POLITECNICO DI TORINO
Centro Interdipartimentale SISCON
Safety of InfraStructures and CONstructions

SISCON

Rockfall Protection Engineering LABORATORY

CONTRATTO DI RICERCA

ATTIVITÀ DI RICERCA FINALIZZATA ALLO SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO SU DIFFERENTI TIPOLOGIE DI ELEMENTI ESPOSTI AL PERICOLO DI CADUTA MASSI

RELAZIONE FINALE

Ing. Valerio De Biagi

Ing. Maddalena Marchelli

Prof. Ing. Daniele Peila

Febbraio 2020

INDICE

1 PREMESSA 4

2 FINALITÀ DEL LAVORO DI RICERCA 5

3 ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ 6

3.1 Definizioni preliminari 6

3.2 Metodologia 6

3.2.1 Volume e tempo di ritorno per la definizione dello scenario 8

3.2.2 Analisi di propagazione 11

4 ELEMENTI A RISCHIO 14

5 CALCOLO DEL RISCHIO PER ELEMENTI CON ESPOSIZIONE NON UNITARIA 16

5.1 Premessa metodologica 16

5.2 Metodo ETA per una strada asfaltata 20

5.2.1 Impatto tra blocco in fase di crollo e veicolo 22

5.2.2 Collisione tra veicolo e blocco fermo sulla sede stradale 24

5.2.3 Sbandamento dovuto al manto danneggiato 25

5.2.4 Albero degli eventi semplificato 26

5.3 Metodo ETA per pista forestale (sterrata) 28

5.3.1 Impatto tra blocco in fase di crollo e veicolo 31

5.3.2 Albero degli eventi semplificato 33

5.4 Metodo ETA per sentiero 35

5.4.1 Impatto tra blocco in fase di crollo e escursionista 37

5.4.2 Albero degli eventi semplificato 39

5.5 Metodo ETA per ferrovia 40

6 CALCOLO DEL RISCHIO PER ELEMENTI CON ESPOSIZIONE UNITARIA 43

6.1 Premessa metodologica 43

6.2 Metodologia proposta 44

6.2.1 Norma UNI 11211-4:2018: parametri di impatto 46

6.2.2 Analisi traiettografiche bidimensionali 46

7 CASO STUDIO 48

7.1 Identificazione del fenomeno, individuazione delle aree sorgenti e dei loro volumi (scenari) 49

7.1.1 Caratterizzazione geologica-geomorfologica e dei dissesti 49

7.1.2 Analisi degli eventi pregressi 52

7.1.3 Rilievo dei blocchi al piede 57

7.1.4 Legge di frequenza dei volumi 63

7.1.5 Scelta del blocco di progetto per le analisi di propagazione 64

7.2 Analisi traiettografiche di propagazione tridimensionali 67

7.2.1 Validazione dei parametri di input 72

7.3 Calcolo del rischio per elementi a esposizione non unitaria *77*
7.3.1 Strade comunali 77
7.3.2 Piste forestali 79
7.3.3 Rete sentieristica 81
7.4 Calcolo del rischio per elementi a esposizione unitaria *89*
7.4.1 Analisi traiettografiche bidimensionali: assunzioni di calcolo 91
7.4.2 Scelta dei parametri di restituzione 92
7.4.3 Località Chandianaz 103
7.4.4 Località Parleaz 111
7.4.5 Località Bedeguaz 115
7.4.6 Località Fary 121
7.4.7 Località Gros-Breil 129
8 CONCLUSIONI **135**
9 BIBLIOGRAFIA **136**
10 ALLEGATI **138**

1 PREMESSA

La presente relazione è redatta ai sensi del contratto "Attività di ricerca finalizzata allo sviluppo di una metodologia per la valutazione del rischio su differenti tipologie di elementi esposti al pericolo di caduta massi" repertoriato al n° 1169/2019 del 12/12/2019 presso Politecnico di Torino – Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, avente come affidatario il Servizio Geologico della Regione Autonoma Valle d'Aosta (resp. Dott. Geol. Davide Bertolo).

Nell'ambito del contratto di ricerca sono previste le attività seguenti:

1. Ideazione e sviluppo di una metodologia per la valutazione quantitativa del rischio di caduta massi su varie tipologie di elementi a rischio;
2. applicazione della metodologia di cui al punto precedente ad un caso studio localizzato nei comuni di Saint-Denis, Chambave e Châtillon nella Regione Valle d'Aosta.

Il presente report di ricerca è stato redatto dal sottoscritto, Ing. Valerio De Biagi, responsabile scientifico della ricerca, dall'Ing. Maddalena Marchelli e dal Prof. Ing. Daniele Peila.

La documentazione consultata, cui si farà riferimento, è quella indicata nel seguito:

- Rapporto Tecnico "Servizio di rilievi, con tecniche laser-scan e fotogrammetriche, finalizzati alla progettazione di opere di mitigazione del rischio per fenomeni di caduta massi tra gli abitati di Chandianaz e Grand-Frayan nei Comuni di Chambave e Châtillon" a cura di IMAGEO S.R.L., datato 27 dicembre 2019;
- Elaborati grafici allegati al Rapporto Tecnico:
    - Allegato 1: risultati del rilievo geomeccanico;
    - Allegato 2: parametri geomeccanici;
    - Allegato 3: Volume Roccioso Unitario;
    - Allegato 4: Slope Mass Rating SRM.

L'attività di ricerca è stata svolta nell'ambito del centro Interdipartimentale SISCON (Safety of InfraStructures and CONstructions) del Politecnico di Torino a cui il responsabile scientifico della ricerca afferisce e nell'ambito delle attività del Rockfall Protection Laboratory del DIATI a cui afferiscono l'Ing. Marchelli e il prof. Peila.

.

2 FINALITÀ DEL LAVORO DI RICERCA

Il presente lavoro sviluppa lo studio di pericolosità e di rischio per fenomeno di caduta massi su un'area comprendente differenti porzioni di versanti, anche insistenti su più comuni. In questo ambito si parla di studio a "media scala", in cui le aree potenzialmente sorgenti di crollo sono multiple così come gli elementi potenzialmente a rischio.

Le analisi di rischio a questa scala devono prendere in considerazione il fatto che le aree studiate sono attraversate da infrastrutture di transito e sono caratterizzate dalla presenza di insediamenti abitati.

Per poter valutare in maniera omogenea gli effetti dei fenomeni naturali su differenti tipologie di opere è necessario ideare e codificare metodologie di indagine che forniscano risultati omogenei e confrontabili per i diversi elementi a rischio. Il presente lavoro di ricerca è pertanto finalizzato alla ideazione di metodologie per il calcolo del rischio associato al fenomeno di caduta massi su differenti tipologie di elementi, diversificati in elementi con esposizione non unitaria (ossia in movimento) e con esposizione unitaria (statici).

I risultati del lavoro di ricerca sono applicati ad un caso studio situato nei comuni di Saint-Denis, Chambave e Châtillon nella Regione Valle d'Aosta, comprendente un versante a differente acclività e di estensione pari a circa 180 ettari su cui insistono varie infrastrutture e centri abitati.

È importante infine sottolineare che, essendo uno studio a "media scala", considerando la vasta estensione dell'area, la presenza di un apparato vegetativo assai consistente e l'acclività del versante, non si esclude che non siano state individuate e/o dettagliate locali e puntuali pareti rocciose di piccola entità, non determinabili e differenziabili sulla base dei rilievi disponibili. Lo studio di queste situazioni specifiche è da demandare a osservazioni di dettaglio, non oggetto del presente documento, esulando dalle finalità del lavoro di ricerca.

3 ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ

3.1 Definizioni preliminari

La caduta massi rappresenta un fenomeno franoso di crollo particolarmente distruttivo considerando l'intensità potenzialmente in gioco (Volkwein *et al.*, 2011). Nel caso specifico della caduta massi, l'**intensità** è generalmente espressa in termini geometrici (volume del blocco) e meccanici (velocità, energia del blocco) e può essere definita sia all'inizio del fenomeno (zona di innesco) sia alla fine del fenomeno (zona di deposito). Questo valore può infatti ridursi per fenomeni di frantumazione dei blocchi o arresto lungo il percorso o, viceversa, incrementare per l'innesco di ulteriori crolli, eventualmente a sciame. Nell'ottica di uno studio probabilistico del fenomeno si possono identificare quindi probabilità di accadimento spaziale, temporale e di **intensità iniziale e finale. Viene inoltre definito tempo di ritorno il tempo medio che intercorre tra il verificarsi** di due successivi eventi di entità uguale o superiore ad un dato valore di intensità (Fell, 1994).

La **pericolosità** si configura come la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di una certa intensità si verifichi in un certo periodo di tempo in una certa area. Qualora non sia presente il termine temporale si parla di **pericolosità relativa**.

L'**analisi della pericolosità** è un processo che mira alla valutazione della probabilità di accadimento spaziale e temporale di un fenomeno di data intensità. La creazione di mappe di pericolosità (suddivisione del territorio in zone caratterizzate da differenti livelli di pericolosità) permette poi di valutare i potenziali elementi a rischio (§4) e condurre un analisi del rischio (§5,6).

Nel caso specifico della caduta massi l'analisi è generalmente condotta al fine di valutare la pericolosità nelle aree di transito o arresto del blocco (fondovalle), partendo dalla definizione di un evento con una determinata intensità iniziale e tempo di ritorno, ossia scegliendo uno specifico **scenario** con cui condurre l'analisi.

L'analisi della pericolosità può essere effettuata sia con metodi quantitativi che qualitativi (Corominas *et al.*, 2005; Corominas e Moya, 2008; Corominas *et al.*, 2014). Nel presente lavoro sono illustrate metodologie di tipo quantitativo.

3.2 Metodologia

Alla luce di quanto espresso al §3.1, le fasi di un'analisi di pericolosità risultano quindi:

1. **Identificazione del fenomeno potenzialmente distruttivo**: ossia valutazione della tipologia e localizzazione delle possibili sorgenti d'innesco ed eventuale possibile zona di arrivo. Questa fase può essere condotta mediante uno studio accurato dei dati cartografici e storici di dettaglio presenti e/o mediante rilievi in situ finalizzati a studiare le condizioni delle pareti rocciose. Lo studio delle condizioni dell'ammasso roccioso, delle caratteristiche delle discontinuità presenti permette infatti di definire i cinematismi potenzialmente attivabili unitamente alle volumetrie d'innesco potenzialmente in gioco, nonché fornire indicazioni sulla propensione al distacco. Lo studio del terreno e degli eventi passati, mediante anche fotointerpretazione, permette invece di definire sia i possibili percorsi di caduta, che di

dare indicazioni sulla possibile frammentazione del blocco e quindi del volume di arrivo dei blocchi. Dall'analisi dei danni è inoltre possibile risalire in via qualitativa alle energie potenzialmente in gioco. Questi ultimi due punti risultano molto utili per la valutazione della probabilità di occorrenza spaziale di cui al punto 3 del presente elenco.

2. **Definizione di uno o più scenari possibili**, ossia identificare la volumetria di partenza, anche sulla base di relazioni volume/tempo di ritorno. La determinazione di tale legame è dettagliata al §3.2.1. Lo studio delle condizioni geomeccaniche della parete unitamente ai rilievi dei blocchi al piede e all'analisi storica permettono di dare indicazioni utili per la definizione di uno scenario.
3. Valutazione della probabilità di occorrenza **spaziale**. All'interno di questa fase ricade quindi *l'analisi di propagazione* del fenomeno, a partire dallo scenario d'intensità considerato. Il presente lavoro adotta metodi quantiativi con un approccio geotecnico-ingegneristico. La modellazione del fenomeno è effettuata dopo una serie articolata di indagini affinché il modello cinematico scelto sia fisicamente basato e i parametri di input siano accurati. Come dettagliato al §3.2.2, la modellazione del fenomeno di caduta massi è effettuata attraverso *modelli traiettografici* i quali possono essere sia rigorosi (il blocco è simulato con la sua forma e massa e vengono considerati tutti i tipi di moto) che lumped-mass (il blocco ma massa concentrata in un punto e il moto di rotazione è semplificato), sia bidimensionali che tridimensionali. I parametri di input possono essere inoltre forniti sia in maniera deterministica che come quantità probabilistiche, vincolando quindi la tipologia di analisi. Nel presente lavoro l'analisi condotta è di tipo probabilistico, ossia i parametri sono presi casualmente all'interno di un range e il fattore di sicurezza è fornito come una distribuzione di probabilità. Per analisi di porzioni di territorio particolarmente estese il presente lavoro si avvale di un modello traiettografico tridimensionale ibrido di tipo semiprobabilistico, come dettagliato al §3.2.2 e, nello specifico del software scelto, al §7.2 della presente.
4. La probabilità di occorrenza **spazio-temporale**, dati i risultati dell'analisi di propagazione, può essere espressa come il rapporto tra la probabilità di accadimento spaziale e il tempo di ritorno del fenomeno. Per analisi di porzioni di territorio particolarmente estese, come nel caso in esame, la mappatura della probabilità di occorrenza spazio-temporale risulta particolarmente complessa, non disponendo spesso di informazioni sul dato temporale. Pertanto, questa viene svolta concentrandosi nelle prossimità degli elementi potenzialmente a rischio, sulla base degli eventi pregressi, solitamente riportati nel catasto dei dissesti che le Pubbliche Amministrazioni costantemente aggiornano e registrati in prossimità degli elementi stessi. Indicazioni sono fornite nel §5 ed applicate nel §7.3 della presente.
5. Valutazione dell'**intensità di arrivo**. Nell'ottica di valutare gli elementi a rischio su cui condurre eventualmente un'analisi di rischio finalizzata alla gestione dello stesso risulta utile poter disporre, unitamente alla probabilità di occorrenza spaziale, di una quantificazione energetica (e, nel caso di caduta massi, anche delle altezze di transito) in specifici punti del versante, e.g. in corrispondenza di elementi sensibili. Occorre tuttavia considerare che, per analisi su porzioni di territorio molto estese, una valutazione energetica accurata deve prevedere una modellazione di dettaglio per ogni singolo

elemento a rischio, a valle di rilievi di dettaglio, eventualmente avvalendosi di modelli numerici differenti. Indicazioni sono fornite nel §6 della presente e applicate nel §7.4.

3.2.1 Volume e tempo di ritorno per la definizione dello scenario

La costruzione di un legame volume/tempo di ritorno, detta anche legge di frequenza dei volumi, è svolta in accordo a quanto riportato in De Biagi *et al.* (2017). L'ipotesi di base del metodo proposto consiste nella separazione concettuale tra l'analisi dei volumi e quella delle occorrenze temporali. I primi sono ricavabili dal rilievo della bloccometria alla base della parete mentre l'aspetto temporale è ricostruito a partire dagli eventi pregressi, solitamente riportati nel catasto dei dissesti che le Pubbliche Amministrazioni costantemente aggiornano. La Figura 1 riporta uno schema concettuale della procedura: $\mathcal{C}$ indica il catalogo nel quale sono annotati tutti i blocchi, con indicazione del volume, di cui è noto l'istante di crollo (Catasto Dissesti); $\mathcal{F}$ è la lista nella quale sono riportate le dimensioni dei blocchi presenti nell'area rappresentativa, indipendentemente dal momento in cui il crollo è avvenuto.

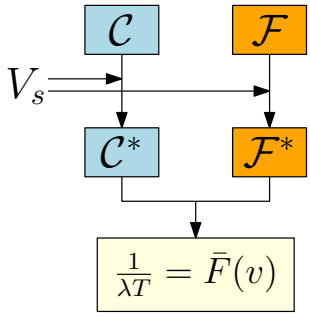


Figura 1. Schema concettuale per la costruzione di una legge di frequenza dei volumi.

Poiché le registrazioni riportate all'interno del Catasto Dissesti sono il frutto di osservazioni eseguite manualmente, è possibile che alcuni piccoli blocchi non siano stati rilevati e pertanto non sono contenuti all'interno del catasto. Per superare tale problema è necessario introdurre un volume di soglia V_s definito come la dimensione del blocco che, se è crollato, è stato certamente osservato. Una volta individuato tale valore si eliminano dal catalogo e dalla lista, tutti gli eventi ed i dati rilevati con volume inferiore a V_s ottenendo così il catalogo ridotto $\mathcal{C}^*$ e la lista ridotta $\mathcal{F}^*$. A questo punto si hanno a disposizione tutte le informazioni necessarie a calcolare la curva di interesse.

Si costruiscono quindi due modelli probabilistici: uno per il processo delle occorrenze, l'altro per la distribuzione dei volumi dei blocchi al piede, entrambi di volume superiore a V_s. Quando il volume di soglia è sufficientemente elevato, il processo delle occorrenze tende a seguire la legge degli eventi rari, per la quale il numero di eventi annuo rispetta la legge probabilistica di Poisson. La legge di distribuzione dei volumi dei blocchi al piede è invece una legge di potenza (legame di tipo frattale).

Il tempo di ritorno di un generico volume è il risultato del prodotto dei due distinti processi probabilistici. Pertanto, il volume distaccato avente un tempo di ritorno pari a T, v_T, è valutato come

$$v_T = F_V^{-1}\left(1 - \frac{1}{\lambda T}\right), \tag{3.1}$$

dove $F_V^{-1}(\cdot)$ è l'inversa della funzione densità cumulata relativa alla distribuzione delle volumetrie al piede della parete e λ è il numero medio di eventi di crollo all'anno.

La distribuzione di Poisson è una funzione ad un solo parametro, detto parametro di frequenza λ, il cui valore è ottenibile attraverso il rapporto:

$$\lambda = \frac{n^*}{t^*}, \tag{3.2}$$

dove n^* è il numero di eventi presenti nel catalogo ridotto $\mathcal{C}^*$, ossia è il numero di eventi con blocchi aventi volume superiore a V_s. La durata corretta di osservazione, t^*, è data dalla seguente espressione:

$$t^* = t + \frac{t}{2n^*}, \tag{3.3}$$

dove t è la durata (in anni) del reale periodo di osservazione. La Eq. (3.3) considera che il periodo di osservazione inizia con un evento di volumetria superiore a V_s. Qualora nell'area non fossero mai stati registrati crolli sarebbe necessario fare delle ipotesi circa il processo delle occorrenze dei crolli di roccia. Una stima ragionevole di t^* sarebbe rappresentata dalla durata del periodo di osservazione della parete (ove non si sono mai verificati eventi).

La distribuzione delle volumetrie al piede è descrivibile attraverso una distribuzione di Pareto, la quale appartiene alla classe delle distribuzioni con legge di potenza. Si possono utilizzare in maniera alternativa due differenti distribuzioni: la distribuzione Pareto I o la distribuzione Pareto II. La distribuzione Pareto I è una funzione a due parametri:

$$F_V(v) = 1 - \left(\frac{v}{\mu}\right)^{\alpha}, \tag{3.4}$$

dove μ è il parametro di posizione e α è il parametro di forma. La distribuzione Pareto II è una funzione a tre parametri:

$$F_V(v) = 1 - \left(1 + \xi\frac{v - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}, \tag{3.5}$$

dove σ è il parametro di scala, μ è il parametro di posizione, ξ è il parametro di forma.

In entrambe le espressioni il parametro di posizione condiziona l'estensione del campo di validità della distribuzione di probabilità. Siccome valori di volumetria inferiori al volume di soglia non sono considerati, il parametro di posizione assume valore pari a $\mu = V_s$ in entrambe le distribuzioni.
I valori degli altri parametri della Pareto I e della Pareto II devono essere valutati con metodi matematici basati sul principio di massima verosimiglianza. Per quanto attiene al parametro di forma α della Pareto I, questo può essere determinato come

$$\alpha = N\left[\sum_{i=1}^{N} \ln\left(\frac{v_i}{V_s}\right)\right]^{-1}, \tag{3.6}$$

dove v_i sono i singoli volumi contenuti nella lista ridotta $\mathcal{F}^*$, ossia i volumi misurati al piede maggiori di V_s e N è il numero totale di misurazioni nella lista ridotta $\mathcal{F}^*$. Per quanto attiene ai parametri di forma ξ e di scala σ della distribuzione Pareto II non esistono espressioni specifiche che consentono di valutare tali fattori. Pertanto, è necessario utilizzare tecniche numeriche avanzate, disponibili su software di analisi dati, quali MATLAB. Definiti tutti i parametri delle distribuzioni è possibile riportare la legge di frequenza in termini di tempo di ritorno di un volume specifico oppure di volume avente un dato tempo di ritorno. Qualora si fosse adottata la **distribuzione Pareto I** per descrivere la distribuzione delle volumetrie al piede risulterebbe che la relazione che lega il volume del blocco v ed il corrispondente tempo di ritorno T è:

$$T(v) = \frac{1}{\lambda}\left(\frac{v}{\mu}\right)^{\alpha}. \tag{3.7}$$

Analogamente si può ricavare il volume corrispondente ad un dato tempo di ritorno T:

$$v(T) = \mu(\lambda T)^{1/\alpha}. \tag{3.8}$$

Qualora si fosse adottata la **distribuzione Pareto II** per descrivere la distribuzione delle volumetrie al piede risulterebbe che la relazione che lega il volume del blocco v ed il corrispondente tempo di ritorno T è:

$$T(v) = \frac{1}{\lambda}\left(1 + \xi\frac{v-\mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{\xi}}. \tag{3.9}$$

Analogamente si può ricavare il volume corrispondente ad un dato tempo di ritorno T:

$$v(T) = \mu + \left[(\lambda T)^{\xi} - 1\right]\frac{\sigma}{\xi}. \tag{3.10}$$

3.2.2 Analisi di propagazione

La valutazione delle potenziali aree di invasione e della probabilità di passaggio e arresto dei blocchi sono di fondamentale importanza all'interno del processo di analisi della pericolosità. Lo studio di come il fenomeno di caduta massi può propagarsi, ossia i percorsi dei blocchi e le distanze potenzialmente raggiunte da questi permette, infatti, di individuare i potenziali elementi a rischio.

Per analizzare il movimento di caduta, rimbalzo, rotolamento e/o scivolamento dei blocchi possono essere utilizzati differenti approcci, generalmente suddivisibili in modelli di tipo morfologico (o empirici) e modelli fisicamente basati (o cinematici).

Il presente lavoro, concentrandosi su una scala "media", propone l'adozione di modelli cinematici, ossia che valutano il moto dei blocchi in modo analitico e descrivono il comportamento del sistema considerando la fisica del moto, pur adottando ipotesi semplificative. Nonostante le incertezze associate ai modelli stessi, questi risultano infatti affidabili e robusti se vengono limitate le incertezze sugli scenari da considerare e sul valore dei parametri del moto che influenzano il comportamento. Pertanto, si osserva come lo studio del fenomeno e dell'area e la definizione di scenari realistici debbano essere effettuati ricercando la massima accuratezza. Lo studio dell'area deve essere anche mirato a minimizzare l'aleatorietà insita nella determinazione dei dati di input e, tra questi, dei parametri del moto. I dati di input solitamente richiesti sono:

- topografia dell'area ed eventuali ostacoli nel moto;
- localizzazione dell'area sorgente;
- proprietà geometriche e meccaniche del blocco;
- caratteristiche del terreno su cui potenzialmente impatta il blocco.

I modelli cinematici impiegati per descrivere il fenomeno di caduta massi generalmente richiedono, in vece delle caratteristiche del terreno, i valori dei parametri che permettono la descrizione dell'interazione blocco-terreno, come, a titolo di esempio, i coefficienti di restituzione normale e tangenziale. Questi ultimi sono i rapporti tra la velocità post- e pre-impatto di un blocco in direzione normale e tangenziale. Si osserva come questi parametri possono contenere incertezze sia legate al modello stesso (incertezza epistemica) che alla determinazione in sito di questi parametri (incertezza ontica). Per questo motivo, alcuni dati di input sono solitamente forniti in maniera probabilistica (e non deterministica) all'interno di un possibile range di valori, tanto più piccolo il range, maggiore è l'accuratezza del dato. Ne consegue che i risultati, ossia le traiettorie e i parametri cinematici (velocità, altezza), sono forniti in termini probabilistici. Proprio per tale motivo occorre parlare di "*probabilità di occorrenza spaziale*" ossia la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo (nel caso il transito di blocchi in caduta) si verifichi in una data area. Affinché i risultati siano rappresentativi del problema occorre quindi anche che il numero di simulazioni effettuate sia sufficientemente alto da costituire un campione statistico rappresentativo e comprendere il maggior numero di traiettorie che i blocchi possono intraprendere lungo il versante.

