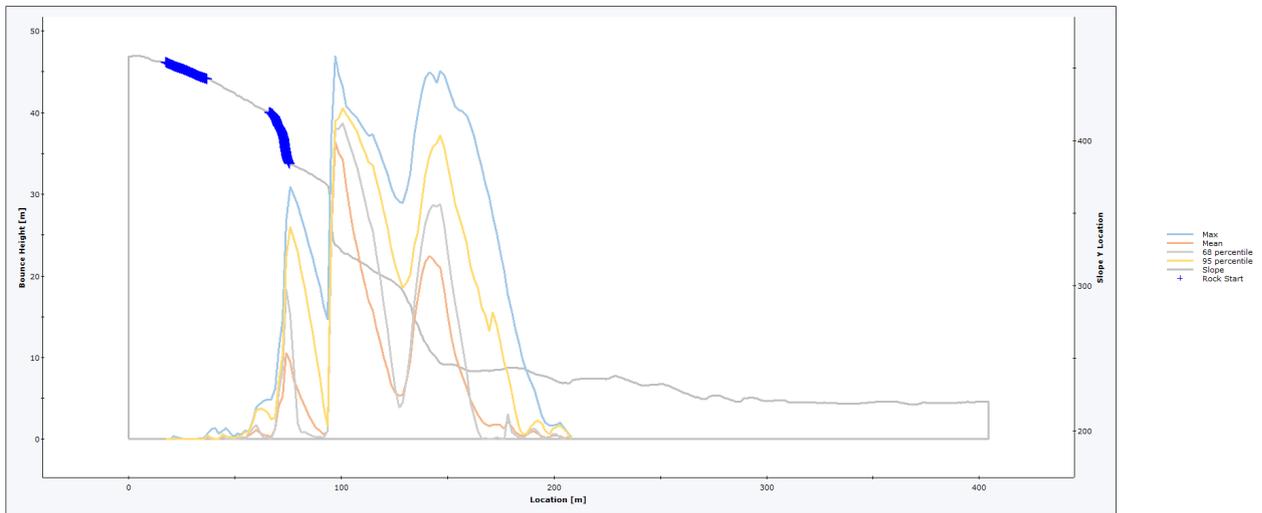


Fig. 2.44: grafico istogramma delle distribuzioni delle zone di arresto in percentuale (%) dei 2000 blocchi simulati in relazione alla distanza del limite con area produttiva. Si osserva come il 95% dei blocchi si arresta a monte del limite dell'area produttiva di variante n°3 a una distanza di circa 50 metri.



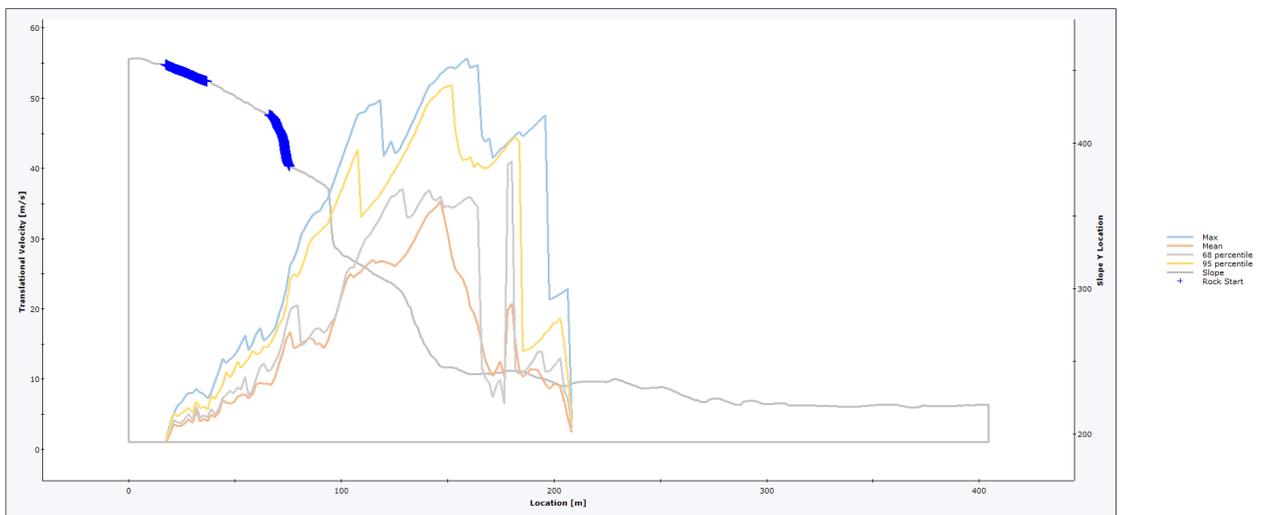
Total number of rock paths: 2000

Fig. 2.45: grafico delle energie dei 2000 blocchi simulati. Si riporta il frattile del 95% delle energie calcolate nelle analisi delle traiettorie.



Total number of rock paths: 2000

Fig. 2.46: grafico delle altezze di volo dei 2000 blocchi simulati. Si riporta il frattile del 95% delle altezze calcolate nelle analisi delle traiettorie.



Total number of rock paths: 2000

Fig. 2.47: grafico delle velocità di volo dei 2000 blocchi simulati. Si riporta il frattile del 95% delle altezze calcolate nelle analisi delle traiettorie.

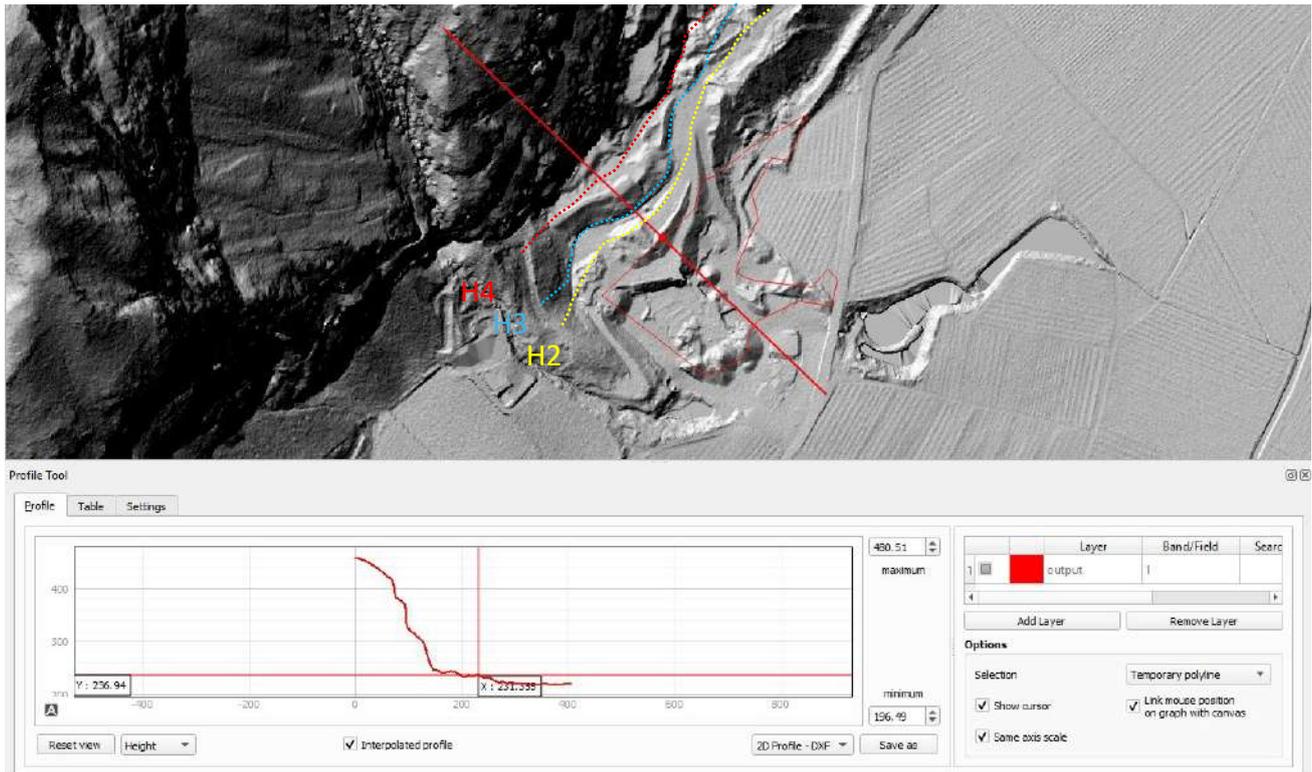


Fig. 2.48: rielaborazione ipotetica del grado di pericolosità in relazione alle analisi condotte su Lidar PAT 2014.

Le verifiche condotte sui fenomeni di caduta massi evidenziano che circa il 95% dei blocchi mobilizzati non raggiunge il limite dell'area di variante n. 3. Gli arresti si concentrano prevalentemente nei primi 50÷60 metri dal piede della parete rocciosa, in corrispondenza dell'area occupata da depositi limo-argillosi derivanti dalle precedenti attività di escavazione. Tali risultati sono coerenti con le evidenze di campo, le quali mostrano come la quasi totalità dei blocchi scoscesi si sia arrestata lungo il piede della parete, in aree caratterizzate da materiale di riporto a bassa resistenza meccanica, distribuito su gradoni ampi e suborizzontali.