Riferendosi nello specifico ai modelli cinematici, quelli ad oggi impiegati sono suddivisibili in:

- rigorosi o "rigid body" (considerano il blocco con la sua propria forma e volume, considerano tutti i tipi di moto);
- stereomeccanici o "lumped-mass" (considerano la massa del blocco concentrata in un punto e spesso trascurano il moto di rotazione);
- ibridi.

Si osserva come spesso nei modelli rigorosi i parametri che permettono la descrizione dell'interazione blocco-terreno siano effettivamente rappresentativi delle caratteristiche del terreno su cui potenzialmente impatta il blocco e non debbano compensare quindi le semplificazioni dei modelli lumped-mass. In ultimo, i modelli possono essere bidimensionali, ossia la direzione del percorso di moto del blocco è univocamente definita, o tridimensionali, qualora si consideri l'intera topografia del versante.

Il presente lavoro, operando a "media scala" si avvale di un modello ibrido tridimensionale (vedasi il §7.2 per maggiori dettagli circa la tipologia di modello e i parametri di input adottati) in cui i parametri che descrivono l'interazione del modello sono parzialmente affetti da incertezze epistemiche e, quindi, il loro valore può essere per lo più definito da rilievi in sito. Nonostante ciò, qualora possibile, risulta opportuno calibrare e/o validare i valori adottati dai parametri. Nello spirito di lavorare su una "media scala", l'esecuzione di una back-analysis completa risulta non di facile esecuzione. Una back-analysis mira a simulare nel migliore modo possibile un crollo osservato e a determinare da queste osservazioni i valori dei parametri che meglio rappresentano l'interazione suolo-blocco. Tale operazione presuppone però la conoscenza della zona di innesco, della volumetria, della presenza di eventuali interferenze lungo il percorso e della zona di arrivo di uno specifico evento di crollo per cui quindi si conosce la traiettoria. Nel caso di informazioni mancanti o di analisi su grande scala questo tipo di calibrazione non risulta sempre possibile. Ricadendo il presente studio in questa ultima categoria, il §7.2.1 propone una metodologia di validazione e verifica dei parametri scelti.

L'utilizzo di un modello ibrido tridimensionale presenta alcuni vantaggi, come di seguito elencato:

- un modello ibrido risulta particolarmente idoneo alla media scala in cui quindi la natura geometrica dei blocchi è varia e difficilmente puntualmente descrivibile;
- la tridimensionalità del modello permette inoltre di identificare tutti i percorsi dei blocchi maggiormente probabili, tenendo conto della topografia del sito stesso. Pertanto la risoluzione del modello digitale di elevazione che fornisce la base topografica di input incide notevolmente sulla bontà del risultato.

In merito allo scenario con cui condurre l'analisi, il presente lavoro suggerisce di adottare un volume ragionevolmente cautelativo (desunto da osservazioni e misure) per poter valutare la probabilità che un evento di caduta massi di volume inferiore o uguale a quello simulato si verifichi in una data area. Questa scelta è dovuta sia alla scala di lavoro "media" scala, sia il fatto che si assume, come meglio specificato al §5, che per

alcuni elementi potenzialmente a rischio, il rischio di incidente fatale sia indipendente dal volume del blocco stesso. In questo ambito, quindi, risulta ampiamente giustificabile la definizione della probabilità di occorrenza spaziale, priva quindi del termine temporale.

4 ELEMENTI A RISCHIO

Gli elementi rappresentano l'oggetto di un'analisi di rischio. Si può affermare che alla presenza di un elemento è collegata l'esistenza di un rischio sullo stesso. In assenza di elemento il rischio è nullo. Volendo fare riferimento all'interazione tra il fenomeno di caduta massi e il mondo antropizzato, l'insieme degli "elementi a rischio" comprende – ma non è limitato a – tutti manufatti che possono essere localizzati su un versante montano. Questi sono rappresentati dalle infrastrutture di transito (strade asfaltate, strade sterrate, vie ferrate, rete sentieristica), dalle infrastrutture dei servizi (elettrodotti AT/MT, rete elettrica a BT, rete telefonica, acquedotto, fognature, canali irrigui) e dalle costruzioni (abitazioni, autorimesse, capannoni, industrie, edilizia a servizio dell'agricoltura). La Figura 2 riporta una vista aerea di una zona di versante sovrastata da una parete rocciosa su cui insistono vari elementi a rischio (ferrovia, strade asfaltate, abitazioni, sentieri).

Figura 2. Vista di una zona di versante con vari elementi a rischio caduta massi (fabbricati, strade, sentieri).

La quantificazione del rischio può prendere in considerazione il grado di danno in termini di costo di riparazione di un bene danneggiato (rischio fisico), la perdita di vita umana e il danno in relazione all'utilità sociale del bene (rischio sociale), il disagio in merito alle attività coinvolte e al raggiungimento di queste (rischio economico).

La presente trattazione è riferita essenzialmente al rischio sociale, ossia la perdita di vita umana. Nella sua formulazione più generale, il rischio è il prodotto tra pericolosità, esposizione e danno (Fell, 1994). In riferimento al rischio sociale, il termine dell'esposizione identifica la percentuale di tempo per la quale una persona è potenzialmente interessata dal fenomeno naturale. L'esposizione, essendo un rapporto tra durate, è

una quantità compresa tra 0 e 1. Considerando per esempio una strada, è possibile affermare che per gli utenti che si muovono lungo la via di comunicazione la loro esposizione è limitata al solo periodo di transito. In altre parole, considerato che una strada non è costantemente percorsa da automezzi, si può facilmente affermare che l'esposizione al pericolo di caduta massi è inferiore all'unità in quanto esistono dei momenti in cui la strada non è percorsa da nessuno. Occorre tuttavia prestare attenzione al fatto che il presente studio è finalizzato al calcolo del rischio sociale; qualora si fosse interessati al rischio economico derivante, per esempio, dall'impatto del blocco roccioso sull'asfalto, l'infrastruttura avrebbe esposizione unitaria.
Il precedente esempio ci fa comprendere che ci sono alcuni elementi in cui la presenza umana potrebbe essere continuativa, quali le abitazioni. In tale caso si parlerà di elemento con esposizione unitaria.

Ricapitolando, sono considerati elementi con **esposizione non unitaria**:

- le strade asfaltate;
- le piste forestali;
- la rete sentieristica;
- la ferrovia.

Sono considerati elementi con **esposizione unitaria**:

- tutti gli agglomerati in cui sono presenti edifici costantemente occupati (abitazioni).

Le procedure per l'analisi di rischio di elementi con esposizione non unitaria sono riportate al §5, mentre per quelli per elementi con esposizione unitaria si rimanda al §6.

5 CALCOLO DEL RISCHIO PER ELEMENTI CON ESPOSIZIONE NON UNITARIA

5.1 Premessa metodologica

Il presente paragrafo tratta del calcolo del rischio su elementi con esposizione non unitaria, ossia sulle infrastrutture di transito, quali strade o sentieri, che si snodano lungo il territorio. Le metodologie proposte nel seguito si inquadrano all'interno delle procedure per la quantificazione del rischio (Corominas *et al.*, 2005; Ferrari *et al.*, 2016; Bunce *et al.*, 1997; Ferlisi *et al.*, 2012; Macciotta *et al.*, 2016, 2017). La scelta di differenziare gli elementi lineari da quelli puntuali è dettata dal fatto che i primi possono essere suddivisi in porzioni di lunghezza anche differente sulla base di una qualche caratteristica/proprietà quale, ad esempio, la probabilità spaziale di invasione del fenomeno di caduta massi. Tale possibilità è alla base delle metodologie sviluppate e dettagliatamente riportate nel seguito del presente capitolo.

Il rischio è espresso in termini di numero di vittime/anno o, se si tratta di strade asfaltate o piste forestali, di probabilità annua che una o più persone a bordo di un veicolo perdano la vita a seguito di un fenomeno di caduta massi, se si tratta di sentieri, di probabilità annua che uno o più escursionisti perdano la vita a seguito di un fenomeno di caduta massi, se si tratta di ferrovia, di probabilità annua che una o più persone a bordo del convoglio perdano la vita a seguito di un fenomeno di caduta massi. Le metodologie proposte nel seguito sono una implementazione di un approccio proposto dagli Autori per la rete sentieristica (Marchelli *et al.*, 2020), da Peila e Guardini (2008) e da Mignelli *et al.* (2012) per le infrastrutture stradali con traffico elevato.

Gli approcci proposti si basano sull'applicazione del metodo probabilistico dell'albero degli eventi (ETA, Event-Tree Analysis), che consiste nel definire e valutare tutte le possibili evoluzioni di un dato fenomeno naturale (o meno) partendo da un singolo evento iniziatore (nel presente caso, il distacco di un blocco di roccia). Partendo quindi dall'accadimento di un evento iniziatore (Mineo *et al.*, 2017), vengono analizzati tutti i possibili "percorsi", ossia vengono individuati tutti i possibili scenari, mappati come "ramificazioni" (o rami) di un albero, connessi tra loro mediante "nodi" (Peila e Guardini, 2008). I singoli rami permettono la transizione da un nodo all'altro lungo il percorso, definendo alternative binarie (Si/No, ovvero Accade/Non Accade), fino al raggiungimento dello stato o effetto finale. A ciascun ramo è associata una probabilità. Essendo le alternative binarie mutuamente esclusive, la somma delle probabilità in uscita da ogni nodo è pari a 1. Questo metodo, analizzando tutte le combinazioni, ossia gli stati del sistema, permette di individuare tutte le possibili conseguenze e la loro probabilità di accadimento. I percorsi costruiti, mutuamente esclusivi, sono causati dal contemporaneo verificarsi di tutti gli eventi appartenenti ai rami dell'albero che li definiscono. Pertanto, considerando quindi un unico percorso, che conduce quindi ad un unico esito, la sua probabilità di accadimento è data dal prodotto delle probabilità associate ad ogni ramo di tale percorso. Considerando invece il più percorsi, la loro probabilità risulterà pari alla somma delle probabilità del verificarsi di ciascun singolo percorso.

Per il fenomeno naturale in esame, l'evento di crollo (o distacco di un blocco) a cui è associata una frequenza media di accadimento (pari al numero medio di blocchi all'anno) o un tempo di ritorno (ossia la distanza temporale media tra due eventi successivi) è definito come "evento iniziatore". Considerato quindi il transito del blocco lungo il tratto di elemento lineare in esame e il passaggio di un veicolo/treno/escursionista come due eventi indipendenti, la probabilità che essi si verifichino contemporaneamente è data dal prodotto delle singole probabilità. Considerando tutti i possibili percorsi/scenari che conducono ad una fatalità (vittima), si possono così comporre i vari fattori e pervenire ad un valore di rischio (su base annua) relativo ad incidenti con esito mortale ad incidenti con esito non mortale. In virtù dello stesso principio, scomponendo per esempio una strada in parti omogenee, il rischio associato all'intero elemento a rischio (in termini di numero di vittime all'anno) è dato dalla somma dei rischi associati ad ogni singola parte. Similmente, considerando più scenari di crollo (tra loro statisticamente indipendenti), ossia provenienti da aree sorgenti differenti ma insistenti su uno stesso tratto di infrastruttura, è possibile sommare rischio associato a ciascuno dei singoli scenari di crollo per ottenere il rischio complessivo su quel tratto. Come successivamente dettagliato per ogni elemento a rischio, gli alberi degli eventi proposti sono applicabili ad ogni tipologia di crollo di massi, indipendentemente dal volume.

Si riportano ora delle considerazioni comuni a tutte le analisi di rischio descritte nel seguito del presente capitolo. In generale, un elemento lineare si sviluppa tra due specifici punti del territorio. È opportuno suddividere il percorso dell'elemento lineare in porzioni omogenee per aree sorgenti insistenti su esso e/o per condizioni di traffico. Tali frazioni sono definite con il nome di "porzioni" nel seguito della presente. Si anticipa che sarebbe bene che le porzioni abbiano lunghezza compresa tra 50 m e 100 m. Ogni porzione, a sua volta, è costituita da diverse "sotto-porzioni" omogenee per probabilità di occorrenza spaziale, ossia per probabilità di raggiungimento dei blocchi.

Nel caso più generale possibile, un tratto di strada può essere interessato da crolli provenienti da più di una zona sorgente, ossia da differenti pareti rocciose. Per la *i*-esima zona sorgente, il fenomeno iniziatore, ossia il distacco di un blocco di roccia dalla parete rocciosa, è caratterizzato da una frequenza annua di accadimento N_D^i espressa come numero di eventi in un determinato arco di tempo, solitamente su base annua. Le metodologie di seguito illustrate considerano il termine N_D come "numero di eventi all'anno". È doveroso ricordare che, qualora il numero di eventi all'anno sia esiguo, è possibile confondere la frequenza annua di accadimento con la probabilità annua di accadimento del crollo di roccia (distacco). In tale caso, questa sarà indicata come $P_{(D)}^i$, in riferimento alla *i*-esima zona sorgente. Una volta distaccatisi, i blocchi possono raggiungere l'elemento a rischio con una certa probabilità $P_{(T:D)}^i$. Tale probabilità è stimata mediante analisi di propagazione del fenomeno. I blocchi che si arrestano lungo il pendio non causano invece danno.

Il calcolo del rischio presuppone che sia nota la frequenza degli eventi iniziatori, ossia il numero annuo di distacchi dalle pareti rocciose. A causa dell'impossibilità di monitorare in maniera sufficientemente dettagliata il versante e per l'ampiezza dell'arco temporale necessario per una robusta analisi statistica, il numero annuo

di distacchi da ciascuna area sorgente è un'informazione nella pratica impossibile da ottenere, se non per limitati e specifici casi (ad esempio quando la parete scarica direttamente sull'elemento a rischio).

Per ovviare a tale inconveniente, il gruppo di ricerca ha sviluppato una procedura semplificata che prende in considerazione solo gli eventi che possono interessare l'elemento a rischio, indipendentemente dal numero di aree sorgente presenti. Tale procedura è coerente con le informazioni temporali che sono contenute nel catasto dei dissesti che le Pubbliche Amministrazioni costantemente aggiornano, dove si tiene traccia dell'istante di crollo e delle volumetrie che hanno interessato ogni infrastruttura.

Individuate le possibili zone sorgenti insistenti su un elemento a rischio e valutata la frequenza media degli eventi che si sono verificati in passato (e che potranno verificarsi in futuro) e che hanno raggiunto l'elemento a rischio, è possibile individuare una frequenza di crollo specifica, eventualmente diversificata per tratti. Nel seguito è definito con il termine "tratto" l'intero percorso dal punto iniziale al punto finale del percorso.

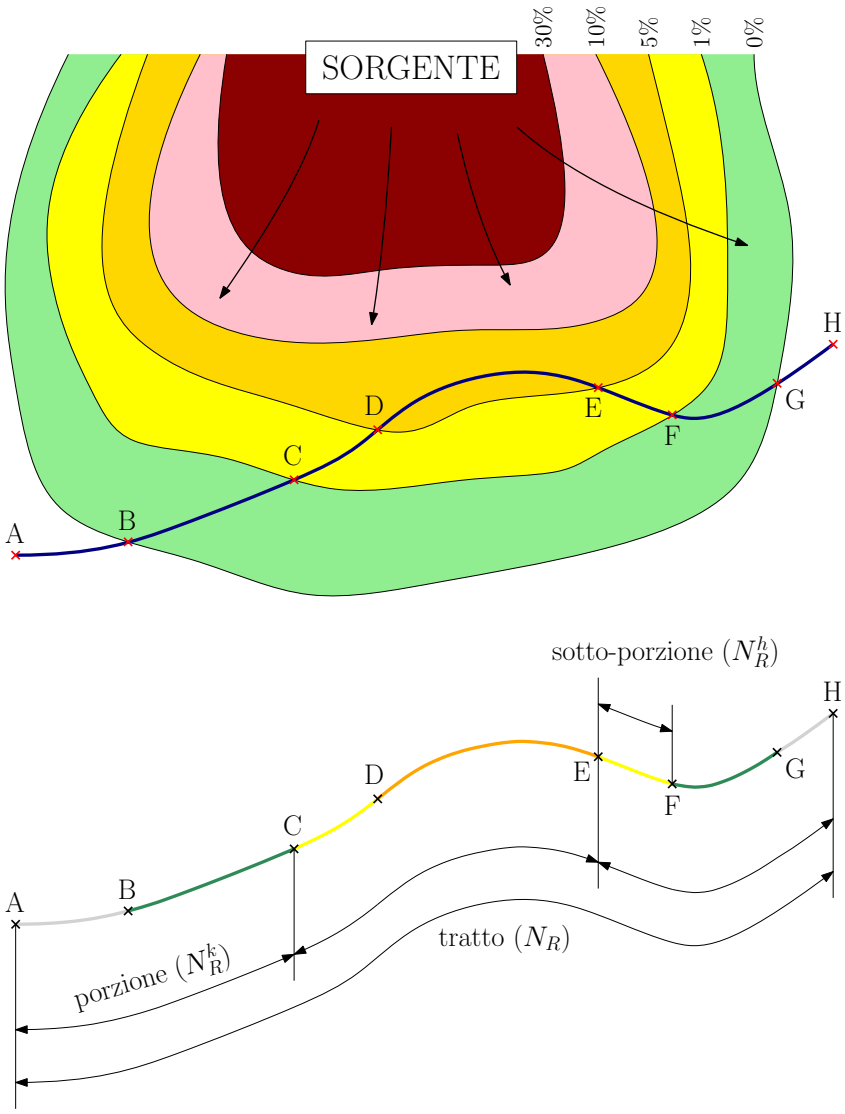


Figura 3. In alto è riportato uno schema di una porzione di territorio su cui insiste un pericolo di caduta massi a partire da una sorgente opportunamente identificata. Sono indicate le probabilità di raggiungimento. In basso è riportato lo schema sintetico del tratto di strada con indicate, per scala di colore, le probabilità spaziali di invasione.

Per meglio illustrare la procedura semplificata si consideri lo schema riportato in Figura 3. In alto è indicata una mappa della probabilità di raggiungimento a partire da un'area sorgente del fenomeno di crollo. In prossimità della zona di distacco le probabilità di raggiungimento sono maggiori e decrescono via a via che ci si allontana dalla sorgente. Le linee di isoprobabilità di raggiungimento riportate in nero identificano dei campi di colore differente. In blu scuro è riportato il tracciato dell'infrastruttura. Sono identificati con le lettere da A a H i punti di intersezione dell'elemento a rischio con le linee di isoprobabilità 0%, 1% e 5%. A sinistra del punto B (A-B) la probabilità di invasione è nulla, così come a destra del punto G. (G-H)

Dall'informazione disponibile al catasto dissesti si evince che il numero annuo di eventi di crollo che hanno raggiunto l'intero tracciato dell'infrastruttura (ossia quindi il "tratto" tra A e H) è pari a N_R.

Il tratto viene a sua volta suddiviso in porzioni omogenee per aree sorgenti e condizioni di traffico di lunghezza compresa tra 50 e 100 m (e.g. A-C, C-E, E-H).

La Figura 3 mostra come ogni porzione sia a sua volta scomponibile in sotto porzioni aventi stessa probabilità di raggiungimento. A titolo di esempio, la sotto-porzione compresa tra i punti D e E è caratterizzata da una probabilità di invasione maggiore della sotto-porzione, ad esempio, compresa tra i punti E e F. Si può dedurre che, a parità di lunghezza, il numero annuo di eventi sulla sotto-porzione CD è maggiore del numero di eventi sulla sotto-porzione EF visto che, se crollano, i blocchi hanno maggiore probabilità di raggiungere la prima (CD).

Sulla base di questa semplice considerazione, noto il numero annuo di eventi di crollo N_R che raggiungono l'elemento a rischio (nel suo complesso), è possibile attribuire alla *h*-esima sotto-porzione una frequenza specifica calcolata come

$$N_R^h = \frac{P_{(T:D)}^h \ell_h}{\sum_{h=1}^{n} P_{(T:D)}^h \ell_h} N_R \qquad (5.1)$$

dove $P_{(T:D)}^h$ e ℓ_h sono, rispettivamente, la probabilità spaziale di invasione e la lunghezza della *h*-esima sotto-porzione. La sommatoria a denominatore è estesa alle *n* sotto-porzioni che compongono il tratto di elemento a rischio. L'Eq. (5.1) nient'altro è che una distribuzione del valore N_R pesata per il termine $P_{(T:D)}\ell$.

In riferimento alla *k*-esima porzione, a sua volta composta da *m* sotto-porzioni, risulta:

$$N_R^k = \frac{\sum_{h=1}^{m} P_{(T:D)}^h \ell_h}{\sum_{h=1}^{n} P_{(T:D)}^h \ell_h} N_R \qquad (5.2)$$

Per esempio, in riferimento al caso riportato in Figura 3, è possibile valutare il numero di eventi sulla porzione CE come

$$N_R^{CE} = \frac{P_{(T:D)}^{CD} \ell_{CD} + P_{(T:D)}^{DE} \ell_{DE}}{P_{(T:D)}^{AB} \ell_{AB} + P_{(T:D)}^{BC} \ell_{BC} + P_{(T:D)}^{CD} \ell_{CD} + P_{(T:D)}^{DE} \ell_{DE} + P_{(T:D)}^{EF} \ell_{EF} + P_{(T:D)}^{FG} \ell_{FG} + P_{(T:D)}^{GH} \ell_{GH}} N_R \qquad (5.3)$$

Nel seguito sono dettagliatamente descritti i diagrammi ad albero (ETA) per gli elementi a rischio identificati al precedente §4. Per l'applicazione di questa metodologia si rimanda al §7.3 della presente.

5.2 Metodo ETA per una strada asfaltata

Qualora la traiettoria raggiunga il tracciato stradale, il blocco può colpire, o meno, un veicolo in transito. Nel caso in cui la collisione avvenga, questa può comportare, o meno, vittime. Nel caso, invece, in cui il blocco non colpisca il veicolo, è possibile che si arresti sulla sede stradale o rimbalzi. Nel primo caso, il masso sulla strada rappresenta un ostacolo per il guidatore, il quale può urtare il blocco oppure può schivarlo. Nel caso di urto, è possibile che vi siano, o meno, vittime. Nel caso di rimbalzo sulla sede stradale, è ipotizzabile che questa venga danneggiata o meno. Nel caso di formazione di una buca, il veicolo in transito che non riesce a schivare tale ostacolo può sbandare e anche uscire di strada, con conseguente incidente con vittima. Lo schema concettuale alla base delle precedenti considerazioni è riportato in Figura 4.

Occorre precisare che il metodo proposto assume che l'albero di eventi precedentemente esposto sia applicabile ad ogni tipologia di crollo di massi. In altre parole, non si prende in considerazione l'effetto del volume sui possibili scenari che si potrebbero generare (differenziando l'albero in funzione del volume). Questa assunzione trova giustificazione nelle elevate velocità, e quindi nelle energie, che anche volumi di piccola dimensione possono raggiungere in fase di crollo. Pertanto, il numero di eventi all'anno tiene in considerazione il distacco di blocchi di qualsivoglia volume.

Definite le varie probabilità dei nodi dell'albero degli eventi, vedasi la Figura 5, è possibile determinare la probabilità finale di ciascun scenario, identificato dal percorso creato dai rami lungo l'albero, moltiplicando le probabilità dei singoli rami costituenti il percorso considerato. Considerando che il tratto stradale è diviso in porzioni omogenee, la probabilità totale relativa a tutti i percorsi con stesso esito (ad esempio, incidente con vittima) della porzione stradale analizzata è calcolata quale la somma delle singole probabilità.