Le simulazioni confermano inoltre che sia le energie che le altezze di volo dei blocchi risultano contenute, indicando un comportamento cinematico prevalentemente radente al suolo, piuttosto che balistico. Tale dinamica è favorita dalla morfologia articolata del versante e dalla natura dissipativa dei materiali presenti al piede della scarpata.

Nel complesso, l'assetto morfologico attuale del pendio a monte dell'area, unitamente alle condizioni strutturali degli affioramenti rocciosi e ai potenziali volumi instabili individuati, garantisce un efficace contenimento dei fenomeni di caduta, impedendo che i blocchi raggiungano l'area di variante n. 3 in oltre il 95% dei casi, come previsto dalla normativa tecnica di riferimento (UNI 11211-4).

Le modellazioni bidimensionali confermano pienamente quanto emerso dalle simulazioni tridimensionali e dai rilevamenti di campo, restituendo un quadro coerente e convergente circa le aree di propagazione, arresto e la distribuzione energetica dei blocchi instabili.

2.12. CONCLUSIONI

Su incarico e per conto del Comune di Mezzocorona (TN), è stato effettuato uno studio di compatibilità a supporto della Variante 2/2024 aree estrattive – Adozione definitiva ai sensi dell'art. 37, comma 3, della L.P. 15/2015 (pratica 3109). L'anno 2024, il giorno 02 del mese di dicembre alle ore 10:00, si è riunita la Conferenza di pianificazione, convocata in videoconferenza con nota prot. n. 755491 di data 07 ottobre 2024, per la verifica di coerenza del piano in argomento rispetto al Piano Urbanistico Provinciale. Dal sopraccitato verbale di pianificazione, si evince come essa sia costituita da n.12 Varianti al PRG. Dal medesimo verbale si evincono i pareri positivi per il punto 1-12-13, mentre i restati vengono subordinati ad appositi studi di compatibilità o prescrizioni di utilizzo dai vari Servizi Provinciali competenti in materia. Veniva pertanto prodotto dallo scrivete dott. Geol. Emilio Perina relativo studio di compatibilità a supporto della variante numero n°3 (Studio di compatibilità 910_25) adozione preliminare.

Per quanto concerne il presente studio si è fatto riferimento alle valutazioni inerenti alla sola area n. 3 di variante, al fine di espletare le richieste di integrazioni pervenute dal Servizio Geologico in relazione alla adozione definitiva.

La G.P. venerdì 29 settembre 2023 con delibere n°1737 e n°1748 ha approvato il primo aggiornamento delle CaP e della CSP quale risultato dell'attività di continuo aggiornamento delle strutture competenti in materia di pericolo idrogeologico e urbanistica rispetto ai processi naturali e antropici che interessano un territorio in costante evoluzione come il Trentino. Le nuove mappature sono entrate in vigore a partire dal 6 ottobre 2023, giorno successivo alla pubblicazione delle deliberazioni nel Bollettino Ufficiale della Regione Trentino-Alto Adige. Secondo la citata cartografia l'area di variante n°3 è classificata in penalità P3 media, P2 bassa e P1 trascurabili (art. 16-17-18 L.P. 27 maggio 2008, n.5)¹³, ascrivibile entrambe a una pericolosità da crolli per quanto di analisi nel presente studio di compatibilità. Non sono altresì presenti zone di tutele speciali individuate dalla CSP, quali AFI (ambiti fluviali) o IMP (aree riservate a interventi di mitigazione del rischio). In particolare, come riportato nel verbale di pianificazione, si evidenzia quanto segue:

VARIANTE n°3:

*Il Servizio Geologico evidenzia che parte della variante ricade in Penalità P3 per crolli rocciosi. Pur prendendo atto che l'area ha già di fatto un utilizzo di "carattere produttivo", si richiede ai sensi dell'art.16 c.4 delle N.d.A. della CSP lo **studio di compatibilità in fase di pianificazione**, per la valutazione della pericolosità attuale e locale in considerazione del nuovo assetto morfologico estrattivo a monte dell'area stessa.*

L'analisi della consultazione delle Carta della Pericolosità che costruiscono la base della CSP ha evidenziato che le penalità assegnate al lotto oggetto di studio sono ascrivibile a una pericolosità ordinaria di classe H3 per crolli; si rileva altresì una pericolosità H2 residuale da crolli.