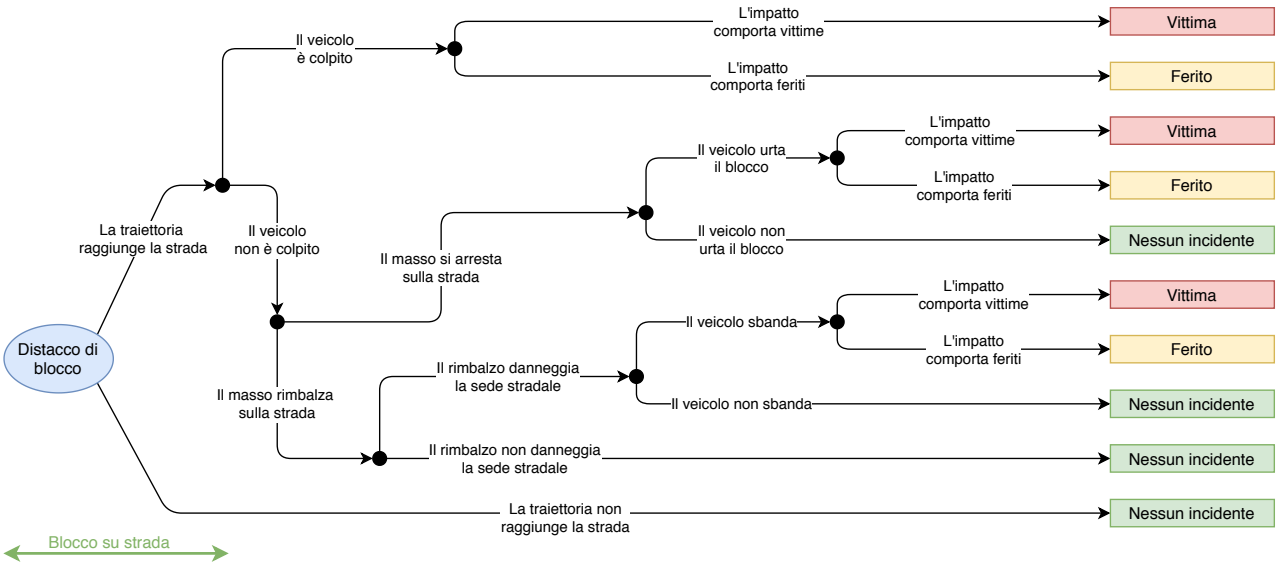


Figura 4. Albero degli eventi a seguito del distacco di un blocco in parete.

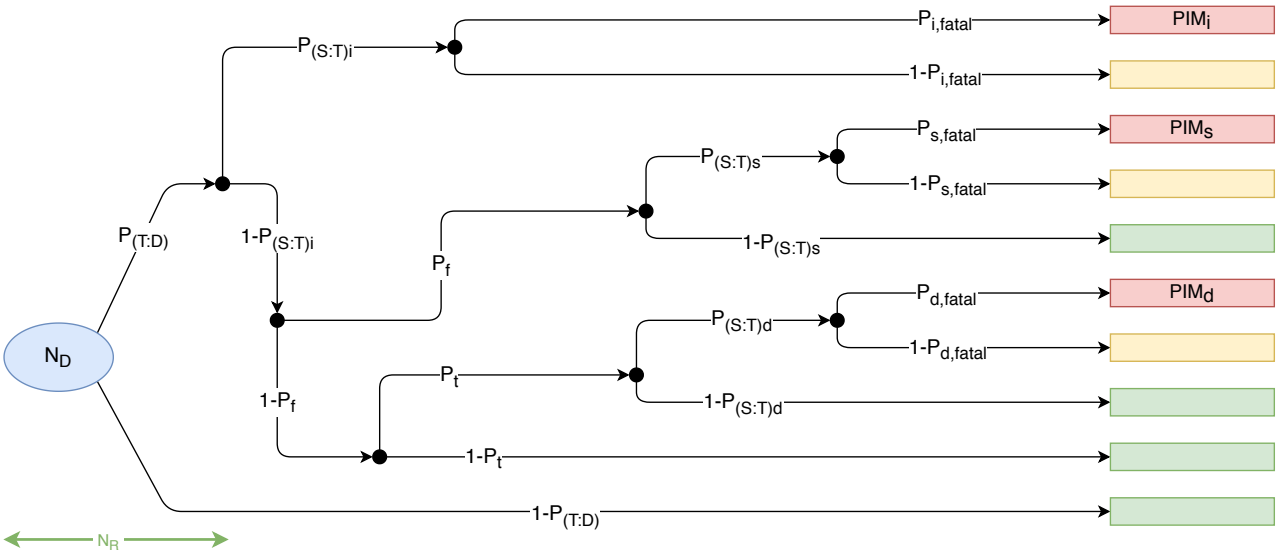


Figura 5. Indicazioni sulle probabilità nell'albero degli eventi di Figura 4. Gli indici superiori relativi alla i-esima area sorgente, alla j-esima condizione di traffico non sono riportati per questioni di chiarezza e alla k-esima porzione non sono riportati.

In riferimento alla Figura 5, è possibile valutare la probabilità di incidente con vittima sulla *k*-esima porzione come la somma

$$^{k}PIM = PIM_i + PIM_s + PIM_d, \tag{5.4}$$

dove PIM_i è la probabilità di vittima a seguito dell'impatto tra blocco in movimento e veicolo, PIM_s è la probabilità di vittima a seguito dell'impatto tra veicolo e blocco fermo sulla sede stradale e PIM_d è la probabilità di vittima a seguito dello sbandamento del veicolo a causa di una buca creata dal blocco in fase di rimbalzo. I tre valori di probabilità variano da porzione a porzione; non si è aggiunto l'apice *k* per non appesantire ulteriormente la notazione.

Tale probabilità ^{k}PIM è direttamente legata all'accadimento dell'evento iniziatore, ossia il distacco del blocco. Visto che la propagazione del fenomeno è associata alla sorgente di crollo, è opportuno distinguere il valore di probabilità di vittima in funzione della sorgente, ossia utilizzando il simbolo $^{k}PIM^{i}$, dove, come già riportato, la *i* è l'indice relativo alla sorgente del fenomeno di caduta massi e la *k* è l'indice relativo alla porzione. Considerando che nell'arco di un anno avviene dalla *i*-esima sorgente un numero N_D^i di eventi, è possibile valutare la probabilità di avere nell'arco di un anno sulla *k*-esima porzione <u>almeno una vittima</u> a seguito di incidente dovuto ad un crollo generato dalla *i*-esima sorgente come:

$$^{k}P_{vittima}^{i} = 1 - \left(1 - {}^{k}PIM^{i}\right)^{N_D^i}. \tag{5.5}$$

Si specifica che, in linea teorica, se si disponesse dei dati relativi a N_D^i , il numero annuo di eventi N_R per i quali il blocco raggiunge l'intero tratto di strada, così come definito al §5.1, sarebbe ottenibile come:

$$N_R = \frac{1}{\sum_{h=1}^{n} \ell_h} \sum_{i=1}^{q} \left(N_D^i \sum_{h=1}^{n} P_{(T:D)}^{h,i} \ell_h \right), \tag{5.6}$$

dove q è il numero di sorgenti che insistono sul tratto di strada, n è il numero di sotto-porzioni che costituiscono il tratto, $P_{(T:D)}^{h,i}$ è la probabilità di occorrenza spaziale sulla h-esima sotto-porizione dalla i-esima sorgente. Analogamente, il numero annuo di eventi N_R^k per i quali il blocco raggiunge la k-esima porzione di strada, così come definito al §5.1, sarebbe ottenibile come:

$$N_R^k = \frac{1}{\sum_{h=1}^{m} \ell_h} \sum_{i=1}^{q} \left(N_D^i \sum_{h=1}^{m} P_{(T:D)}^{h,i} \ell_h \right), \tag{5.7}$$

con m il numero di sotto-porzioni costituenti la k-esima porzione. La probabilità annua di avere almeno una vittima sulla k-esima porzione stradale omogenea sarà pertanto valutata come:

$$^{k}P_{vittima} = \sum_{i} {}^{k}P_{vittima}^{i} \ , \tag{5.8}$$

estendendo la sommatoria a tutte le aree sorgente che insistono sulla porzione considerata.

Considerando l'assunzione di $P_{(D)}^{i} \approx N_D^i$, è possibile valutare la <u>probabilità annua di avere un incidente con vittima</u> pari a:

$$^{k}P_{vittima} = \sum_i P_{(D)}^{i} \cdot {}^{k}PIM^{i}. \tag{5.9}$$

Il rischio totale associato ad un transito lungo l'intero tracciato è la somma delle probabilità desunte dal calcolo su ciascuna porzione omogenea, ossia

$$P_{vittima} = \sum_k {}^{k}P_{vittima}. \tag{5.10}$$

Si analizzano nel dettaglio i singoli scenari di interazione tra fenomeno di caduta massi, sede stradale e traffico. È opportuno sottolineare ancora una volta che la probabilità che il blocco distaccatosi dalla i-esima area sorgente interagisca con l'infrastruttura stradale è pari a $P_{(T:D)}^{i}$.

Nel seguito sarà descritto il calcolo dei tre contributi dell'Eq. (5.4) che compongono la probabilità di rischio mortale per evento di crollo.

5.2.1 Impatto tra blocco in fase di crollo e veicolo

Tale paragrafo dettaglia il calcolo della probabilità di vittima a seguito di impatto tra blocco in movimento e veicolo (pedice $_i$ nelle formule che seguono). Affinché si verifichi tale scenario è necessaria la contemporanea presenza del blocco in fase di crollo e del veicolo. Tale contemporaneità deve avvenire sia nel tempo (ovvero il blocco deve cadere mentre il veicolo transita nel tratto pericolo) che nello spazio (ossia il veicolo che transita

nel tratto pericoloso deve proprio trovarsi in corrispondenza della traiettoria del blocco in moto). La probabilità spazio-temporale che un veicolo sia colpito da un blocco in moto, denominata nel seguito come $P_{(S:T),i}$ è funzione della velocità e della numerosità dei veicoli, dunque, delle condizioni del traffico in quello specifico lasso di tempo. Nel caso di strade in cui il traffico sia variabile durante l'anno è possibile calcolare il rischio sulla base di differenti condizioni di traffico. Definita quindi la *j*-esima condizione di traffico, si può ricavare la probabilità spazio-temporale $P^j_{(S:T)i}$ come prodotto tra la probabilità temporale che un veicolo si stia muovendo sulla strada nello stesso istante in cui il blocco transita, $P^j_{(T:P)i}$, e la probabilità spaziale che il veicolo sia sulla traiettoria del blocco, $P^j_{(S:P)i}$:

$$P^j_{(S:T)i} = P^j_{(T:P)i} \cdot P^j_{(S:P)i}. \tag{5.11}$$

I singoli valori di $P^j_{(T:P)i}$ e di $P^j_{(S:P)i}$ sono relativi allo scenario "il veicolo è colpito" lungo tutto l'anno. Tali valori sono desumibili dalla probabilità spazio-temporale relativa al singolo veicolo (pedice $_1$ nelle formule che seguono), moltiplicata per il traffico orario (numero di veicoli all'ora) $n^j_{v/h}$ e il numero annuo di ore n^j_h in cui si verifica tale condizione di traffico. Si ottiene così la probabilità che, a seguito dell'evento, vi sia collisione tra blocco e veicolo come:

$$P^j_{(S:T)i} = P^j_{(T:P)i,1} \cdot P^j_{(S:P)i,1} . \frac{n^j_v}{h} \cdot n^j_h. \tag{5.12}$$

Nel dettaglio, la probabilità temporale di un singolo veicolo (pedice $_1$) è data da:

$$P^j_{(T:P)i,1} = \frac{t_t}{8760}, \tag{5.13}$$

dove t_t rappresenta il tempo di transito (espresso in ore) del veicolo e 8760 è il numero di ore in un anno. Il tempo t_t può tener conto di due differenti situazioni, ossia un veicolo fermo (con persone a bordo) o un veicolo in moto. Nel primo caso t_t deve essere sostituito con il tempo di sosta, nel secondo caso il tempo di transito medio è dato dal rapporto tra la lunghezza del percorso e la velocità media del veicolo. Nell'ipotesi che la lunghezza di ciascuna porzione sia limitata, la velocità del veicolo V_v (espressa in km/h) può essere considerata uniforme e funzione delle caratteristiche della strada (es. pendenza, stato della superficie), delle condizioni di visibilità e metereologiche. La probabilità spaziale di un singolo veicolo è ricavabile da:

$$P^j_{(S:P)i,1} = \frac{L_v}{\ell_k}, \tag{5.14}$$

dove L_v è la lunghezza del veicolo in metri e ℓ_k la lunghezza del sotto-tratto di strada considerato. Si considera infine che l'impatto con il veicolo possa provocare un incidente mortale o non mortale. La probabilità che si verifichi il primo caso è data da:

$$P_{i,fatal} = C_p \cdot P_{i,fatal,1}\ , \tag{5.15}$$

dove C_p è il coefficiente di utilizzazione del veicolo (pari a 1 se sul veicolo è presente il solo conducente, 1,5 se vi sono 2 passeggeri e 1,85 altrimenti) e $P_{i,fatal,1}$ la probabilità che l'impatto masso-veicolo provochi morte. Una stima di tale valore è fornita da Bunce *et al.* (1997), i quali assumono $P_{i,fatal,1} = 0{,}2$.
In relazione alle proprietà prima espresse, la probabilità di incidente mortale per impatto masso-veicolo per evento di crollo a partire dalla *i*-esima zona sorgente e con la *j*-esima condizione di traffico risulta:

$$PIM_i{}^{ij} = P^i_{(T:D)} \cdot P^j_{(S:T)i} \cdot P_{i,fatal}. \tag{5.16}$$

Considerate le differenti condizioni di traffico, la probabilità di incidente mortale per impatto masso-veicolo per evento di crollo a partire dalla *i*-esima zona sorgente risulta:

$$PIM_i{}^{i} = P^i_{(T:D)} \cdot P_{i,fatal} \sum_j P^j_{(S:T)i}\ \ , \tag{5.17}$$

ossia la sommatoria è estesa alle condizioni di traffico.

Tornando al caso in cui il masso non impatti contro il veicolo, esso può alternativamente arrestarsi sulla sede stradale o rimbalzare su di essa. In questo ultimo caso, il manto stradale potrebbe risultare danneggiato. In linea teorica, le situazioni di "blocco fermo sulla strada" e di "strada danneggiata dall'impatto" potrebbero potenzialmente provocare situazioni di pericolo per i conducenti (impatto del veicolo con il blocco nel primo caso e incidente dovuto a sbandamento del mezzo sul manto danneggiato nel secondo caso).

5.2.2 Collisione tra veicolo e blocco fermo sulla sede stradale

Tale paragrafo dettaglia il calcolo della probabilità di vittima a seguito di impatto tra blocco fermo sulla sede stradale e veicolo in transito. Si definisce P_f la probabilità che un masso, non colpendo il veicolo, si arresti sulla carreggiata. La probabilità che un veicolo urti un masso fermo in carreggiata dipende del contemporaneo verificarsi delle due condizioni di corrispondenza spaziale e temporale tra il masso fermo ed il veicolo in transito (pedice $_s$ nelle formule che seguono), moltiplicata per il numero di veicoli/anno in quella condizione di traffico. In analogia con l'Eq. (5.12):

$$P^j_{(S:T)s} = P^j_{(T:P)s,1} \cdot P^j_{(S:P)s,1} . \frac{n^j_v}{h} \cdot n^j_h\ , \tag{5.18}$$

dove $P^j_{(S:T)s}$ rappresenta la probabilità che vi sia l'urto con il masso fermo sulla strada, $P^j_{(T:P)s,1}$ e $P^j_{(S:P)s,1}$ rappresentano, rispettivamente, la probabilità temporale e spaziale che il singolo veicolo si trovi nel tratto di strada a rischio. La probabilità temporale è ricavabile con la stessa espressione relativa all'impatto $P^j_{(T:P)i,1}$ nel caso di veicolo in sosta con persona a bordo, vedasi l'Eq. (5.14). Si definisce distanza visiva di

arresto L_{va} la distanza percorsa dal veicolo dall'istante in cui il guidatore nota il pericolo all'istante in cui il veicolo è fermo. Questo valore dipende dalla velocità del veicolo, dalla pendenza e tipologia di manto del tracciato stradale, dalla visibilità e dal tempo di reazione del guidatore.

La probabilità spaziale è valutata come

$$P^{j}_{(S:P)s,1} = \frac{\min\{L_{va}; L_v; \ell_k\}}{\ell_{\mathrm{k}}}, \tag{5.19}$$

dove L_v è la distanza media tra due veicoli calcolata (in metri) come:

$$L_v = \frac{V_v}{n^{j}_{v/h}} 1000. \tag{5.20}$$

Similmente a quanto precedentemente esposto per l'impatto con un blocco in fase di crollo, la probabilità che l'incidente provocato dall'impatto del veicolo con il masso fermo in carreggiata sia mortale, $P_{s,fatal}$, può essere ricavata su base statistica, per esempio considerando le statistiche annuali di incidenti mortali a causa della presenza di un ostacolo imprevisto sulla strada. La probabilità di incidente mortale dipende anche dalla velocità di transito sulla strada. Per basse velocità, sebbene il masso possa non essere schivato, l'impatto non comporta vittime, ma solo feriti.

Per le proprietà dell'ETA, la probabilità di incidente mortale per impatto masso fermo-veicolo in transito per evento di crollo a partire dalla *i*-esima zona sorgente e con la *j*-esima condizione di traffico risulta:

$$PIM_s{}^{ij} = P^{i}_{(T:D)} \cdot \left(1 - P^{j}_{(S:T)i}\right) \cdot P_f \cdot P^{j}_{(S:T)s} \cdot P_{s,fatal}\,. \tag{5.21}$$

Considerazioni simili a quelle precedentemente esposte possono essere condotte estendendo i risultati al tutte le condizioni di traffico, vedasi l'Eq. (5.17), ottenendo:

$$PIM_s{}^{i} = P^{i}_{(T:D)} \cdot P_f \cdot P_{s,fatal} \sum_j \left(1 - P^{j}_{(S:T)i}\right) \cdot P^{j}_{(S:T)s}\,. \tag{5.22}$$

5.2.3 Sbandamento dovuto al manto danneggiato

Definita $(1 - P_f)$ la probabilità che un masso non impattando un veicolo non si arresti nemmeno sulla carreggiata, occorre definire la probabilità P_t che il masso che transita sulla carreggiata danneggi il manto stradale. Questa può essere ricavata su base statistica, ad esempio considerando il numero di eventi in cui il masso danneggia la carreggiata. In alternativa, se si dispongono delle informazioni necessarie, si può utilizzare il numero di casi di superamento della stessa rapportato al numero totale degli eventi che sono stati registrati nella fascia di 100 m a monte e a valle della strada (Mignelli *et al.*, 2012).

Il veicolo che sbanda a causa della buca generata dal masso e non opportunamente schivata (pedice $_{\mathrm{d}}$ nelle formule che seguono), oppure il veicolo che impatta contro il blocco fermo sulla carreggiata poiché non

opportunamente schivato sono entrambi scenari causati da tempi di reazione e di arresto non sufficienti. Pertanto, la probabilità spazio-temporale di sbandamento $P^{j}_{(S:T)d}$ è pari alla probabilità spazio-temporale $P^{j}_{(S:T)s}$ precedentemente definita nella Eq. (5.18). Infine la probabilità che l'incidente causato dal manto stradale dissestato sia mortale, $P_{d,fatal}$, può essere ricavata su base statistica, per esempio considerando la mortalità media degli incidenti causati dall'uscita di strada sulla rete stradale per presenza di una buca. La probabilità di incidente mortale dipende anche dalla velocità di transito sulla strada. Per basse velocità, sebbene la buca possa non essere schivata, lo sbandamento è tale che il guidatore riesce a riprendere il controllo del mezzo.

Per le proprietà dell'ETA, la probabilità di incidente mortale per sbandamento dovuto a manto stradale dissestato per evento di crollo a partire dalla *i*-esima zona sorgente e con la *j*-esima condizione di traffico risulta:

$$PIM_d{}^{ij} = P^{i}_{(T:D)} \cdot \left(1 - P^{j}_{(S:T)i}\right) \cdot \left(1 - P_f\right) \cdot P_t \cdot P^{j}_{(S:T)d} \cdot P_{d,fatal}. \tag{5.23}$$

Considerate le differenti condizioni di traffico, la probabilità di incidente mortale per sbandamento dovuto a manto stradale dissestato per evento di crollo a partire dalla *i*-esima zona sorgente risulta:

$$PIM_d{}^{i} = P^{i}_{(T:D)} \cdot \left(1 - P_f\right) \cdot P_t \cdot P_{d,fatal} \sum_j \left(1 - P^{j}_{(S:T)i}\right) \cdot P^{j}_{(S:T)d} \cdot \tag{5.24}$$

5.2.4 Albero degli eventi semplificato

Come illustrato al §5.1, il dato relativo al numero di distacchi in parete potrebbe non essere disponibile in fase di redazione dell'analisi di rischio in quanto tale informazione non è di facile reperimento su tutte le pareti e richiede un monitoraggio del territorio di lunga durata. Inoltre, studi specifici circa la cosiddetta propensione al distacco devono essere adeguatamente calati alla realtà che si sta studiando e, quindi, potrebbero risultare non sempre applicabili a tutti i casi. Si possiedono, invece, usualmente, molte più informazioni circa i massi che hanno interessato direttamente la via di transito. Tali informazioni sono fornite dai gestori della strada e dagli utilizzatori della stessa. È quindi possibile modificare l'albero di eventi presentato in Figura 4 inglobando le precedenti considerazioni. La Figura 6 e la Figura 7 riportano l'albero di eventi semplificato e la nomenclatura relativa alle probabilità. Lo schema ha origine dall'evento "Blocco su strada" e si sviluppa in maniera analoga al precedente, fatto salvo il termine relativo all'analisi di propagazione. Nel dettaglio, considerando che il tracciato stradale è suddiviso in porzioni, sarebbe opportuno definire l'evento come "Blocco su porzione di strada" (tale indicazione non è tuttavia riportata nella figura per questioni di facilità di lettura), il cui numero annuo è ricavato mediante la Eq. (5.2).

L'evento iniziatore è caratterizzato da una frequenza annua di accadimento N^{k}_{R}, come riportato nell'Eq. (5.2). Relativamente alla differenziazione relativa alle aree sorgente, nel caso semplificato tale valutazione non è necessaria. Analogamente a quanto precedentemente esposto, qualora il numero di eventi all'anno sia esiguo, è possibile confondere la frequenza annua di accadimento con la probabilità annua di accadimento di un blocco

su strada. In tale caso, questa sarà indicata come $P_{(R)}^{k}$. Anche nel caso di albero di eventi semplificato restano valide le considerazioni di omogeneità dei tratti da scegliere, precedentemente esposte per il caso generale, per la valutazione quantitativa del rischio.

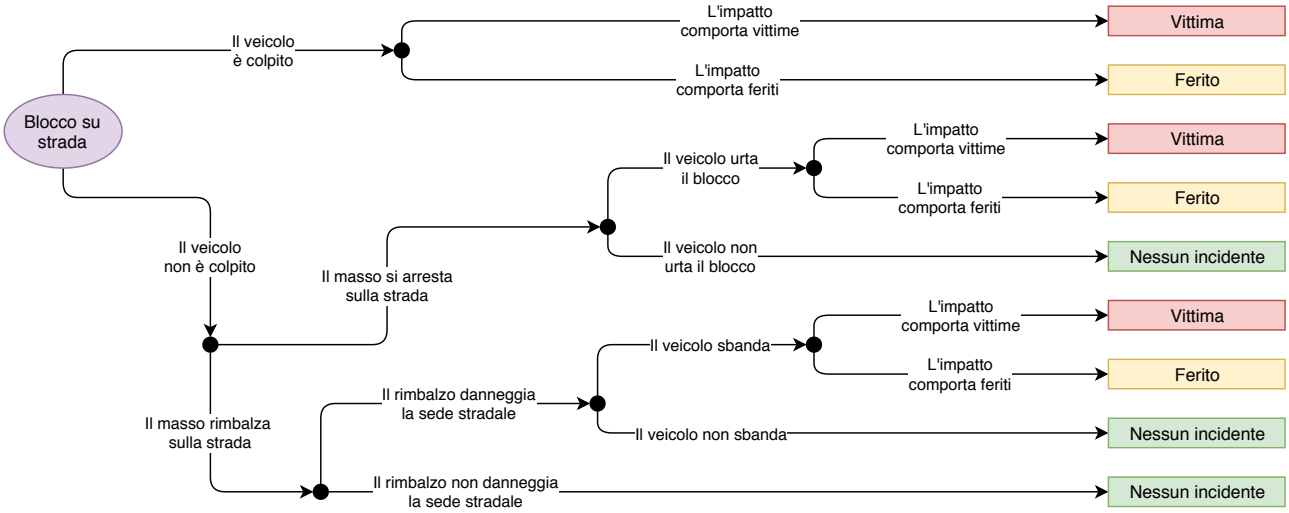


Figura 6. Albero degli eventi semplificato a seguito dell'arrivo di un blocco sulla strada.

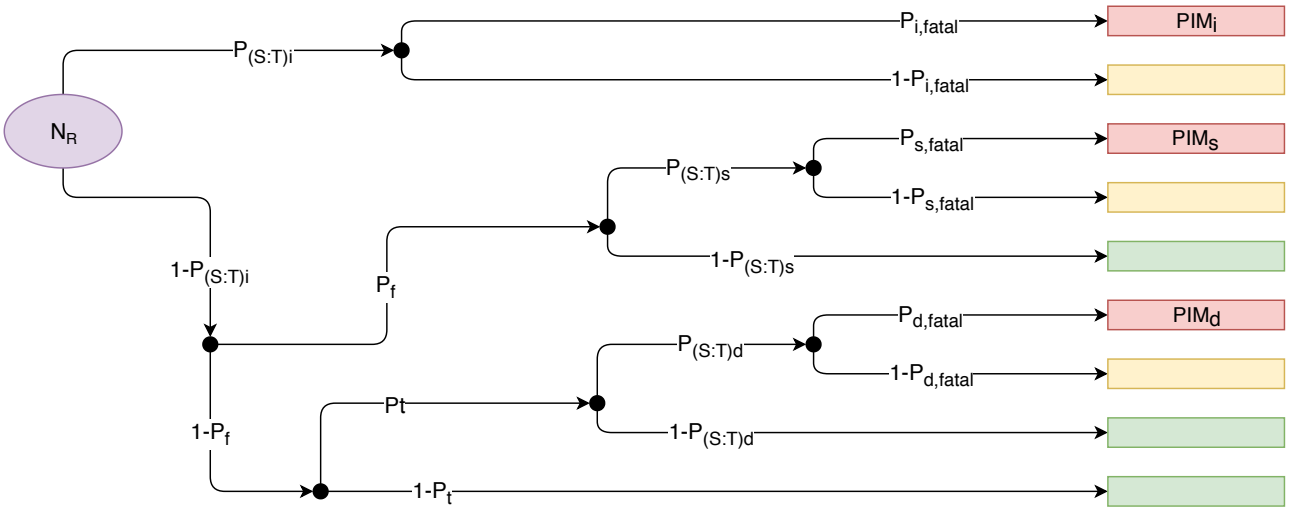


Figura 7. Indicazioni sulle probabilità nell'albero degli eventi di Figura 6. L'indice superiore relativo alla j*-esima condizione di traffico non è riportato per questioni di chiarezza.*

Essendo inalterato lo sviluppo dell'albero a valle del blocco sulla porzione di strada, è possibile pervenire alle probabilità di vittima a seguito di impatto con veicolo in transito, di impatto tra veicolo e blocco fermo sulla sede stradale e di sbandamento del veicolo a causa di una buca creata dal blocco in fase di rimbalzo, considerando tutte le condizioni di traffico, come:

$$
\begin{aligned}
{}^{k}PIM = P_{i,fatal} \sum_{j} P^{j}_{(S:T)i} + \\
P_f \cdot P_{s,fatal} \sum_{j} \left(1 - P^{j}_{(S:T)i}\right) \cdot P^{j}_{(S:T)s} + \\
\left(1 - P_f\right) \cdot P_t \cdot P_{d,fatal} \ \textstyle\sum_j \left(1 - P^{j}_{(S:T)i}\right) \cdot P^{j}_{(S:T)d} \ ,
\end{aligned}
\tag{5.25}
$$

dove si riconoscono i tre contributi (identificati dagli addendi della precedente espressione).

In riferimento alla *k*-esima porzione, in accordo a quanto precedentemente esposto, è possibile valutare la probabilità di avere nell'arco di un anno almeno una vittima a seguito di incidente dovuto ad un blocco su strada come:

$$
{}^{k}P_{vittima} = 1 - \left(1 - {}^{k}PIM\right)^{N_R^k}. \tag{5.26}
$$

Considerando l'assunzione di $P^{k}_{(R)} \approx N^{k}_{R}$, è possibile valutare la probabilità annua di avere un incidente con vittima pari a:

$$
{}^{k}P_{vittima} = P^{k}_{(R)} \cdot {}^{k}PIM. \tag{5.27}
$$

Il rischio totale associato ad un transito lungo l'intero tracciato è la somma delle probabilità desunte dal calcolo su ciascuna porzione omogenea, ossia

$$
P_{vittima} = \textstyle\sum_k {}^{k}P_{vittima}. \tag{5.28}
$$

5.3 Metodo ETA per pista forestale (sterrata)

Il diagramma ad albero relativo ad una pista forestale sterrata è molto simile a quello di una strada asfaltata. Come precedentemente riportato, qualora la traiettoria raggiunga il tracciato della pista, il blocco può colpire, o meno, un veicolo in transito. Nel caso in cui la collisione avvenga, questa può comportare, o meno, vittime. Nel caso, invece, in cui il blocco non colpisca il veicolo, è possibile che si arresti sulla sede stradale o rimbalzi. Nel primo caso, il masso sulla strada rappresenta un ostacolo per il guidatore, il quale può urtare il blocco oppure può schivarlo. Nel caso di urto, è possibile che vi siano, o meno, vittime. Nel caso di rimbalzo sulla sede stradale, è ipotizzabile che questa venga danneggiata o meno. Nel caso di formazione di una buca, il veicolo in transito che non riesce a schivare tale ostacolo può sbandare e anche uscire di strada, con conseguente incidente con vittima. Tuttavia, come evidenziato nel seguito del presente paragrafo, la limitata velocità di transito consente di trascurare alcuni termini. Infatti, se la velocità di transito è sufficientemente bassa, la distanza visiva di arresto è assimilabile a zero (si assume che il conducente riesca a vedere un

eventuale blocco crollato o buca e abbia lo spazio necessario per arrestarsi). Pertanto la probabilità che il veicolo impatti contro un ostacolo localizzato sulla sede stradale (sia questo un blocco crollato o una buca) è nulla. Lo schema concettuale corrispondente alla precedente analisi è riportato in Figura 8.

Definite le varie probabilità dei nodi dell'albero degli eventi, vedasi la Figura 9, è possibile determinare la probabilità finale di ciascun scenario, identificato dal percorso creato dai rami lungo l'albero, moltiplicando le probabilità dei singoli rami costituenti il percorso considerato. Considerando che il tratto stradale è diviso in porzioni omogenee, la probabilità totale relativa a tutti i percorsi con stesso esito (ad esempio, incidente con vittima) della porzione di pista forestale analizzata è calcolata quale la somma delle singole probabilità.

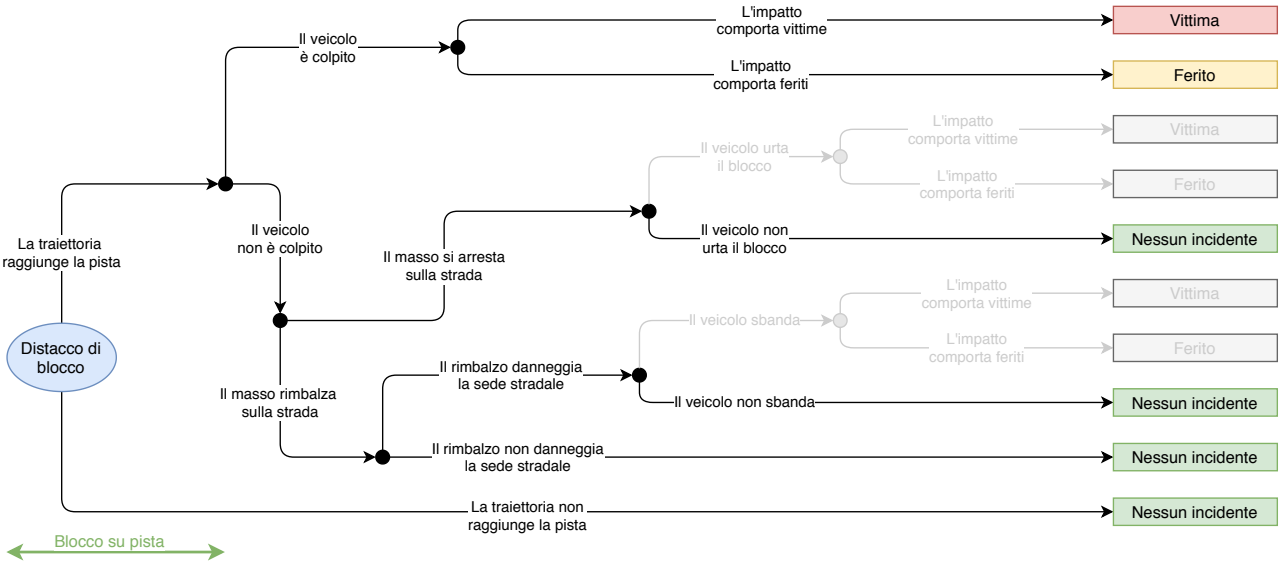


Figura 8. Albero degli eventi a seguito del distacco di un blocco in parete.

In riferimento alla Figura 9, è possibile valutare la probabilità di incidente con vittima sul *k*-esimo porzione come la somma:

$$^{k}PIM = PIM_i + \cancel{PIM_s} + \cancel{PIM_d} \tag{5.29}$$

dove PIM_i è la probabilità di vittima a seguito dell'impatto tra blocco in movimento e veicolo. I contributi PIM_s, ossia la probabilità di vittima a seguito dell'impatto tra veicolo e blocco fermo sulla sede stradale, e PIM_d, ossia la probabilità di vittima a seguito dello sbandamento del veicolo a causa di una buca creata dal blocco in fase di rimbalzo, sono barrati in quanto nulli. Il valore di PIM_i varia da porzione a porzione; non si è aggiunto l'apice *k* per non appesantire ulteriormente la notazione.

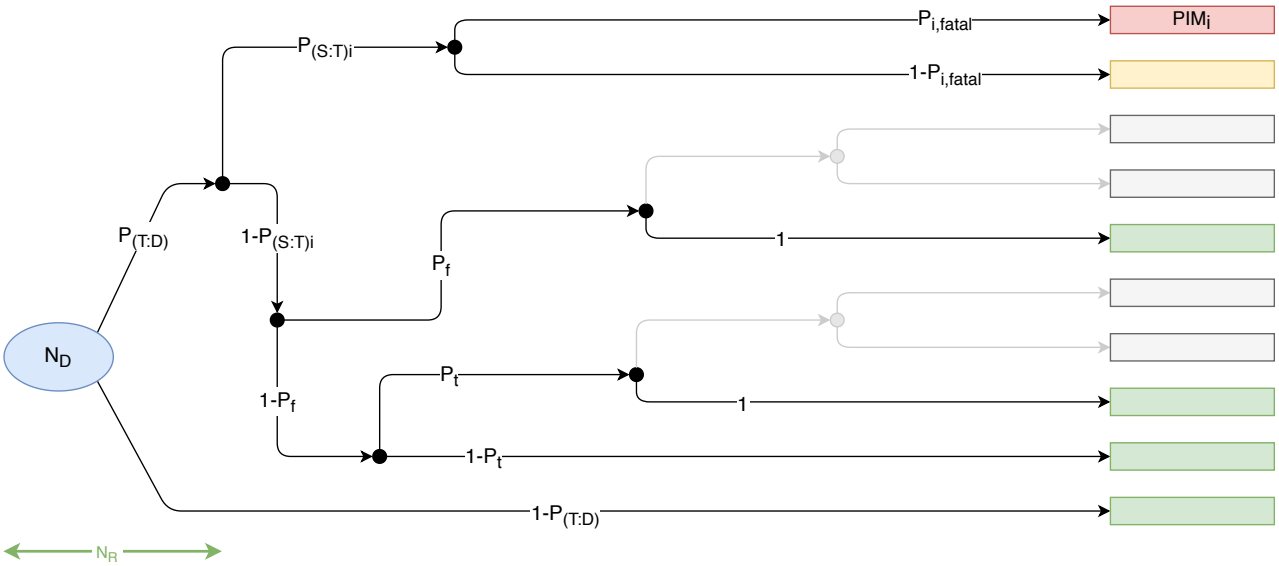


Figura 9. Indicazioni sulle probabilità nell'albero degli eventi di Figura 8. Gli indici superiori relativi alla i-esima area sorgente e alla j-esima condizione di traffico non sono riportati per questioni di chiarezza.

La probabilità ${}^{k}PIM$ è direttamente legata all'accadimento dell'evento iniziatore, ossia il distacco del blocco. Visto che la propagazione del fenomeno è associata alla sorgente di crollo, è opportuno distinguere il valore di probabilità di vittima in funzione della sorgente, ossia utilizzando il simbolo ${}^{k}PIM^{i}$, dove, come già riportato, la i è l'indice relativo alla sorgente del fenomeno di caduta massi e la k è l'indice relativo alla porzione. Considerando che nell'arco di un anno avviene dalla i-esima sorgente un numero N_D^i di eventi, è possibile valutare la probabilità di avere nell'arco di un anno almeno una vittima a seguito di incidente dovuto ad un crollo generato dalla i-esima sorgente come:

$$ {}^{k}P_{vittima}^{i} = 1 - \left(1 - {}^{k}PIM^{i}\right)^{N_D^i}. \tag{5.30}$$

Si specifica che, in linea teorica, se si disponesse dei dati relativi a N_D^i , il numero annuo di eventi N_R per i quali il blocco raggiunge l'intero tratto di pista, così come definito al §5.1, sarebbe ottenibile in accordo con l'Eq. (5.6) e il numero annuo di eventi N_R^k per i quali il blocco raggiunge la k-esima porzione di pista, così come definito al §5.1, sarebbe ottenibile in accordo con l'Eq. (5.7).

La probabilità annua di avere almeno una vittima sulla k-esima porzione di pista forestale omogenea sarà pertanto valutata come:

$$ {}^{k}P_{vittima} = \sum_{i} {}^{k}P_{vittima}^{i} \ , \tag{5.31}$$

estendendo la sommatoria a tutte le aree sorgente che insistono sulla porzione considerata.

Considerando l'assunzione di $P_{(D)}^{i} \approx N_D^i$, è possibile valutare la probabilità annua di avere un incidente con vittima pari a:

$$ {}^{k}P_{vittima} = \sum_i P^i_{(D)} \cdot {}^{k}PIM^i. \quad (5.32) $$

Il rischio totale associato ad un transito lungo l'intero tracciato è la somma delle probabilità desunte dal calcolo su ciascuna porzione omogenea, ossia

$$ P_{vittima} = {}^{k}P_{vittima}. \quad (5.33) $$

Si analizzano nel dettaglio i singoli scenari di interazione tra fenomeno di caduta massi, sede stradale e traffico. È opportuno sottolineare ancora una volta che la probabilità che il blocco distaccatosi dalla *i*-esima area sorgente interagisca con l'infrastruttura stradale è pari a $P^i_{(T:D)}$.

Nel seguito sarà descritto il calcolo del singolo contributo dell'Eq. (5.29). Qualora si ritenga che la distanza di arresto sia non trascurabile e la visibilità di un eventuale blocco o buca sia limitata, allora occorre considerare nell'Eq. (5.29) i contributi dovuti alla collisione tra blocco fermo e veicolo e allo sbandamento dovuto al manto danneggiato. In questo caso è necessario riferirsi a quanto riportato ai §5.2.2 e §5.2.3.

5.3.1 Impatto tra blocco in fase di crollo e veicolo

Tale paragrafo dettaglia il calcolo della probabilità di vittima a seguito di impatto tra blocco in movimento e veicolo (pedice $_i$ nelle formule che seguono). Affinché si verifichi tale scenario è necessaria la contemporanea presenza del blocco in fase di crollo e del veicolo. Tale contemporaneità deve avvenire sia nel tempo (ovvero il blocco deve cadere mentre il veicolo transita nella porzione pericolosa) che nello spazio (ossia il veicolo che transita nella porzione pericolosa deve proprio trovarsi in corrispondenza della traiettoria del blocco in moto). La probabilità spazio-temporale che un veicolo sia colpito da un blocco in moto, denominata nel seguito come $P_{(S:T),i}$ è funzione della velocità e della numerosità dei veicoli, dunque, delle condizioni del traffico in quello specifico lasso di tempo. Nel caso di piste sterrate in cui il traffico è variabile è possibile calcolare il rischio sulla base di differenti condizioni di traffico. Definita quindi la *j*-esima condizione di traffico, si può ricavare la probabilità spazio-temporale $P^j_{(S:T)i}$ come prodotto tra la probabilità temporale che un veicolo si stia muovendo sulla strada nello stesso istante in cui il blocco transita, $P^j_{(T:P)i}$, e la probabilità spaziale che il veicolo sia sulla traiettoria del blocco, $P^j_{(S:P)i}$:

$$ P^j_{(S:T)i} = P^j_{(T:P)i} \cdot P^j_{(S:P)i}. \quad (5.34) $$

I singoli valori di $P^j_{(T:P)i}$ e di $P^j_{(S:P)i}$ sono relativi allo scenario "il veicolo è colpito" lungo tutto l'anno. Tali valori sono desumibili dalla probabilità spazio-temporale relativa al singolo veicolo (pedice $_1$ nelle formule che seguono), moltiplicata per il traffico orario (numero di veicoli all'ora) $n^j_{v/h}$ e il numero annuo di ore n^j_h in

cui si verifica tale condizione di traffico. Si ottiene così la probabilità che, a seguito dell'evento, vi sia collisione tra blocco e veicolo come:

$$P^{j}_{(S:T)i} = P^{j}_{(T:P)i,1} \cdot P^{j}_{(S:P)i,1} . n^{j}_{\overline{v}} \cdot n^{j}_{h} . \tag{5.35}$$

Nel dettaglio, la probabilità temporale di un singolo veicolo (pedice 1) è data da:

$$P^{j}_{(T:P)i,1} = \frac{t_t}{8760}, \tag{5.36}$$

dove t_t rappresenta il tempo di transito (espresso in ore) del veicolo e 8760 è il numero di ore in un anno. Il tempo t_t può tener conto di due differenti situazioni, ossia un veicolo fermo (con persone a bordo) o un veicolo in moto. Nel primo caso t_t deve essere sostituito con il tempo di sosta. Nel secondo caso il tempo di transito medio è dato dal rapporto tra la lunghezza del percorso e la velocità media del veicolo. Su una strada sterrata la velocità del veicolo V_v (espressa in km/h) può essere considerata uniforme e funzione delle caratteristiche della strada (es. pendenza, stato della superficie), delle condizioni di visibilità e metereologiche. La probabilità spaziale di un singolo veicolo è ricavabile da:

$$P^{j}_{(S:P)i,1} = \frac{L_v}{\ell_{\mathrm{k}}}, \tag{5.37}$$

dove L_v è la lunghezza del veicolo in metri e ℓ_k la lunghezza della porzione di pista considerata. Si considera infine che l'impatto con il veicolo possa provocare un incidente mortale o non mortale. La probabilità che si verifichi il primo caso è data da:

$$P_{i,fatal} = C_p \cdot P_{i,fatal,1} . \tag{5.38}$$

dove C_p è il coefficiente di utilizzazione del veicolo (pari a 1 se sul veicolo è presente il solo conducente, 1,5 se vi sono 2 passeggeri e 1,85 altrimenti) e $P_{i,fatal,1}$ la probabilità che l'impatto masso-veicolo provochi morte. Una stima di tale valore è fornita da Bunce *et al.* (1997), i quali assumono $P_{i,fatal,1} = 0{,}2$.
In relazione alle proprietà prima espresse, la probabilità di incidente mortale per impatto masso-veicolo per evento di crollo a partire dalla *i*-esima zona sorgente e con la *j*-esima condizione di traffico risulta:

$$PIM_i{}^{ij} = P^{i}_{(T:D)} \cdot P^{j}_{(S:T)i} \cdot P_{i,fatal} . \tag{5.39}$$

Considerate le differenti condizioni di traffico, la probabilità di incidente mortale per impatto masso-veicolo per evento di crollo a partire dalla *i*-esima zona sorgente risulta:

$$PIM_i{}^{i} = P^{i}_{(T:D)} \cdot P_{i,fatal} \sum_{j} P^{j}_{(S:T)i} \quad , \tag{5.40}$$

ossia la sommatoria è estesa alle condizioni di traffico.

5.3.2 Albero degli eventi semplificato

Come illustrato al §5.1, il dato relativo al numero di distacchi in parete potrebbe non essere disponibile in fase di redazione dell'analisi di rischio in quanto tale informazione non è di facile reperimento su tutte le pareti e richiede un monitoraggio del territorio di lunga durata. Inoltre, studi specifici circa la cosiddetta propensione al distacco devono essere adeguatamente calati alla realtà che si sta studiando e, quindi, potrebbero risultare non sempre applicabili a tutti i casi. Si possiedono, invece, usualmente, molte più informazioni circa i massi che hanno interessato direttamente la via di transito. Tali informazioni sono fornite dai gestori della pista forestale e dagli utilizzatori della stessa. È quindi possibile modificare l'albero di eventi presentato in Figura 8 inglobando le precedenti considerazioni. La Figura 10 e la Figura 11 riportano l'albero di eventi semplificato e la nomenclatura relativa alle probabilità. Lo schema ha origine dall'evento "Blocco su pista" e si sviluppa in maniera analoga al precedente, fatto salvo il termine relativo all'analisi di propagazione. Nel dettaglio, considerando che il tracciato della pista forestale è suddiviso in porzioni, sarebbe opportuno definire l'evento come "Blocco su porzione di pista".

L'evento iniziatore è caratterizzato da una frequenza annua di accadimento N_R^k, come riportato nell'Eq. (5.2). Relativamente alla differenziazione relativa alle aree sorgente, nel caso semplificato tale valutazione non è necessaria. Analogamente a quanto precedentemente esposto, qualora il numero di eventi all'anno sia esiguo, è possibile confondere la frequenza annua di accadimento con la probabilità annua di accadimento di un blocco su strada. In tale caso, questa sarà indicata come $P_{(R)}^k$. Anche nel caso di albero di eventi semplificato restano valide le considerazioni di omogeneità dei tratti da scegliere, precedentemente esposte per il caso generale, per la valutazione quantitativa del rischio.

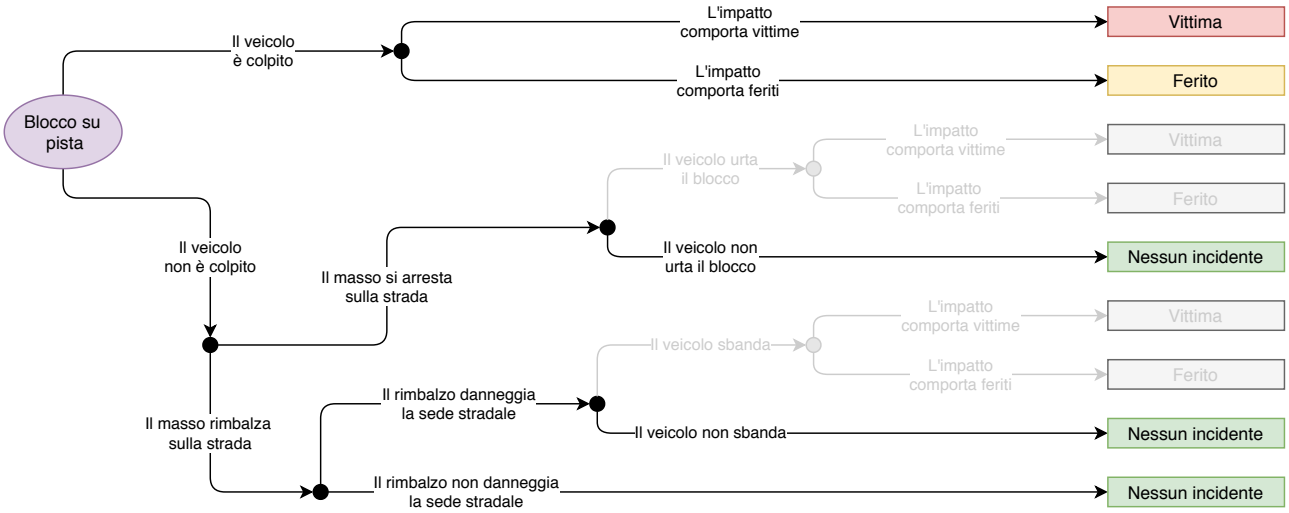


Figura 10. Albero degli eventi semplificato a seguito dell'arrivo di un blocco sulla pista forestale.