Le verifiche condotte sui fenomeni di caduta massi evidenziano che circa il 95% dei blocchi mobilizzati non raggiunge il limite dell'area di variante n. 3. Gli arresti si concentrano prevalentemente nei primi 50÷60 metri dal piede della parete rocciosa, in corrispondenza dell'area occupata da depositi limo-argillosi derivanti dalle precedenti attività di escavazione. Tali risultati sono coerenti con le evidenze di campo, le quali mostrano come la quasi totalità dei blocchi scoscesi si sia arrestata lungo il

¹³ Allegato C "Indicazioni e precisazioni per l'applicazione delle disposizioni concernenti le aree con penalità elevate, medie o basse e le aree con altri tipi di penalità" della D.G.P. 18/03/2022, n. 379: l.p. 27 maggio 2008, n. 5, articoli 14-18 e 48 - l.p. 4 agosto 2015, n. 15.

piede della parete, in aree caratterizzate da materiale di riporto a bassa resistenza meccanica, distribuito su gradoni ampi e suborizzontali.

Le simulazioni confermano inoltre che sia le energie che le altezze di volo dei blocchi risultano contenute, indicando un comportamento cinematico prevalentemente radente al suolo, piuttosto che balistico. Tale dinamica è favorita dalla morfologia articolata del versante e dalla natura dissipativa dei materiali presenti al piede della scarpata.

Nel complesso, l'assetto morfologico attuale del pendio a monte dell'area, unitamente alle condizioni strutturali degli affioramenti rocciosi e ai potenziali volumi instabili individuati, garantisce un efficace contenimento dei fenomeni di caduta, impedendo che i blocchi raggiungano l'area di variante n. 3 in oltre il 95% dei casi, come previsto dalla normativa tecnica di riferimento (UNI 11211-4).

Le modellazioni bidimensionali confermano pienamente quanto emerso dalle simulazioni tridimensionali e dai rilevamenti di campo, restituendo un quadro coerente e convergente circa le aree di propagazione, arresto e la distribuzione energetica dei blocchi instabili.

È opportuno sottolineare che il limite dell'area di variante n. 3 si colloca a una distanza planimetrica di circa 70÷80 metri rispetto al piede della parete rocciosa. Tra tale limite e la base della scarpata sono interposti due terrazzamenti morfologici principali, già descritti in precedenza: il primo costituito prevalentemente da depositi limo rielaborati, il secondo da accumuli detritici grossolani derivanti da fenomeni gravitativi pregressi anch'essi parzialmente rimaneggiati.

Tali elementi morfologici naturali e antropici contribuiscono a incrementare la capacità di attenuazione dell'energia cinetica dei blocchi scosci, agendo come barriere passive di tipo diffuso. Questo assetto, unito agli esiti delle modellazioni 2D riportate in seguito e 3D effettuate, conferma la compatibilità dell'intervento con la pericolosità da caduta massi. A ulteriore conferma, si rileva l'assenza di eventi franosi documentati o di crolli storici che abbiano interessato l'area di variante n. 3.

Si rinvia, inoltre, alle valutazioni da effettuarsi in una fase progettuale più avanzata, nell'ambito della pianificazione estesa dell'intero piano di iniziativa privata relativo all'area di variante n. 3 e ai lotti di proprietà privata situati a monte di essa, attualmente in prossimità dell'avvio della progettazione. In tale contesto, la nuova configurazione morfologica derivante dalle previste opere di ripristino ambientale potrà modificare sensibilmente le condizioni di propagazione dei blocchi instabili. Le simulazioni di caduta massi – sia tridimensionali che bidimensionali – attualmente riportate, si basano infatti sulla morfologia attuale dei luoghi, rilevata ante operam, la quale sarà oggetto di sostanziali modifiche in fase di ripristino e riqualificazione.

Si sottolinea pertanto che, al termine delle attività estrattive e a seguito dell'attuazione delle opere di rimodellamento ambientale previste lungo il giacimento a monte dell'area di variante n. 3, sarà opportuno prevedere ulteriori misure di mitigazione del rischio da caduta massi. Tra queste, si segnala l'opportunità di introdurre un'opera di contenimento di tipo passivo, quale un vallo-tomo, in grado di intercettare eventuali traiettorie balistiche residue non completamente mitigate dalle opere previste o non perfettamente riproducibili attraverso modellazioni numeriche tridimensionali e bidimensionali, soggette a margini di incertezza intrinseci.

L'ubicazione, la geometria e le caratteristiche dell'opera dovranno essere definite in funzione del modello morfologico finale del piano cave, delle fasi attuative delle opere di ripristino ambientale e dell'evoluzione del profilo di versante post-intervento. A seguire, si riportano le risultanze delle simulazioni bidimensionali condotte lungo l'area di variante n. 3, finalizzate all'analisi di dettaglio delle aree

puntuali individuate nella variante, in relazione al limite della lavorazione del giacimento (area produttiva).

Levico Terme, luglio 2025