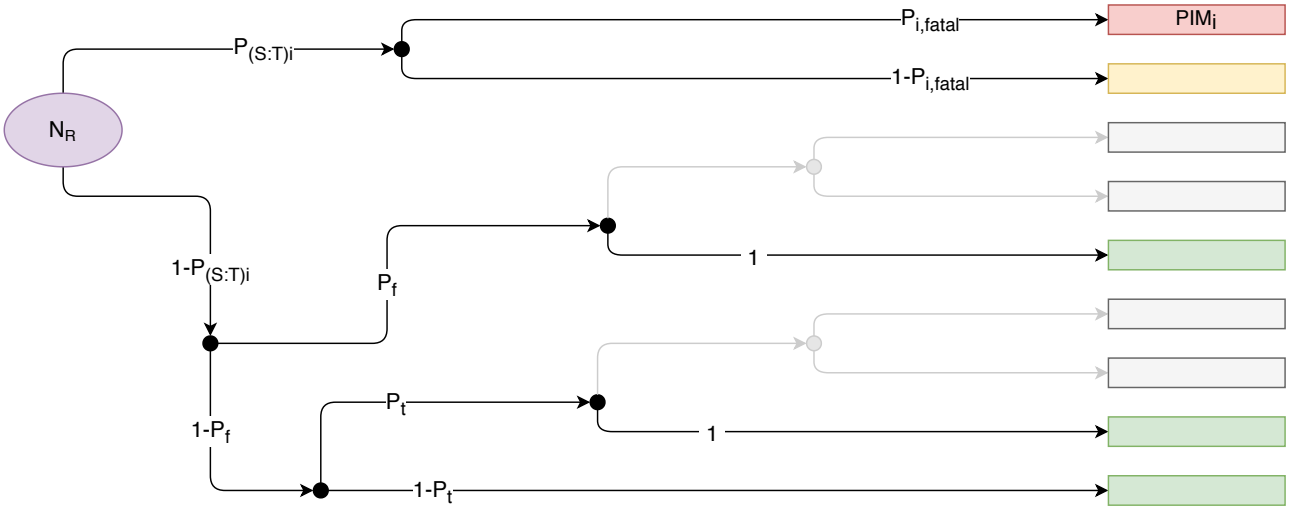


Figura 11. Indicazioni sulle probabilità nell'albero degli eventi di Figura 10. L'indice superiore relativo alla j-esima condizione di traffico non è riportato per questioni di chiarezza.

Essendo inalterato lo sviluppo dell'albero a valle del blocco su porzione di pista, sulla base delle considerazioni precedentemente riportate circa il valore nullo della distanza visiva di arresto e le conseguenze da questo derivanti, è possibile pervenire alle probabilità di vittima a seguito di impatto con veicolo in transito come:

$$^{k}PIM = P_{i,fatal} \sum_{j} P^{j}_{(S:T)i}. \tag{5.47}$$

In riferimento alla *k*-esima porzione, in accordo a quanto precedentemente esposto, è possibile valutare la probabilità di avere nell'arco di un anno almeno una vittima a seguito di incidente dovuto ad un blocco su strada come:

$$^{k}P_{vittima} = 1 - \left(1 - {}^{k}PIM\right)^{N_R^k}. \tag{5.42}$$

Considerando l'assunzione di $P^k_{(R)} \approx N^k_R$, è possibile valutare la probabilità annua di avere un incidente con vittima pari a:

$$^{k}P_{vittima} = P^k_{(R)} \cdot {}^{k}PIM. \tag{5.43}$$

Il rischio totale associato ad un transito lungo l'intero tracciato è la somma delle probabilità desunte dal calcolo su ciascuna porzione omogeneo, ossia

$$P_{vittima} = \sum_k {}^{k}P_{vittima}. \tag{5.44}$$

5.4 Metodo ETA per sentiero

La letteratura scientifica tratta in maniera molto poco estesa il problema del rischio dovuto a caduta massi per escursionisti in transito lungo un sentiero lungo un versante su cui sussiste tale pericolo naturale. Un esempio di calcolo del rischio per persone in transito a piedi su sentiero è riportato in Ansari *et al.* (2014). La metodologia proposta dal gruppo di ricerca per la stima del rischio lungo tale tipologia di infrastrutture è riconducibile allo schema di albero degli eventi, come di seguito illustrato.

Qualora la traiettoria del blocco in fase di crollo raggiunga un sentiero, il blocco può colpire, o meno, un escursionista. Diversamente da quanto riportato per le infrastrutture su cui transitano autoveicoli, l'escursionista nel momento del transito del blocco può essere fermo o in movimento. Nel caso, invece, in cui il blocco non colpisca l'escursionista, è possibile che si arresti sul sentiero o che rimbalzi. In entrambi questi ultimi casi l'escursionista non è direttamente coinvolto dal fenomeno, quindi non sono trattati nello studio del rischio. Lo schema concettuale alla base delle precedenti considerazioni è riportato in Figura 12. La necessità di differenziare tra escursionista in movimento e in sosta permette di generalizzare la metodologia a qualsivoglia tracciato in cui sono presenti aree di sosta o zone panoramiche.

Occorre precisare che il metodo proposto assume che l'albero di eventi precedentemente esposto sia applicabile ad ogni tipologia di crollo di massi. In altre parole, non si prende in considerazione l'effetto del volume sui possibili scenari che si potrebbero generare (differenziando l'albero in funzione del volume). Questa assunzione trova giustificazione nel fatto che la vulnerabilità di un escursionista è unitaria e indipendente dal blocco. Pertanto, il numero di eventi all'anno tiene in considerazione il distacco di blocchi di qualsivoglia volume.

Definite le varie probabilità dei nodi dell'albero degli eventi, vedasi la Figura 13, è possibile determinare la probabilità finale di ciascun scenario, identificato dal percorso creato dai rami lungo l'albero, moltiplicando le probabilità dei singoli rami costituenti il percorso considerato. Considerando che il tratto di sentiero è diviso in porzioni omogenee, la probabilità totale relativa a tutti i percorsi con stesso esito (ad esempio, incidente con vittima) della porzione di sentiero analizzata è calcolata quale la somma delle singole probabilità.

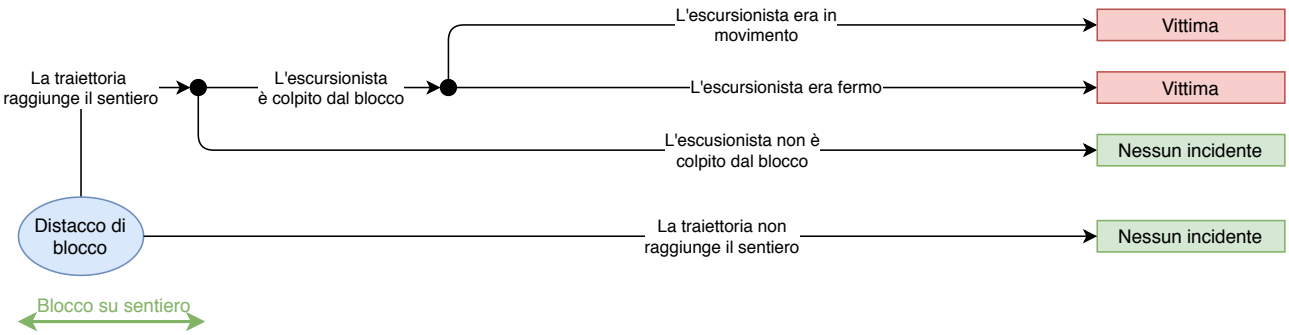


Figura 12. Albero degli eventi semplificato a seguito dell'arrivo di un blocco su sentiero.

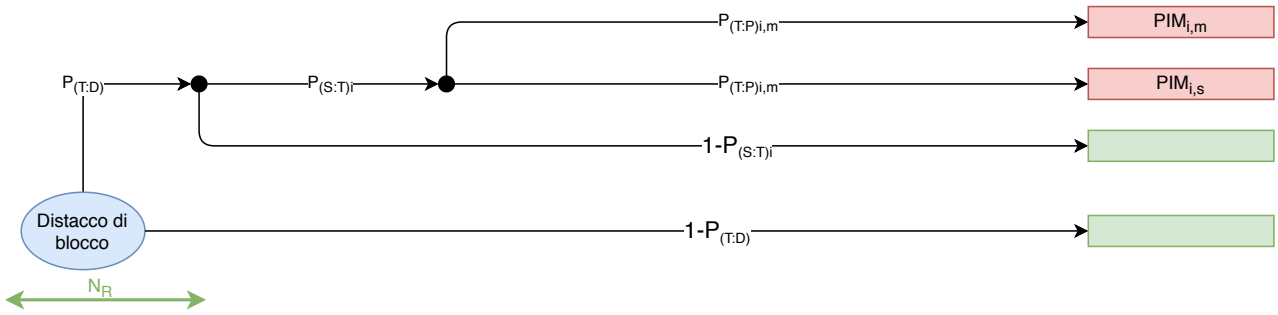


Figura 13. Indicazioni sulle probabilità nell'albero degli eventi di Figura 12. L'indice superiore relativo alla j-esima condizione di traffico non è riportato per questioni di chiarezza.

In riferimento alla Figura 5, è possibile valutare la probabilità di incidente con vittima sulla *k*-esima porzione come la somma

$$^{k}PIM = PIM_i, \tag{5.45}$$

dove PIM_i è la probabilità di vittima a seguito dell'impatto tra blocco in movimento e l'escursionista. Tale valore niente altro è che la somma di due differenti scenari di impatto, come di seguito descritto. Il valore di probabilità varia da porzione a porzione; non si è aggiunto l'apice k per non appesantire ulteriormente la notazione.

Tale probabilità ^{k}PIM è direttamente legata all'accadimento dell'evento iniziatore, ossia il distacco del blocco. Visto che la propagazione del fenomeno è associata alla sorgente di crollo, è opportuno distinguere il valore di probabilità di vittima in funzione della sorgente, ossia utilizzando il simbolo $^{k}PIM^{i}$, dove, come già riportato, la i è l'indice relativo alla sorgente del fenomeno di caduta massi e la k è l'indice relativo alla porzione. Considerando che nell'arco di un anno avviene dalla *i*-esima sorgente un numero N_D^i di eventi, è possibile valutare la probabilità di avere nell'arco di un anno sulla *k*-esima porzione <u>almeno una vittima</u> a seguito di incidente dovuto ad un crollo generato dalla *i*-esima sorgente come:

$$^{k}P_{vittima}^{i} = 1 - \left(1 - {}^{k}PIM^{i}\right)^{N_D^i}. \tag{5.46}$$

Si specifica che, in linea teorica, se si disponesse dei dati relativi a N_D^i , il numero annuo di eventi N_R per i quali il blocco raggiunge l'intero tratto di sentiero, così come definito al §5.1, sarebbe ottenibile in accordo con l'Eq. (5.6) e il numero annuo di eventi N_R^k per i quali il blocco raggiunge la *k*-esima porzione di sentiero, così come definito al §5.1, sarebbe ottenibile in accordo con l'Eq. (5.7).

La probabilità annua di avere almeno una vittima sulla *k*-esima porzione di sentiero omogenea sarà pertanto valutata come:

$$^{k}P_{vittima} = \sum_i {}^{k}P_{vittima}^{i} \ , \tag{5.47}$$

estendendo la sommatoria a tutte le aree sorgente che insistono sulla porzione considerata.

Considerando l'assunzione di $P_{(D)}^{i} \approx N_{D}^{i}$, è possibile valutare la probabilità annua di avere un incidente con vittima pari a:

$$ {}^{k}P_{vittima} = \sum_i P_{(D)}^{i} \cdot {}^{k}PIM^{i}. \tag{5.48} $$

Il rischio totale associato ad un transito lungo l'intero tracciato è la somma delle probabilità desunte dal calcolo su ciascuna porzione omogenea, ossia

$$ P_{vittima} = \sum_k {}^{k}P_{vittima}. \tag{5.49} $$

Si analizza nel dettaglio lo scenario di interazione tra fenomeno di caduta massi e traffico di escursionisti lungo il sentiero. È opportuno sottolineare ancora una volta che la probabilità che il blocco distaccatosi dalla *i*-esima area sorgente interagisca con il sentiero è pari a $P_{(T:D)}^{i}$.

Nel seguito sarà descritto il calcolo del contributo PIM_i dell'Eq. (5.45) che compone la probabilità di rischio mortale per evento di crollo.

5.4.1 Impatto tra blocco in fase di crollo e escursionista

Tale paragrafo dettaglia il calcolo della probabilità di vittima a seguito di impatto tra blocco in movimento e escursionista (pedice $_i$ nelle formule che seguono). Affinché si verifichi tale scenario è necessaria la contemporanea presenza del blocco in fase di crollo e dell'escursionista. Tale contemporaneità deve avvenire sia nel tempo (ovvero il blocco deve cadere mentre l'escursionista transita nel tratto pericolo) che nello spazio (ossia la persona che transita nel tratto pericoloso deve proprio trovarsi in corrispondenza della traiettoria del blocco in moto). La probabilità spazio-temporale che un escursionista sia colpito da un blocco in moto, denominata nel seguito come $P_{(S:T),i}$ è funzione del tempo necessario all'escursionista a percorrere la porzione pericolosa e dalla numerosità di transiti. Nel caso di sentieri in cui il traffico è variabile sia nelle varie ore del giorno, che durante i mesi dell'anno, è possibile calcolare il rischio sulla base di differenti condizioni di traffico. Definita quindi la *j*-esima condizione di traffico (in termini di numero di escursionisti per unità di tempo), si può ricavare la probabilità spazio-temporale $P_{(S:T)i}^{j}$ come prodotto tra la probabilità temporale che un escursionista stia transitando sul sentiero nello stesso istante in cui il blocco transita, $P_{(T:P)i}^{j}$, e la probabilità spaziale che la persona sia sulla traiettoria del blocco, $P_{(S:P)i}^{j}$:

$$ P_{(S:T)i}^{j} = P_{(T:P)i}^{j} \cdot P_{(S:P)i}^{j}. \tag{5.50} $$

I singoli valori di $P_{(T:P)i}^{j}$ e di $P_{(S:P)i}^{j}$ sono relativi allo scenario "l'escursionista è colpito dal blocco" lungo tutto l'anno. Tali valori sono desumibili dalla probabilità spazio-temporale relativa al singolo pedone (pedice $_1$ nelle

formule che seguono), moltiplicata per il traffico orario (numero di transiti all'ora) $n_{v/h}^{j}$ e il numero annuo di ore n_h^j in cui si verifica tale condizione di traffico. Si ottiene così la probabilità che, a seguito dell'evento, vi sia collisione tra blocco e escursionista come:

$$P_{(S:T)i}^{j} = P_{(T:P)i,1}^{j} \cdot P_{(S:P)i,1}^{j} . n_{\frac{v}{h}}^{j} \cdot n_h^j \, . \tag{5.51}$$

La probabilità spaziale di un singolo escursionista è ricavabile da:

$$P_{(S:P)i,1}^{j} = \frac{L_e}{\ell_{\mathrm{k}}}, \tag{5.52}$$

dove L_e è lo spazio occupato dalla persona trasversalmente alla linea di massima pendenza del pendio (generalmente assumibile nell'intervallo 0.6 m – 1.0 m) e ℓ_{k} la lunghezza della porzione di sentiero considerata. Nel dettaglio, la probabilità temporale di un singolo veicolo (pedice 1) $P_{(T:P)i,1}^{j}$ è data dal rapporto tra il tempo in ore per il quale il singolo escursionista si trova nella porzione considerata e il numero annuo di ore (8760). In particolare è possibile distinguere tra due scenari: escursionista in movimento e escursionista fermo. Nel primo caso, l'informazione temporale da utilizzarsi è rappresentata dal tempo di transito valutato a partire dalla velocità media lungo la porzione di tracciato considerata. Risulta quindi che:

$$P_{(T:P)i,1}^{j} = P_{(T:P)i,m,1}^{j} = \frac{t_t}{8760}, \tag{5.53}$$

dove t_t rappresenta il tempo di transito (espresso in ore) dell'escursionista lungo la porzione. Nel secondo caso, ossia escursionista fermo, l'informazione temporale da utilizzarsi è rappresentata dal tempo di sosta, ossia risulta:

$$P_{(T:P)i,1}^{j} = P_{(T:P)i,s,1}^{j} = \frac{t_s}{8760}, \tag{5.54}$$

dove t_s rappresenta il tempo di sosta (espresso in ore) lungo la specifica porzione di sentiero.
In relazione alle proprietà prima espresse, la probabilità di incidente mortale per impatto masso-escursionista in <u>movimento</u> per evento di crollo a partire dalla *i*-esima zona sorgente e con la *j*-esima condizione di traffico risulta:

$$PIM_{i,m}{}^{ij} = P_{(T:D)}^{i} \cdot P_{(T:P)i,m,1}^{j} \cdot P_{(S:P)i,1}^{j} . n_{v/h}^{j} \cdot n_h^j . \tag{5.55}$$

In relazione alle proprietà prima espresse, la probabilità di incidente mortale per impatto masso-escursionista in <u>sosta</u> per evento di crollo a partire dalla *i*-esima zona sorgente e con la *j*-esima condizione di traffico risulta:

$$PIM_{i,s}{}^{ij} = P_{(T:D)}^{i} \cdot P_{(T:P)i,s,1}^{j} \cdot P_{(S:P)i,1}^{j} . n_{v/h}^{j} \cdot n_h^j . \tag{5.56}$$

Le due probabilità possono essere sommate ottenendo la probabilità di incidente mortale per impatto masso-escursionista a partire dalla *i*-esima zona sorgente e con la *j*-esima condizione di traffico:

$$PIM_i{}^{ij} = PIM_{i,m}{}^{ij} + PIM_{i,s}{}^{ij}. \tag{5.57}$$

Considerate le differenti condizioni di traffico, la probabilità di incidente mortale per impatto masso-escursionista per evento di crollo a partire dalla *i*-esima zona sorgente risulta:

$$PIM_i{}^{i} = \sum_j PIM_i{}^{ij} = P^i_{(T:D)} \sum_j \left(P^j_{(T:P)i,m,1} + P^j_{(T:P)i,s,1} \right) . n^j_{v/h} \cdot n^j_h, \tag{5.58}$$

ossia la sommatoria è estesa alle condizioni di traffico.

5.4.2 Albero degli eventi semplificato

Come illustrato al §5.1, il dato relativo al numero di distacchi in parete potrebbe non essere disponibile in fase di redazione dell'analisi di rischio in quanto tale informazione non è di facile reperimento su tutte le pareti e richiede un monitoraggio del territorio di lunga durata. Inoltre, studi specifici circa la cosiddetta propensione al distacco devono essere adeguatamente calati alla realtà che si sta studiando e, quindi, potrebbero risultare non sempre applicabili a tutti i casi. Si possiedono, invece, usualmente, molte più informazioni circa i massi che hanno interessato direttamente la via di transito. Tali informazioni sono fornite dai gestori della rete sentieristica e dagli utilizzatori della stessa. È quindi possibile modificare l'albero di eventi presentato in Figura 12 inglobando le precedenti considerazioni. La Figura 14 e la Figura 15 riportano l'albero di eventi semplificato e la nomenclatura relativa alle probabilità. Lo schema ha origine dall'evento "Blocco su sentiero" e si sviluppa in maniera analoga al precedente, fatto salvo il termine relativo all'analisi di propagazione. Nel dettaglio, considerando che il tracciato della pista forestale è suddiviso in porzioni, sarebbe opportuno definire l'evento come "Blocco su porzione di sentiero".

L'evento iniziatore è caratterizzato da una frequenza annua di accadimento N_R^k, come riportato nell'Eq. (5.2). Relativamente alla differenziazione relativa alle aree sorgente, nel caso semplificato tale valutazione non è necessaria. Analogamente a quanto precedentemente esposto, qualora il numero di eventi all'anno sia esiguo, è possibile confondere la frequenza annua di accadimento con la probabilità annua di accadimento di un blocco su strada. In tale caso, questa sarà indicata come $P^k_{(R)}$. Anche nel caso di albero di eventi semplificato restano valide le considerazioni di omogeneità dei tratti da scegliere, precedentemente esposte per il caso generale, per la valutazione quantitativa del rischio.

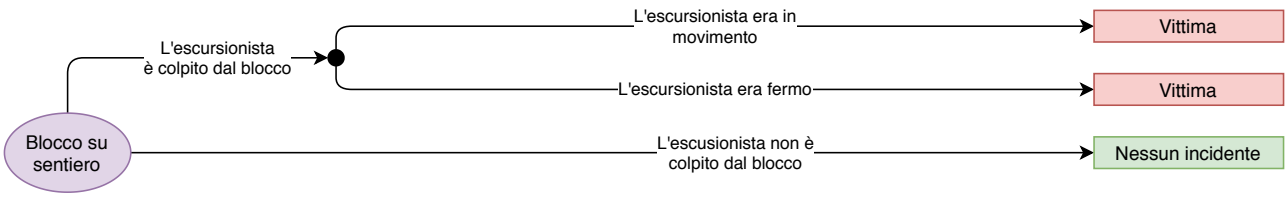


Figura 14. Albero degli eventi semplificato a seguito dell'arrivo di un blocco sul sentiero.

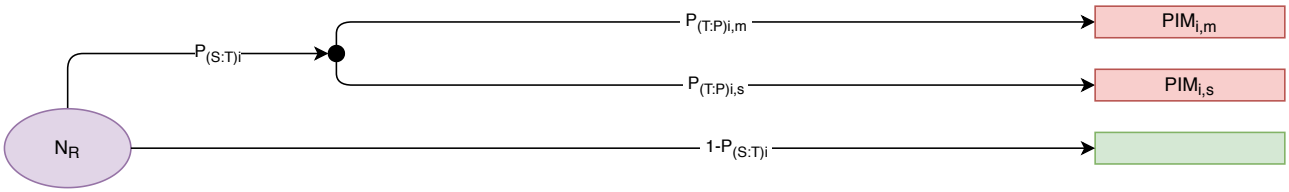


Figura 15. Indicazioni sulle probabilità nell'albero degli eventi di Figura 14. L'indice superiore relativo alla j-esima condizione di traffico non è riportato per questioni di chiarezza.

Essendo inalterato lo sviluppo dell'albero a valle del blocco su porzione di sentiero, sulla base delle considerazioni precedentemente riportate circa la condizione di marcia dell'escursionista (in sosta o in movimento), è possibile pervenire alle probabilità di vittima a seguito di impatto con escursionista come:

$$ {}^{k}PIM = \sum_{j} \left(P^{j}_{(T:P)i,m,1} + P^{j}_{(T:P)i,s,1} \right) . n^{j}_{v/h} \cdot n^{j}_{h}. \tag{5.59} $$

In riferimento alla *k*-esima porzione, in accordo a quanto precedentemente esposto, è possibile valutare la probabilità di avere nell'arco di un anno almeno una vittima a seguito di incidente dovuto ad un blocco su sentiero come:

$$ {}^{k}P_{vittima} = 1 - \left(1 - {}^{k}PIM\right)^{N^{k}_{R}}. \tag{5.60} $$

Considerando l'assunzione di $P^{k}_{(R)} \approx N^{k}_{R}$, è possibile valutare la probabilità annua di avere un incidente con vittima pari a:

$$ {}^{k}P_{vittima} = P^{k}_{(R)} \cdot {}^{k}PIM. \tag{5.61} $$

Il rischio totale associato ad un transito lungo l'intero tracciato è la somma delle probabilità desunte dal calcolo su ciascuna porzione omogeneo, ossia

$$ P_{vittima} = \sum_{k} {}^{k}P_{vittima}. \tag{5.62} $$

5.5 Metodo ETA per ferrovia

La letteratura scientifica tratta in maniera limitata il problema del rischio dovuto a caduta massi sull'infrastruttura ferroviaria. Esempi di tali trattazione sono riportati in Bunce *et al.* (1997), Guzzetti *et al.* (2004), Pine e Roberds (2005), Macciotta *et al.* (2016), Macciotta *et al.* (2017). La metodologia proposta dal gruppo di ricerca per la stima del rischio lungo tale tipologia di infrastrutture è riconducibile allo schema di albero degli eventi, come di seguito illustrato. Gli scenari analizzati sono coerenti con quanto riportato in letteratura. Il diagramma ad albero proposto prende in considerazione il fatto che la rete ferroviaria italiana

presenta, per i tracciati che insistono su zone con pericolo caduta massi, un sistema di segnalazione di ostacoli lungo la via ferrata. Tali sistemi di segnalazione sono attivati con una rete a strappo, ossia un sensore costituito da un reticolo di fili elettrici. Quando un blocco in transito trancia uno dei cavi (il filo non ha la capacità di arrestare il blocco in movimento) il circuito elettrico si apre e il segnale ferroviario posto all'estremità della zona pericolosa diviene rosso segnalando il divieto di percorrere la via.

Qualora la traiettoria del blocco in fase di crollo raggiunga la ferrovia, il blocco può colpire, o meno, un convoglio in transito. Nel caso, invece, in cui il blocco non colpisca il treno, è possibile che si arresti sul binario ferroviario o che rimbalzi e prosegua verso valle. In caso di impatto diretto con il convoglio in transito, è possibile che il treno prosegua la sua corsa oppure che deragli. In quest'ultimo caso, l'incidente può comportare vittime o feriti. Nel caso in cui il blocco non impatti il convoglio, è possibile assumere che il masso si fermi sulla ferrovia o che la danneggi. Nel caso in cui la via ferrata non sia dotata di sistema di segnalazione caduta massi a strappo, il macchinista sul convoglio è l'unico soggetto che può vedere l'ostacolo e, quindi, arrestare la corsa. Se questo non è possibile in quanto, per esempio, la visibilità è limitata, allora il treno urterà il blocco con conseguente possibile deragliamento con vittime o ferite. Al contrario, se la via ferrata è dotata di sistema di segnalazione, allora è necessario considerare che il treno possa trovarsi all'interno del blocco ferroviario quando il crollo avviene. In questo caso, il solo macchinista a vista può operare per l'arresto del treno. Qualora questo non fosse possibile, vi sarebbe un possibile deragliamento con conseguenti vittime o feriti. Se, al contrario il crollo di roccia avviene in un istante in cui il convoglio non si trova all'interno del blocco ferroviario il sistema di segnalazione segnala la presenza di un ostacolo e interrompe la corsa del treno. Lo schema concettuale alla base delle precedenti considerazioni è riportato in Figura 16.

Occorre precisare l'albero di eventi precedentemente esposto deve necessariamente prendere in considerazione il volume del blocco crollato in quanto la possibilità di deragliamento dipende dalla dimensione del blocco di roccia. Piccoli volumi, infatti, non comportano alcun danno.

Definite le varie probabilità dei nodi dell'albero degli eventi è possibile determinare la probabilità finale di ciascun scenario, identificato dal percorso creato dai rami lungo l'albero, moltiplicando le probabilità dei singoli rami costituenti il percorso considerato. Considerando che il tratto di ferrovia è diviso in porzioni omogenee, la probabilità totale relativa a tutti i percorsi con stesso esito (ad esempio, incidente con vittima) della porzione di ferrovia analizzata è calcolata quale la somma delle singole probabilità.

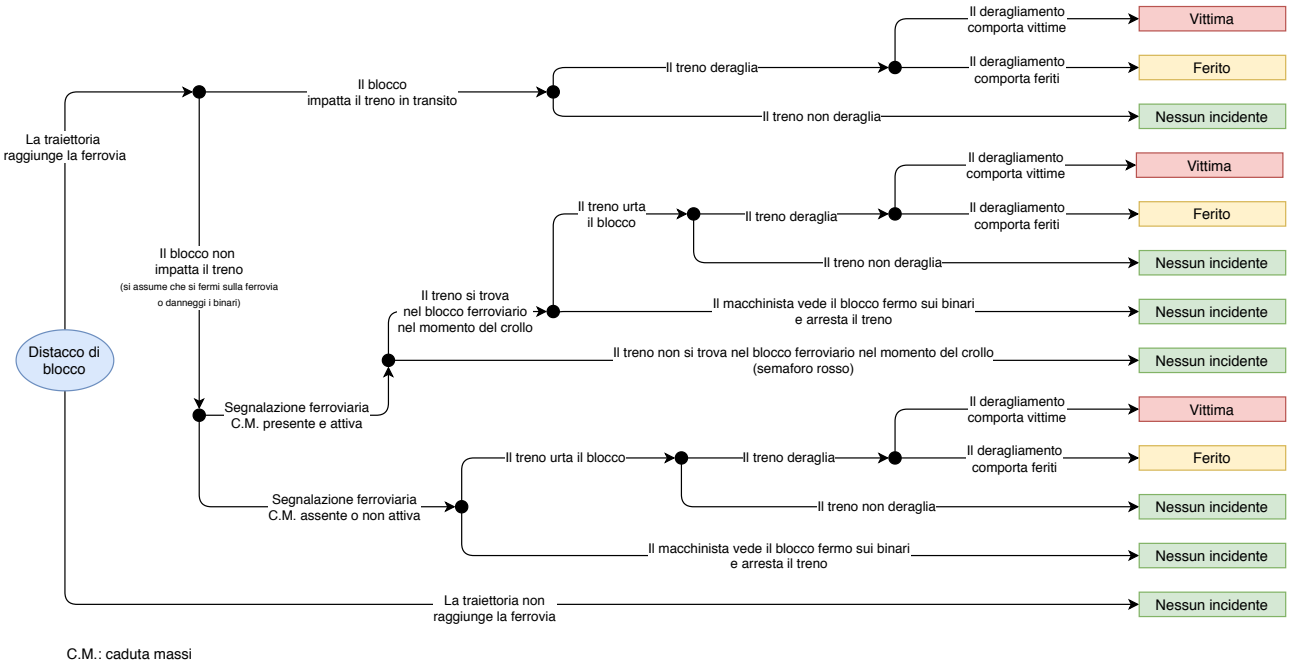


Figura 16. Albero degli eventi a seguito di un distacco in parete.

6 CALCOLO DEL RISCHIO PER ELEMENTI CON ESPOSIZIONE UNITARIA

6.1 Premessa metodologica

Per la quantificazione del rischio in elementi a rischio statici quali singoli fabbricati, edifici, gruppi di fabbricati, borgate, occorre conoscere (Fell, 1994):

- la pericolosità (**H**) del sito, ossia la probabilità spaziale e temporale che un evento di data intensità/tempo di ritorno si verifichi;
- la vulnerabilità (**V**) degli elementi a rischio, ossia il grado di perdita dell'elemento. Questa è funzione:
    - dell'intensità del fenomeno
    - delle caratteristiche dell'elemento a rischio (in funzione del tipo di analisi, e.g. fisica, economica, sociale, ambientale);
- il valore (**Val**) degli elementi a rischio (in funzione del tipo di analisi, e.g. fisica, economica, sociale, ambientale),

dove il prodotto tra la vulnerabilità e il valore definisce il danno (**D**).

Le borgate, in quanto elementi statici, e la popolazione che in esse risiede presentano un grado di esposizione (**E**) pari a 1, ossia la probabilità che siano esposte a rischio all'occorrenza del fenomeno considerato in quello spazio è pari al 100%.

Essendo l'esposizione unitaria, l'equazione del rischio (**R**), espresso come il prodotto tra pericolosità, esposizione, vulnerabilità e valore, può essere semplificata come prodotto tra pericolosità e il danno:

$$\mathbf{R} = (\mathbf{H} \cdot \mathbf{E}) \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{Val} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{D} \qquad (6.1)$$

Qualora non sia possibile disporre di informazioni temporali si può sostituire la pericolosità con la pericolosità relativa ($\mathbf{H_r}$), oppure quando non si dispone di indicazioni né sull'intensità iniziale né un legame intensità del fenomeno/tempo di ritorno accurato, la pericolosità può essere sostituita dalla suscettibilità (S), ossia dalla probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo (nel caso in esame di caduta massi) si verifichi in una certa area.

Nota la probabilità di occorrenza spaziale dell'area, ai fini di una gestione del rischio occorre però una quantificazione delle potenziali energie di arrivo, in funzione dell'intensità (ossia dal volume) di partenza e dal tempo di ritorno ad essa associata. In particolare, la quantificazione delle energie risulta infatti utile per la valutazione della vulnerabilità degli elementi a rischio e, nel caso di adozione di opere di protezione quali opere di mitigazione del rischio, per il dimensionamento delle stesse (Corominas e Moya, 2008).

La valutazione della vulnerabilità degli edifici e del loro valore risulta funzione del tipo di rischio che s'intende valutare e può essere espressa in termini quantitativi o qualitativi.

Concentrandosi sulle **abitazioni**/borgate, in linea generale, il rischio considerato può essere:

- fisico, ossia associato al costo del bene stesso (e.g. costo di costruzione);

- socio-economico, ossia associato al valore del bene stesso (e.g. valore immobiliare di vendita) e alle eventuali conseguenze sociali e politiche;
- sociale, ossia associato al numero di persone che vi abitano;
- ambientale/paesistico.

Scelto il rischio da valutare, il danno risulta funzione dell'energia di arrivo del fenomeno potenzialmente distruttivo e delle caratteristiche dell'elemento a rischio (e.g. la tipologia strutturale, lo stato di manutenzione, l'altezza dell'edificio, il numero di persone che vi abitano, il prestigio storico etc.).

La presente relazione, applicata ad un caso reale, intende fornire una metodologia di validità generale per una scala di analisi media, ossia relativa a piccole borgate. I risultati ottenuti utilizzando l'approccio qui descritto possono essere utilizzati per pianificare gli interventi e assegnare ordini di priorità per la gestione del rischio. Le valutazioni, essendo riferite ad un'area estesa, dovranno poi essere approfondite in funzione del tipo di rischio che si intende valutare e/o nel caso di analisi di dettaglio condotte su edifici specifici. Unitamente, qualora si intenda predisporre opere di mitigazione del rischio, sarà necessario che il tecnico incaricato della progettazione delle opere effettui un'analisi quantitativa in cui vengono analizzati i dettagli e le specificità del sito su cui dovranno essere installate le opere.

6.2 Metodologia proposta

In funzione di quanto esposto nel §6.1, la presente relazione intende fornire gli strumenti utili per un'analisi preliminare del rischio a scala di borgata, che deve essere approfondita per lo studio di edifici specifici e per un'eventuale progettazione di opere di protezione.

A partire dai risultati dell'analisi di pericolosità a media scala, per ogni borgata, occorre effettuare un'ulteriore analisi ad hoc, che prevede di:

1. individuare e localizzare compiutamente il fenomeno;
2. definire gli scenari possibili, ossia valutare il legame volume/tempo di ritorno degli eventi;
3. effettuare l'analisi di propagazione per la valutazione della probabilità di accadimento spaziale per ogni scenario;
4. associare la probabilità spaziale al tempo di ritorno;
5. valutare l'intensità di arrivo.

Relativamente alla valutazione del legame volume/tempo di ritorno, il §3.2.1 della presente relazione fornisce utili suggerimenti su una possibile metodologia operativa, e il §7.1.4 applica questa metodologia al caso studio in esame.

In merito alla metodologia adottata per le analisi di propagazione condotte si rimanda al §3.2.2 della presente relazione, e al §7.2 per la sua applicazione al caso studio. Per la valutazione del rischio, come precedentemente espresso, occorre calcolare l'energia associata al fenomeno nel sito ove è collocato l'elemento a rischio.

In merito alla valutazione dell'intensità, la quantificazione dell'energia di arrivo è funzione della volumetria d'innesco del blocco, scelta in fase di definizione dello scenario, oltre che delle caratteristiche della topografia e della tipologia della superficie su cui impatta.

La scelta della volumetria d'innesco risulta spesso un'operazione complessa. Una volta individuate le possibili volumetrie occorre effettuare analisi di propagazione mirate, mediante modelli numerici fisicamente basati che si avvalgono di approcci statistico-probabilistici.

Tra i modelli di calcolo delle traiettorie, quelli di tipo lumped-mass, benché semplificati in quanto non permettono di considerare la geometria del blocco e il moto rotatorio sia valutato in maniera semplificata, risultano particolarmente utili per operare alla scala di borgata. Questi modelli, basandosi sull'equazione del moto di tipo parabolico (blocco in caduta) e di scivolamento, restituiscono traiettorie e parametri cinematici (velocità e altezza di volo) indipendenti dalla massa. Pertanto, note la velocità nel punto in esame, è possibile quantificare l'energia cinetica per differenti volumetrie come:

$$E_k = \frac{1}{2} m_k v_k^2 \qquad (6.2)$$

dove m_k e v_k sono i valori caratteristici della massa (funzione del volume scelto) e della velocità del blocco.

La normativa italiana (D.M. 17 febbraio 2018 Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni») non effettua una specifica trattazione della tematica, pertanto, relativamente ai valori caratteristici e di progetto, la norma italiana UNI 11211-4 (2018) fornisce utili raccomandazioni per il calcolo dei parametri di impatto sulle opere paramassi passive (Par. 5.3), di cui si rimanda al §6.2.1 della presente.

Alla luce di quanto espresso, per la valutazione dell'energia a media scala la metodologia proposta suggerisce di effettuare una o più analisi traiettografiche bidimensionali lumped-mass su direttici ritenute particolarmente significative e valutare su queste la velocità e l'altezza di transito del blocco in corrispondenza della borgata. Queste quantità sono fornite in termini di valori caratteristici che, come evidenziato al §6.2.1 della presente, sono i valori i corrispondenti al frattile 95% della distribuzione di probabilità.

Dalla combinazione di questi risultati con le considerazioni del legame volume d'innesco/tempo di ritorno sulla determinata area si possono ricavare le energie di progetto.

Le direttrici devono prendere in considerazione le aree a maggiore pericolosità, identificate dalle analisi di propagazione tridimensionali, scegliendo il percorso di caduta più probabile in funzione della topografia del sito.

Riassumendo, la metodologia proposta fornisce, per ogni borgata:

- una mappa delle potenziali zone d'innesco insistenti sulla borgata, individuando un volume d'innesco potenziale cautelativo;
- una mappa della probabilità di occorrenza spaziale dell'evento di caduta massi, effettuata con l'adozione di un volume d'innesco sufficientemente cautelativo;
- individuazione delle direttrici ritenute particolarmente significative;
- risultati delle analisi traiettografiche bidimensionali su queste direttrici, in termini di:

- punti di arresto lungo il pendio sulla specifica direttrice;
- distribuzione delle velocità lungo il pendio sulla specifica direttrice;
- velocità 95% in corrispondenza della borgata;
- altezza di volo 95% in corrispondenza della borgata.

In funzione di questi risultati, adottando i coefficienti amplificativi suggeriti dalla norma UNI 11211-4 (2018) e riportati al §6.2.1 della presente, è possibile calcolare l'energia di impatto di progetto e, successivamente, condurre le analisi di rischio relative.

6.2.1 Norma UNI 11211-4:2018: parametri di impatto

Si riporta ora uno stralcio della norma UNI 11211-4:2018, utile a fornire indicazioni per la valutazione dell'energia di impatto. La velocità di progetto dei blocchi v_d è calcolata come:

$$v_d = v_k \cdot \gamma_F \tag{6.3}$$

dove v_k è definita come la velocità in corrispondenza del punto considerato corrispondente al frattile 95% delle velocità calcolate nelle analisi traiettografiche, mentre γ_F è il coefficiente di amplificazione, espresso come $\gamma_F = \gamma_{Tr}\gamma_{Dp}$, dove γ_{Tr} è il coefficiente di affidabilità del calcolo delle traiettorie (1,02 per simulazioni di caduta basate su coefficienti di restituzione – o altri parametri eventualmente richiesti – ottenuti da analisi a ritroso e 1,10 per simulazioni di caduta basate su coefficienti di restituzione – o altri parametri eventualmente richiesti – ottenuti da sole informazioni bibliografiche), mentre γ_{Dp} è il coefficiente che tiene conto della qualità della discretizzazione topografica del pendio (1,02 per pendii discretizzati con buona precisione in rapporto alle caratteristiche del sito, 1,10 per una discretizzazione medio bassa).
Relativamente alla massa di progetto m_d, questa è calcolata come:

$$m_d = V_b \rho\, \gamma_m \tag{6.4}$$

dove V_b è il volume del blocco di progetto, ρ è la massa per unità di volume della roccia in posto, γ_m è il coefficiente di amplificazione della massa espresso come $\gamma_m = \gamma_{VolF1}\gamma_\psi$, dove γ_{VolF1}è il coefficiente legato alla precisione del rilievo del volume del blocco di progetto (1,02 per rilievi accurati, 1,10 in assenza di rilievi accurati), mentre γ_ψè il coefficiente legato alla valutazione della massa per unità di volume della roccia (generalmente assunto pari a 1).

6.2.2 Analisi traiettografiche bidimensionali

Come espresso nel §6.2, le simulazioni preliminari per la valutazione dell'energia devono essere impostate su sezioni trasversali al versante ritenute particolarmente significative. Per il computo del rischio e per la progettazione di interventi di mitigazione, ulteriori analisi potrebbero essere necessarie sulla base dei rilievi specificatamente integrati dai progettisti, anche su altre direttrici. Il codice di calcolo suggerito per queste analisi si avvale di un modello di moto bidimensionale e comportamento di tipo lumped mass.

Nei codici di calcolo tradizionali di tipo lumped-mass il coefficiente di restituzione tangenziale e il coefficiente di restituzione normale sono i coefficienti rappresentativi dell'interazione suolo-blocco. Questi rappresentano fisicamente rispettivamente il rapporto tra la velocità dopo e prima che il masso rimbalzi al suolo, in direzione tangenziale e normale. Altro parametro risulta il coefficiente di attrito, che regola il moto traslatorio del blocco. I coefficienti di restituzione, in questo caso, devono essere rappresentativi del tipo di suolo su cui il blocco impatta, del tipo di roccia del blocco che impatta, ma devono anche essere calibrati per racchiudere al loro interno le ipotesi semplificative che il modello implementato nel codice presenta (e.g. assenza di rotolamento). Ai fini della simulazione occorre valutare i seguenti parametri geomeccanici di input:

- base topografica di input: in funzione del rilievo di dettaglio a disposizione;
- velocità di caduta iniziale;
- tipologia delle sorgenti di distacco: puntuali e/o lineari;
- densità della roccia;
- numero di simulazioni simulazioni per ogni sorgente di distacco: queste devono costituire un campione statistico rappresentativo. La rappresentatività del campione è stata analizzata verificando che il numero di blocchi per cella minimizzi l'errore, al fine di limitare gli errori epistemici dovuti al modello;
- il codice di calcolo di tipo lumped-mass prevedono generalmente l'assenza di fenomeni di frantumazione dei blocchi;
- il codice di calcolo di tipo lumped-mass prevedono generalmente si avvale del metodo probabilistico Montecarlo per la determinazione dei parametri, ovvero il coefficiente di restituzione normale R_n, il coefficiente di restituzione tangenziale R_t e angolo di attrito al rotoscivolamento φ. Per la determinazione di questi ultimi occorre effettuare un'analisi quanto più accurata delle caratteristiche del terreno e dell'interazione blocco-terreno e, qualora possibile effettuare una calibrazione e/o validazione dei parametri scelti.

7 CASO STUDIO

Il caso studio relativo al presente contratto di ricerca è rappresentato dalla porzione di territorio localizzata nella sinistra orografica del bacino della Dora Baltea nei comuni di Saint-Denis, Chambave e Châtillon. L'area si estende da una quota di circa 500 m s.l.m. (argine della Dora Baltea) fino alla quota 1100 m s.l.m. (sommità del canalone del Grand-Frayan) nella parte orientale e alla quota 800 m s.l.m. nella parte occidentale, come riportato nella Figura 17. La porzione di territorio oggetto di studio è limitata ad ovest dalla verticale del castello di Cly e ad est dal tracciato della condotta forzata della centrale idroelettica di Breil di proprietà della CVA. L'area copre un'estensione di circa 180 ettari. Come meglio dettagliato nel seguito della presente, sull'area insistono numerose pareti rocciose, anche di notevole dimensione, così come molteplici elementi a rischio, quali strade, rete sentieristica, ferrovia e centri abitati.

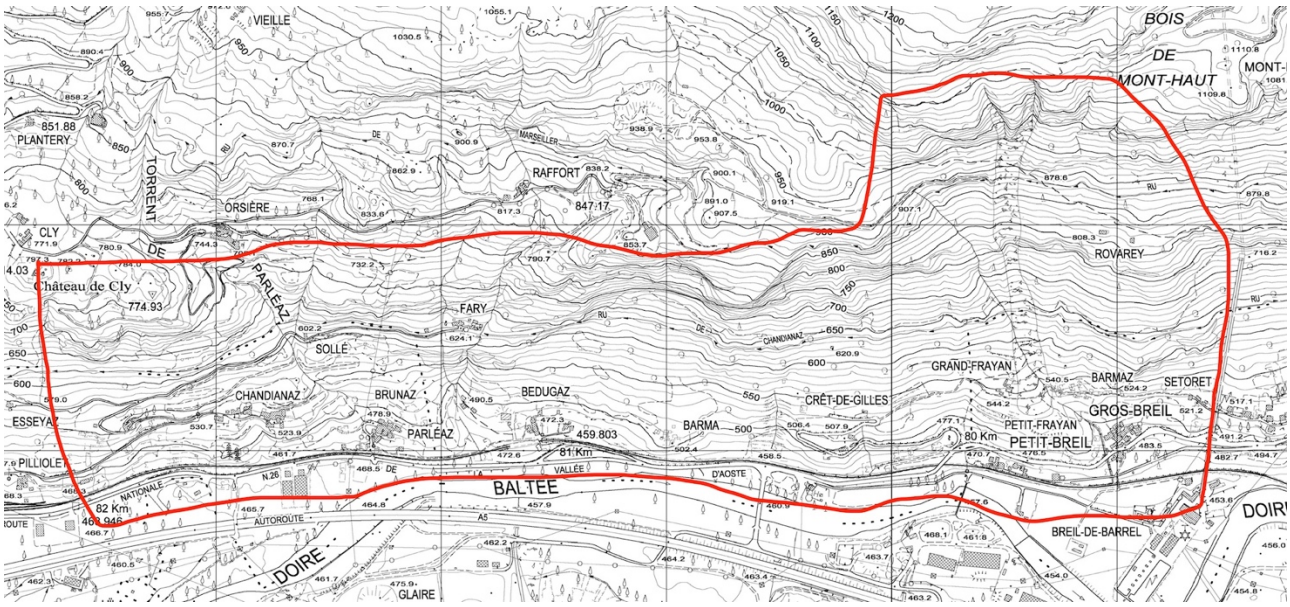


Figura 17. Localizzazione dell'area studio.

7.1 Identificazione del fenomeno, individuazione delle aree sorgenti e dei loro volumi (scenari)

L'individuazione delle aree sorgenti e dei volumi potenzialmente coinvolti è avvenuta attraverso le seguenti modalità operative:

- studio della documentazione cartografica e relazioni a disposizione, in grado di fornire informazioni geologiche, litologiche, idrogeologiche, geomorfologiche e dei dissesti dell'area. La documentazione presente sul geoportale regionale (http://geoportale.regione.vda.it/, http://catastodissesti.partout.it/) è stata integrata con le risultanze del Rapporto Tecnico "Servizio di rilievi, con tecniche laser-scan e fotogrammetriche, finalizzati alla progettazione di opere di mitigazione del rischio per fenomeni di caduta massi tra gli abitati di Chandianaz e Grand-Frayan nei Comuni di Chambave e Châtillon" a cura di IMAGEO S.R.L., datato 27 dicembre 2019. Le risultanze della caratterizzazione geologica-geomorfologica sono riassunte al §7.1.1 della presente, mentre le risultanze dell'analisi storica degli eventi pregressi sono individuabili al §7.1.2;
- rilievi in situ finalizzati allo studio dell'area. In particolare sono stati condotti rilievi in data 26/09/2019, 18/11/2019, 21/11/2019, 14/01/2020 finalizzati all'individuazione delle pareti potenzialmente sorgenti d'innesco, alla valutazione qualitativa delle condizioni geostrutturali delle pareti stesse, allo studio della tipologia di terreno presente, della pezzatura e disposizione dei detriti, alle evidenze di crolli presenti e rilievi dei blocchi al piede, così come meglio specificato al §7.1.1 della presente;
- studio delle risultanze delle analisi condotte da IMAGEO S.R.L., ossia delle elaborazioni dei rilievi fotogrammetrici e laser scanner delle porzioni rocciosi condotte in termini di ortofoto planimetriche e frontali delle pareti, e di caratterizzazione geomeccanica delle pareti, così come riportato nel Rapporto Tecnico "Servizio di rilievi, con tecniche laser-scan e fotogrammetriche, finalizzati alla progettazione di opere di mitigazione del rischio per fenomeni di caduta massi tra gli abitati di Chandianaz e Grand-Frayan nei Comuni di Chambave e Châtillon" a cura di IMAGEO S.R.L., datato 27 dicembre 2019 e nelle tavole allegate:
    - Allegato 1: risultati del rilievo geomeccanico;
    - Allegato 2: parametri geomeccanici;
    - Allegato 3: Volume Roccioso Unitario;
    - Allegato 4: Slope Mass Rating SRM.

7.1.1 Caratterizzazione geologica-geomorfologica e dei dissesti

Come riportato nel Rapporto Tecnico "Servizio di rilievi, con tecniche laser-scan e fotogrammetriche, finalizzati alla progettazione di opere di mitigazione del rischio per fenomeni di caduta massi tra gli abitati di Chandianaz e Grand-Frayan nei Comuni di Chambave e Châtillon" a cura di IMAGEO S.R.L., datato 27

dicembre 2019, le rocce del versante in studio appartengono alla Zona Piemontese dei Calcescisti con pietre verdi, costituita da due principali gruppi di unità ofiolitiche con metamorfismo di subduzione contrastante, ma con analoga sovraimposta in facies scisti verdi. I due gruppi di unità ofiolitiche sono derivate dalla chiusura dell'oceano mesozoico Ligure-Piemontese e si distinguono in unità non eclogitiche e unità eclogitiche. Nell'area in esame affiorano principalmente le rocce delle unità eclogitiche di Zermatt-Saas costituite da dominanti ofioliti e da coperture metasedimentarie, con diffusi relitti eclogitici e sovraimpronta metamorfica in facies scisti verdi, da incipiente a completa. Spesso sono presenti estese sequenze di oficalci, bene esposte in numerose cave, possibile evidenza di processi di denudazione tettonica del mantello. Le coperture metasedimentarie sono costituite da sequenze oceaniche ad affinità liguride (quarziti, marmi) e da sequenze orogeniche (calcescisti e micascisti a calcite). In riferimento alla Figura 18, nell'area, si riconoscono, all'interno dell'Unità del Combin (non eclogitica):

- Prasiniti (ZCP), affioranti all'estremità occidentale dell'area, nei pressi di Chambave, le quali formano corpi tabulari o lenticolari, anche di notevole estensione, intercalati all'interno dei calcescisti; hanno colore verde chiaro, facile suddivisibilità lastroide e spessore molto variabile.

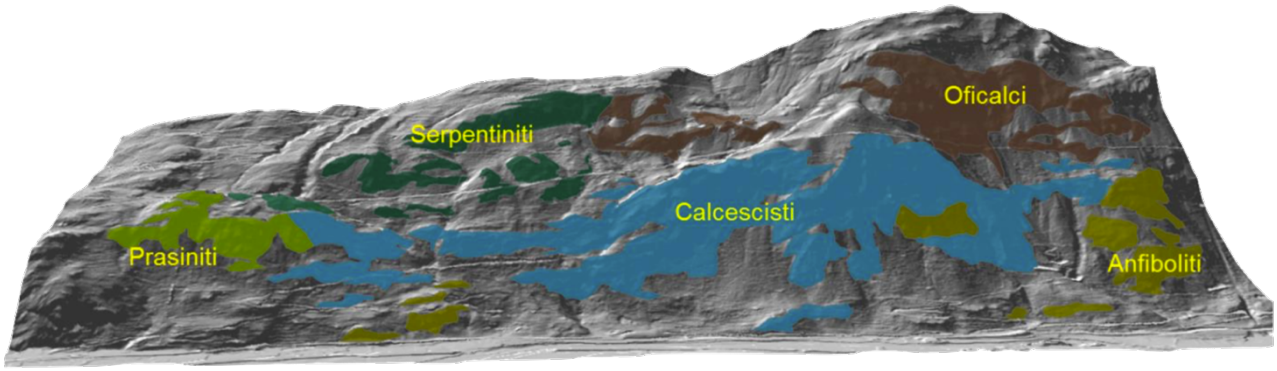


Figura 18. Disposizione delle unità individuate, immagine tratta dal Rapporto Tecnico di IMAGEO.

All'interno dell'unità Zermatt-Saas (eclogitica), si rinvengono:

- Calcescisti s.l. indifferenziati (ZZS), costituiti da alternanze, in genere non cartografabili, di tipi carbonatici e varietà terrigene, rappresentati da calcescisti e da micascisti poveri o privi di carbonato, con subordinate intercalazioni di quarziti, marmi impuri e scisti filladici plumbei;
- Anfiboliti (ZSA), affioranti all'estremità orientale dell'area: metabasalti a relitti di granato e glaucofane, con forte impronta in facies scisti verdi; nelle parti meno deformate contengono eclogiti e glaucofaniti granatifere, in rapporti transizionali;
- Serpentiniti (ZSS), affioranti nell'alto versante occidentale: hanno struttura da massiccia a fortemente scistoso- laminata; sono frequenti varie generazioni di vene con cristalli di serpentino fibroso, a volte di notevoli dimensioni. Talora contengono filoni di gabbri, rodingiti e locali zone di reazione con rocce incassanti;

- Oficalci (ZSSa), affioranti nell'alto settore orientale: brecce a frammenti di serpentinite in matrice carbonatica di origine sedimentaria e/o idrotermale. In molti casi i frammenti mostrano deformazioni duttili precedenti alla genesi della matrice e sono tagliati da varie generazioni di vene di calcite. Localmente contengono lenti di marmi e quarziti mesozoiche di origine esotica. Affiorano generalmente a tetto dei corpi di serpentiniti massicce con spessori fino a pluriettometrici.

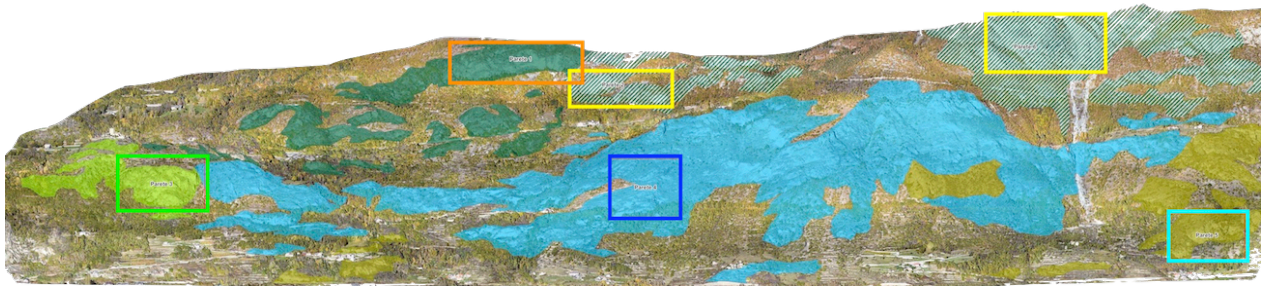
L'analisi strutturale condotta da IMAGEO e riportata nel Rapporto Tecnico precedentemente menzionato indica che, complessivamente, tutti i settori sono interessati dagli stessi principali sistemi di discontinuità, anche se in base alla diversa orientazione degli affioramenti possono risultare più o meno rappresentati.

I parametri geomeccanici degli ammassi sono stati desunti da IMAGEO analizzando la nuvola di punti ricavata con fotogrammetria secondo l'approccio bidimensionale della "finestra di osservazione". La metodologia di lavoro si basa sull'identificazione delle *breakline* del modello 3D ottenuto dall'elaborazione della nuvola di punti, dalle quali vengono ricavate in modo automatico le tracce delle discontinuità sulla superficie che interpola il fronte roccioso. Queste sono quindi classificate in base alla loro inclinazione apparente ed utilizzate per determinare le proprietà geomeccaniche delle porzioni d'ammasso roccioso contenute all'interno della "finestra d'osservazione" (una per ogni unità litologica), quali: spaziatura dei singoli sistemi di discontinuità, P21, Jv (Volumetric Joint Count) e VRU (Volume Roccioso Unitario).

Ai fini delle analisi di rischio si evidenziano i volumi rocciosi unitari (VRU) riportati nella Tabella 1. Tali volumi sono estrapolati dalla Tabella 4-4 del Rapporto Tecnico "Servizio di rilievi, con tecniche laser-scan e fotogrammetriche, finalizzati alla progettazione di opere di mitigazione del rischio per fenomeni di caduta massi tra gli abitati di Chandianaz e Grand-Frayan nei Comuni di Chambave e Châtillon" a cura di IMAGEO S.R.L., datato 27 dicembre 2019. Questi sono stati ricavati effettuando elaborazioni in specifiche finestre di osservazione, riportate in Tabella 1 e nella figura ad essa associata.

Tabella 1. Volumi Rocciosi Unitari desunti dall'analisi condotta da IMAGEO e localizzazione delle aree di campionamento delle volumetrie.

Litologia	Minimo (m^3)	Medio (m^3)	Massimo (m^3)
Serpentiniti	0.5	1.7	10.2
Oficalci (inviluppo)	0.2	3.5	9.9
Prasiniti	0.2	0.9	3.3
Calcescisti	0.1	0.6	2.3
Anfiboliti	0.2	0.6	6.1



7.1.2 Analisi degli eventi pregressi

L'analisi degli eventi pregressi è stata realizzata mediante la consultazione del Catasto Dissesti regionale (http://catastodissesti.partout.it/), che ha permesso di analizzare i fenomeni franosi occorsi nell'area in esame, con particolare riferimento ai fenomeni di caduta massi nel periodo di attivazione del Catasto, nato in forma embrionale nei primi anni '90, sviluppatosi in forma cartografica a partire dagli anni 2000, assumendo la sua configurazione attuale a partire dal 2011.

Figura 19 riporta gli eventi censiti nel Catasto Dissesti regionale come elementi puntuali, lineari o areali, unitamente alle indicazioni presenti nel catalogo IFFI in merito alle deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV) e alle aree soggette a frane diffuse (http://geonavsct.partout.it/pub/GeoCartoSCT/index.html).

La Tabella 2 riporta, per ciascun evento, ove presenti:

- l'ID del fenomeno franoso così come censito nel Catasto Dissesti e corrispondente alla scheda di dettaglio scaricabile dal geonavigatore (http://geonavsct.partout.it/pub/geodissesti/);
- la tipologia di movimento;
- la località (come da catasto dissesti);
- la data;
- indicazioni sulla volumetria, ove possibile suddivisa in complessiva e unitaria (VRU);
- indicazioni sulla quota di innesco e/o arrivo, sulle cause innescanti e sui danni.

L'analisi degli eventi pregressi ha permesso di fornire indicazioni sulle possibili volumetrie d'innesco (§7.1.5), unitamente alla base dati storica per la creazione del legame volume d'innesco/tempo di ritorno (§7.1.4).

In aggiunta, questa analisi ha permesso di fornire indicazioni relative al numero di eventi all'anno che si possono verificare sugli elementi a rischio lineari e con esposizione non unitaria (§5) e quindi raggruppare per tratti omogenei su cui calcolare il rischio. In riferimento a quest'ultimo punto, sono quindi state raggruppate le località della sorgente d'innesco nelle seguenti macro-aree, indicate nell'ultima colonne della Tabella 2:

- Cly;
- Chandianaz;
- Fary-Bedeguaz-Barma;
- Crêt-de-Gilles;
- Grand-Frayan;
- Gros-Breil.

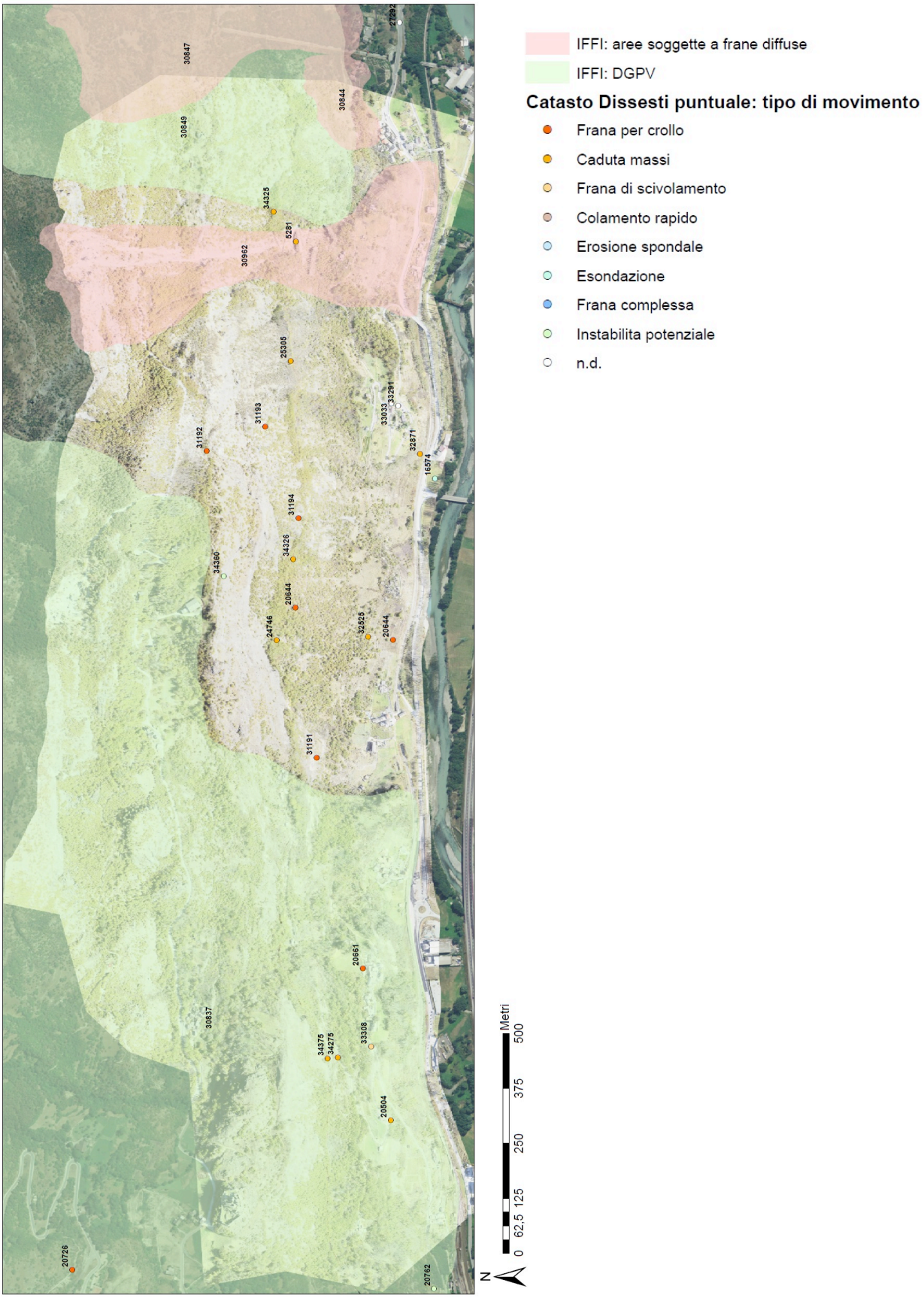


Figura 19. Eventi pregressi censiti nel Catasto Dissesti.

Tabella 2. Tabella riassuntiva dei fenomeni franosi occorsi nell'area oggetto di studio. La fonte delle informazioni è il Catasto Dissesti della Regione Autonoma della Valle d'Aosta. In grigio sono segnalati gli eventi di cui non si dispongono informazioni o relativi a fenomeni non di caduta massi. n.c.= non classificabile, in quanto il fenomeno di cedimenti di muretti a secco non è stata considerata.

ID	Tipologia	Località	Data	Volume	NOTE	Link	Area sorgente
32871	Caduta massi	Crêt-de-Gilles	06/01/2017	Totale: <25m^3, VRU: <10m^3	*Cause*: gelo-disgelo *Danni*: interruzione alla ferrovia e SS26	Scheda	Crêt-de-Gilles
20661	Caduta massi	Chandianaz	luglio 2004	Volumi lastroidi	*Quota di distacco*: a tergo delle case	Scheda	Chandianaz
33308	Caduta massi, terra ed elementi vegetali	Chandianaz	21/01/2018	15-20m^3	*Cause*: infiltrazione di acuqa, fratturazione roccia *Danni*: linea telecom, segnaletica, piante	Scheda	Chandianaz
34375	Caduta massi	Cesseyaz	29/10/2018	3-5 m^3	*Cause*: piogge *Danni*: passerella Ru Chandianaz e strada comunale *Quota di distacco*: 650 m slm	Scheda	Cly
34275						Scheda	
14988	Frana di crollo	Frayan	19/04/1922		*Danni:* a case e ferrovia	Scheda	Grand-Frayan
15526	Frana di crollo	Frayan	15/02/1958		*Danni:* 2 fabbricati distrutti, crollo del muro di sostegno della strada statale, 1 morto	Scheda	Grand-Frayan
16509	Caduta massi	Breil, Frayan	09/10/1993	decine di m^3	*Cause*: pioggia *Danni:* raggiunta SS26	Scheda	Grand-Frayan
17333						Scheda	
16510						Scheda	
18575	Caduta massi	Frayan	06/05/2002	Totale: 500 m^3, 2 blocchi (40 e 80 m^3), altri 3-4 m^3 e uno da 0.5 m^3	*Danni:* i blocchi hanno intercettato opere protezione *Quota di distacco*: 1100 m slm	Scheda	Grand-Frayan
5281	Caduta massi	Frayan	27/11/2003	5 blocchi da 0.5 m^3	*Cause*: pioggia	Scheda	Grand-Frayan
18982	Caduta massi	Frayan	05/05/2010		Sul pendio, lungo canalone Frayan	Scheda	Grand-Frayan
24746	Caduta massi	Fary	17/12/2012	Totale: 10 m^3	*Cause*: acque di infiltrazione, fratturazione roccia	Scheda	Fary-Bedeguaz-Barma
25305	Caduta massi	Chandianaz	febbario 2014	Totale: 4 m^3	*Cause*: acque di infiltrazione *Danni:* al Ru	Scheda	Fary-Bedeguaz-Barma

ID	Tipologia	Località	Data	Volume	NOTE	Link	Area sorgente
					Chandianaz e alle piante		
32525	Caduta massi	Bedeugaz	12/05/2016	Totale: 10 m^3	*Danni*: Ru Chandianaz e al sentiero	Scheda	Fary-Bedeguaz-Barma
34326	Caduta massi	Barma	29/01/2019	Totale: 25m^3, VRU: 10m^3	*Danni*: alle tubazioni del Ru Chandianaz	Scheda	Fary-Bedeguaz-Barma
20644	Caduta massi	Bedeugaz	05/11/2011	Totale: 40-50 m^3, blocchi da 10-15 m^3	*Quota di arresto:* a monte ferrovia	Scheda	Fary-Bedeguaz-Barma
16387	Caduta massi	Breil	09/03/1991	Totale: 3 m^3 in due blocchi	*Quota di arresto:* a monte case	Scheda	Gros-Breil
33033	Caduta muretto a secco	Crêt-de-Gilles	15/06/2017	25m^3	*Cause:* forte imbimbizione *Danni*: mulattiera e strada comunale	Scheda	n.c.
33291	Caduta muretto a secco	Crêt-de-Gilles	09/01/2018		*Cause*: piogge *Danni*: sentiero	Scheda	n.c.
34325	Caduta massi	Frayan	29/01/2019	Totale: 1-1.5m^3, VRU: 0.2m^3	*Cause*: piogge *Fonte di innesco*: muretto a secco, spanciato e poi franato *Danni*: canale	Scheda	n.c.
30785	Caduta massi	Grand-Frayan			*Danni*: nuclei abitati/centro storico *Fonte:* fotointerpretazione	Scheda	
30786	Caduta massi	Barma			*Fonte:* fotointerpretazione	Scheda	
30844	Area soggetta a crolli diffusi	Setoret			*Fonte:* Fotointerpretazione	Scheda	
30962	Area soggetta a crolli diffusi	Grand-Frayan			Blocchi rilevati alla base versante	Scheda	
31191	Caduta massi	Bedeugaz		blocchi decimetrici	Settore fratturato (terrazzamento in abbandono)	Scheda	
31192	Caduta massi	Crêt-de-Gilles			*Fonte:* dato storico	Scheda	
31193	Caduta massi	Crêt-de-Gilles			*Fonte:* dato storico	Scheda	

ID	Tipologia	Località	Data	Volume	NOTE	Link	Area sorgente
31194	Caduta massi	Crêt-de-Gilles			*Fonte:* dato storico	Scheda	
31754	Scivolamento	Cret			*Fonte:* dato storico	Scheda	
31755	Scivolamento	Parleaz	ott-00		*Fonte:* dato storico	Scheda	
31756	Scivolamento	Brunaz	ott-00		*Fonte:* dato storico *Danni*: corso d'acqua	Scheda	
31757	Scivolamento	Solle	ott-00		*Fonte:* dato storico	Scheda	
34360	Potenziale caduta massi	Raffort		4-5 m^3	Blocco lapideo affiorante	Scheda	
29259	Indeterminata	Saint-Denis			*Danni:* centri abitati	Scheda	
30179	Colamento rapido	Chambave	ott-00		*Fonte:* archivio storico	Scheda	
30180	Colamento rapido	Chambave	ott-00		*Fonte:* archivio storico	Scheda	
30181	Colamento rapido	Chambave	ott-00		*Fonte:* archivio storico	Scheda	
30182	Colamento rapido	Chambave	ott-00		*Fonte:* archivio storico	Scheda	
30184	Colamento rapido	Chambave	ott-00		*Fonte:* archivio storico	Scheda	
30185	Colamento rapido	Chambave	ott-00		*Fonte:* archivio storico *Danni:* ferrovia	Scheda	

Figura 20 riporta le macroaree individuate e le date dei fenomeni censiti, utili per valutare il numero di eventi all'anno che occorrono sull'elemento a rischio considerato, e.g. strada, pista forestale, o sentiero. Per ciascuna area sono riportati gli anni in cui sono stati censiti degli eventi di crollo. Sono inoltre schematizzati il tracciato del ru Chandianaz e delle infrastrutture del fondovalle (SS26 e ferrovia).

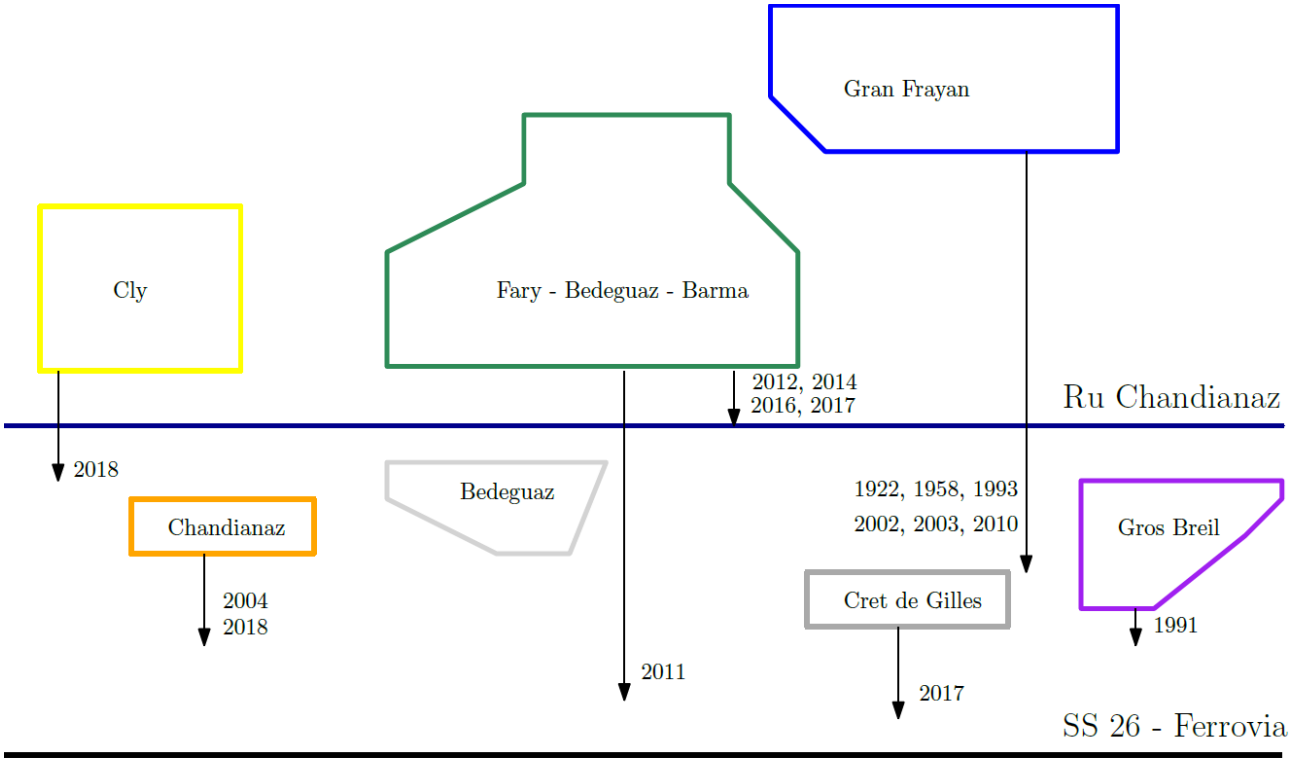


Figura 20. Schema delle macroaree individuate e dei fenomeni censiti.

7.1.3 Rilievo dei blocchi al piede

Il rilievo della bloccometria permette di stimare il rapporto tra le classi di volumi in una determinata area interessata dal fenomeno di caduta massi. A tale proposito, sono stati specificatamente eseguiti per questo studio 4 rilievi bloccometrici nelle seguenti aree:

- Zona 1: a ovest della loc. Setoret a monte del tracciato della bassa via 3 (Figura 21);
- Zona 2: a est della loc. Bedeugaz (fino alla loc. Barma) tra le quote 475 m s.l.m. e 525 m s.l.m. (Figura 22);
- Zona 3: a ovest del canalone della loc. Grand-Frayan sul tracciato della bassa via 3 (Figura 23);
- Zona 4: a est della loc. Crêt-de-Gilles (Figura 23).

Figura 21. Vista aerea della zona di rilievo della bloccometria al piede a ovest della loc. Setoret (zona 1).

Figura 22. Vista della zona di rilievo della bloccometria al piede nel tratto compreso tra la loc. Bedeugaz e la loc. Barma (zona 2).

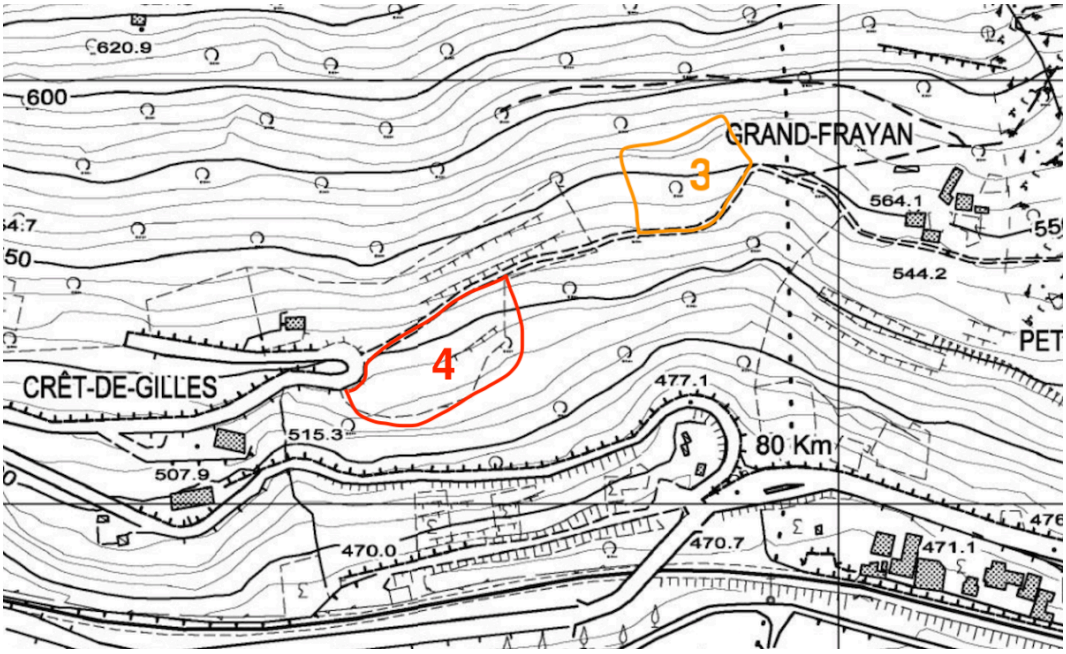


Figura 23. Posizione delle zone 3 e 4 dove è stato condotto il rilievo della bloccometria al piede.

Sono stati complessivamente rilevati 157 blocchi di volume compreso tra 0.024 m^3 e 131 m^3 (volume medio pari a 3.94 m^3). In particolare, si evidenzia la seguente consistenza:

- Zona 1: rilevati 25 blocchi di volume compreso tra 0.072 m^3 e 9.25 m^3;
- Zona 2: rilevati 115 blocchi di volume compreso tra 0.024 m^3 e 131 m^3;
- Zona 3: rilevati 7 blocchi di volume compreso tra 0.21 m^3 e 6 m^3;
- Zona 4: rilevati 25 blocchi di volume compreso tra 0.18 m^3 e 21.3 m^3.

I risultati della bloccometria sono stati elaborati in maniera probabilistica. Per ciascuna zona di rilievo i volumi rilevati sono stati ordinati in maniera crescente e a ciascun volume è stata attribuita una probabilità

$$p_i = \frac{n+1-i}{n+1}, \tag{7.1}$$

dove n è il numero totale di volumi rilevati in ciascuna zona. Tale probabilità è definita come frequenza cumulata complementare empirica. Per esempio, in riferimento alla Zona 3 risultano i valori riportati nella Tabella 3. In riferimento alla seconda riga, risulta che l'82% dei volumi ha volume superiore a 0.72 m^3. Il legame tra il volume e la frequenza cumulata complementare può essere riportato su un grafico con assi in scala logaritmica. La scelta di utilizzare tale tipologia di rappresentazione consente di mettere in luce il legame di natura frattale che sussiste tra le grandi e le piccole volumetrie. Su un piano bilogratimico, l'evidenza di un legame frattale tra due serie di dati si esplica con un andamento lineare. La pendenza della retta interpolante è correlabile alla dimensione frattale. La Figura 24 riporta i volumi e frequenze cumulate complementari per le quattro zone analizzate.

La Figura 25 riporta sulla stessa coppia di assi i risultati relativi a tutte e quattro le zone per le quali è stato svolto il rilievo dei blocchi al piede. Si nota che la pendenza della retta interpolante relativa alle grandi volumetrie è molto simile da zona a zona.

Tabella 3. Frequenza cumulata complementare relativa alla zona 3.

i	Volume rilevato (m^3)	p_i
1	0.18	0.91
2	0.72	0.82
3	0.77	0.73
4	0.78	0.64
5	3.12	0.55
6	3.31	0.45
7	3.40	0.36
8	9.01	0.27
9	16.63	0.18
10	21.33	0.09

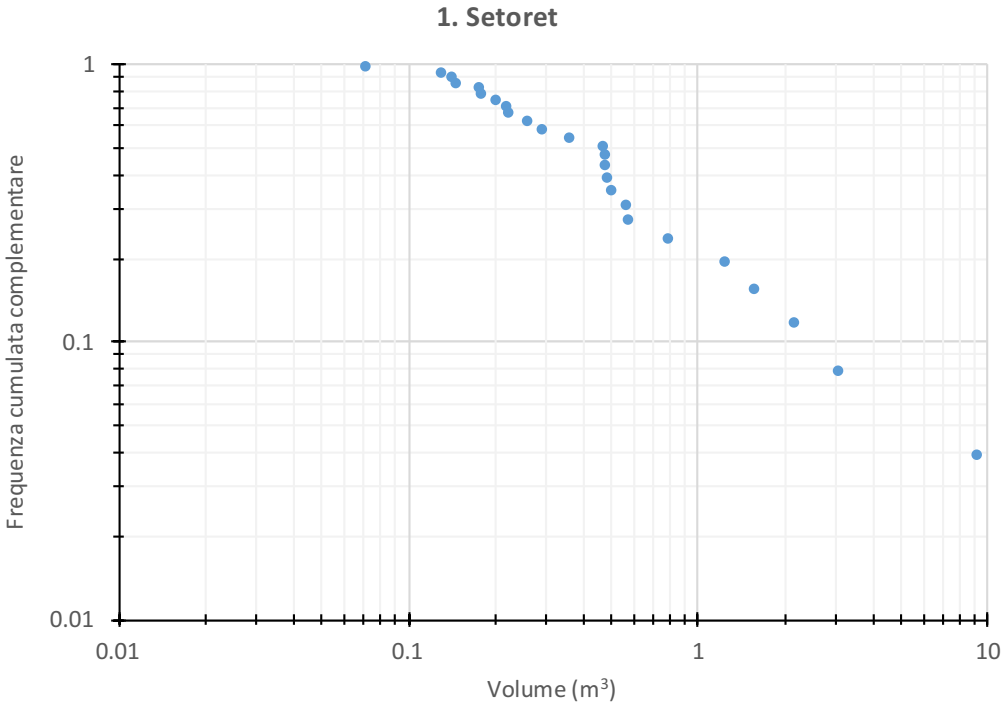
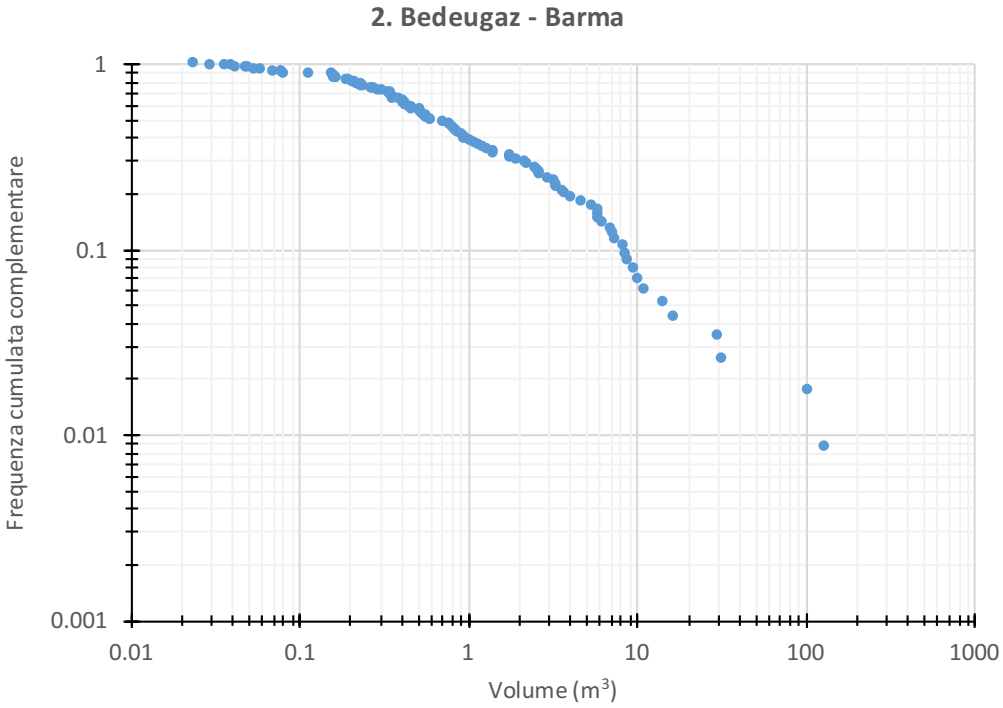


Figura 24. Volumi e frequenze cumulate complementari per le quattro zone analizzate.



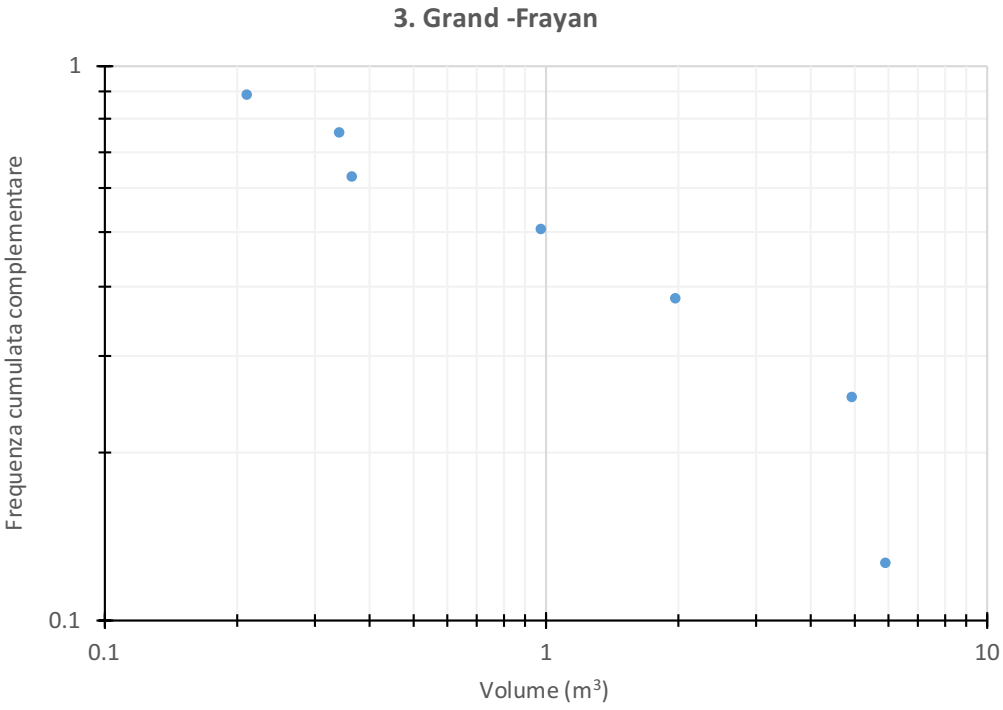


Figura 24. – segue –

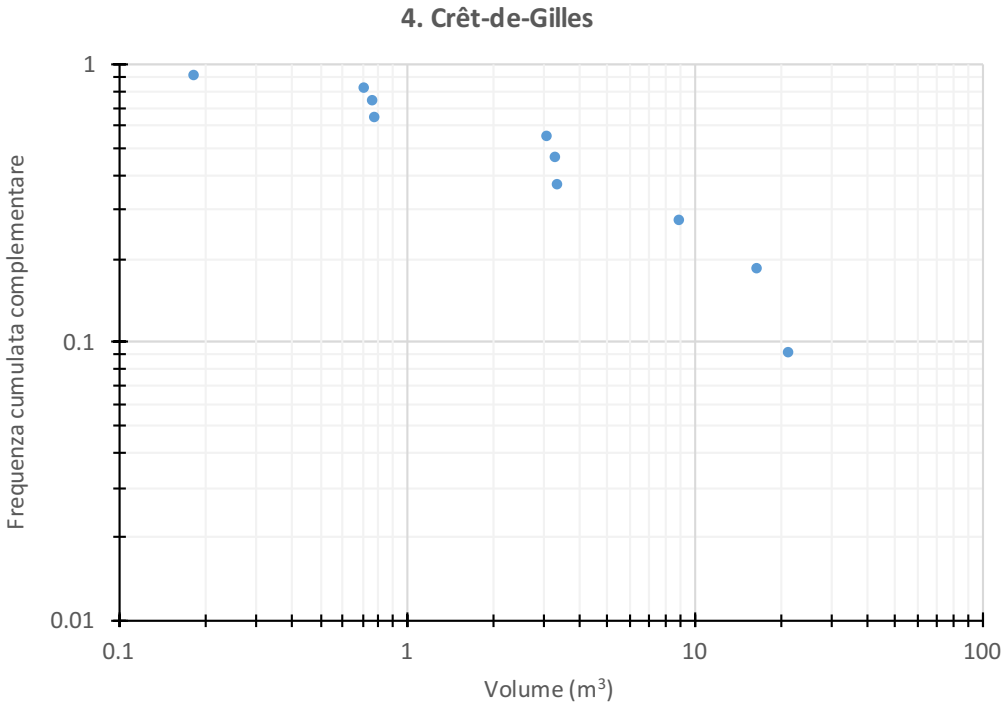


Figura 24. – segue –

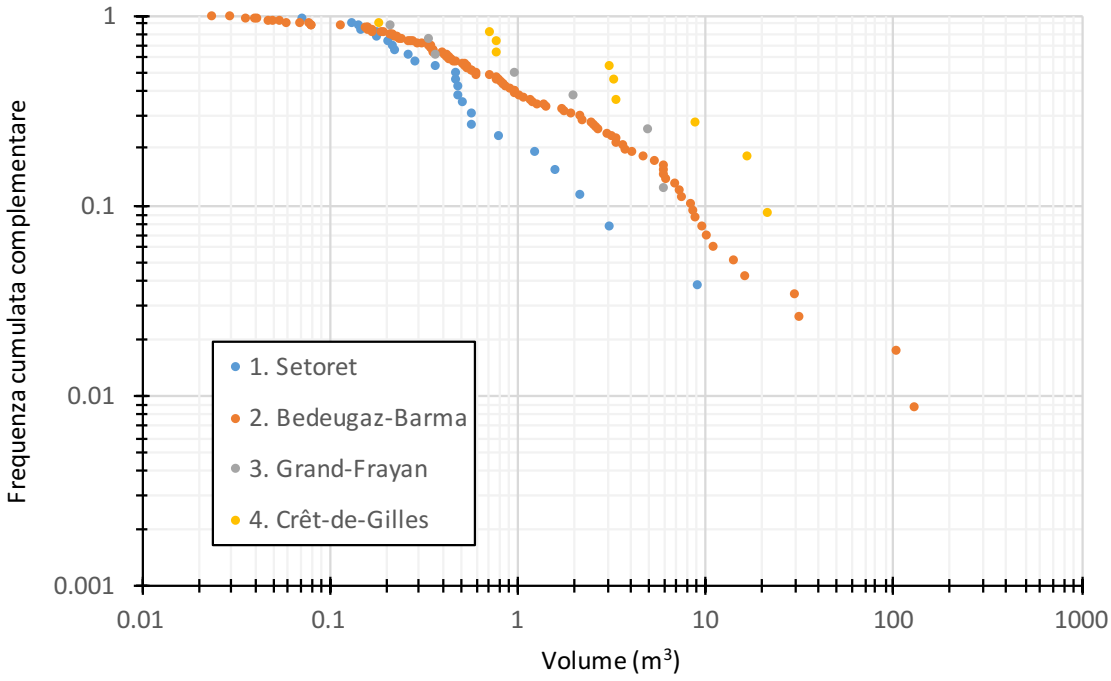


Figura 25. Confronto tra le frequenze cumulate empiriche.

7.1.4 Legge di frequenza dei volumi

La costruzione di un legame volume/tempo di ritorno, detta anche legge di frequenza dei volumi, è svolta in accordo a quanto riportato in De Biagi *et al.* (2017) e illustrato al §5. Nell'elaborazione che segue è stata adottata una distribuzione Pareto II per descrivere la distribuzione dei volumi al piede. I parametri di forma, scala e posizione della Pareto II sono valutati utilizzando una funzione di MATLAB appositamente sviluppata sulla base di:

- volume di soglia V_s;
- vettore dei volumi rilevati al piede maggiori di V_s;
- valori della frequenza cumulata complementare relativa ai soli volumi maggiori di V_s.

Per poter applicare la metodologia è necessario avere un rilievo al piede consistente in termini di numerosità di volumi registrati e possedere alcune informazioni temporali circa gli eventi pregressi. Sulla base di tali premesse, la procedura precedentemente descritta è utilizzata per definire una legge di frequenza dei blocchi in corrispondenza del fondovalle in prossimità del solo abitato di Bedeugaz. Tale analisi utilizza i risultati dell'analisi delle volumetrie dei blocchi al piede precedentemente riportata. Le analisi condotte sono state svolte utilizzando i risultati dell'analisi delle bloccometrie riportati al §7.1.3.

7.1.4.1 Zona 2. Bedeugaz-Barma

L'analisi degli eventi pregressi di cui al §7.1.2 riporta che l'unico evento di crollo che ha interessato l'area in oggetto è accaduto il 5/11/2011 (ID 20644), come riportato in Figura 20 e in Tabella 2. Il catasto dissesti della Regione Valle d'Aosta registra in maniera puntuale i fenomeni di crollo a partire dagli anni 2007/2008. Pertanto, è possibile affermare che un solo evento è accaduto negli ultimi 12 anni. Tuttavia, l'area a monte è stata interessata da eventi con frequenza maggiore, in media un evento ogni 2 anni. Gli eventi non si sono propagati a valle in quanto la zona è molto vegetata. Disponendo di un ridotto numero di eventi registrati è necessario fare delle assunzioni. Confrontando le probabilità occorrenza spaziale in corrispondenza del ru Chandianaz e alla base della parete in prossimità dell'abitato di Bedeugaz si ritiene che la frequenza media degli eventi sia pari a $\lambda = 0.3$ eventi/anno (ossia 1 evento ogni 3.33 anni). Il volume di soglia da adottarsi nelle analisi, considerando che la frequenza cumulata complementare dei volumi al piede sottostima il parametro di forma della legge di Pareto per i bassi volumi, è assunto pari a $V_t = \mu = 1.5$ m^3. L'analisi delle volumetrie al piede di dimensione maggiore o uguale a 1.5 m^3 permette di stimare i parametri della legge di Pareto II. In particolare, utilizzando il codice MATLAB, si ottengono le seguenti stime:

- $\xi = 0.4324$;
- $\sigma = 4.5650$.

La Figura 26 riporta la legge di frequenza relativa ai volumi in corrispondenza del fondovalle in prossimità della località Bedeugaz. Analizzando la Figura 26 è possibile evincere che la frequenza media di blocchi di volume pari a 15 m^3, ossia di blocchi di dimensioni confrontabili a quello crollato nel 2011, è di circa 12 anni, coerentemente con quanto riscontrato nella realtà.

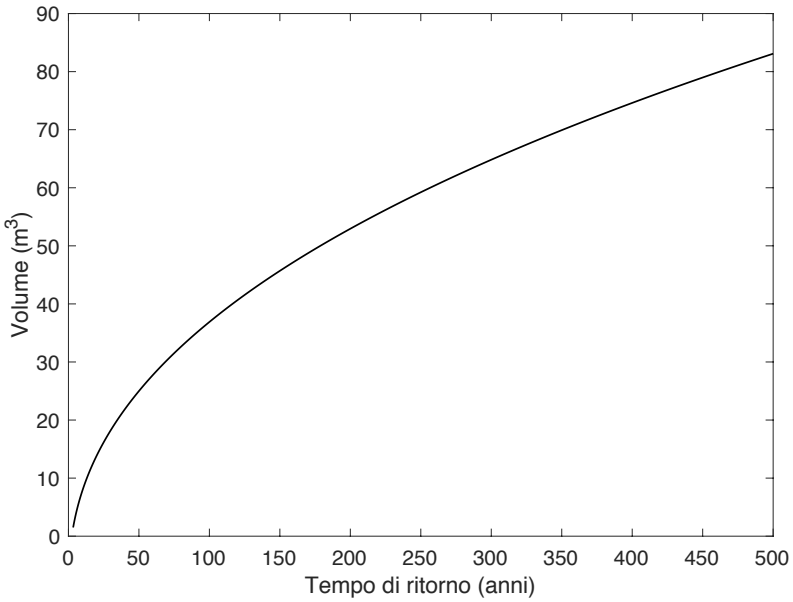


Figura 26. Legge di frequenza relativa ai volumi in corrispondenza della loc. Bedeugaz.

7.1.5 Scelta del blocco di progetto per le analisi di propagazione

Lo studio in campo e l'analisi delle risultanze dell'indagine condotta da IMAGEO, i cui risultati sono riportati al §7.1.1 della presente, ha permesso di individuare le possibili aree sorgenti e le loro volumetrie maggiormente rappresentative, così come rappresentate nella Tavola 1 (Allegato 1), un cui estratto è riportato in Figura 27. Ai fini dell'analisi di propagazione, i volumi scelti sono da considerarsi cautelativi in quanto contemplano sia le risultanze dell'analisi fotogrammetrica-statistica, sia l'analisi degli eventi pregressi, sia le misure delle volumetrie condotte dagli scriventi. Particolare attenzione è rivolta al settore centrale caratterizzato da calcescisti. L'analisi condotta da IMAGEO su una porzione di parete identifica VRU inferiori a quelli osservati in sito, anche alla luce degli eventi passati. Questo può essere attribuito alla dimensione della finestra di osservazione adottata da IMAGEO in proporzione all'estensione dell'unità litologica corrispondente. Pertanto, malgrado l'analisi fotogrammetrica riporti VRU massimi pari a 2.3 m^3 (Tabella 1), si è preferito adottare volumi decisamente maggiori, ossia, 15.5 m^3.

Si intende inoltre precisare che:

- ai fini dell'analisi di rischio per elementi con esposizione non unitaria è necessario conoscere la probabilità spaziale di invasione. Non sono pertanto richieste informazioni circa i livelli energetici o le volumetrie;
- le analisi condotte, anche in ragione delle volumetrie evidenziate in parete, sono da considerarsi cautelative in quanto in linea generale il software di propagazione tridimensionale impiegato ha restituito probabilità di invasione crescenti all'aumentare del volume distaccato. Pertanto la probabilità

di occorrenza spaziale rappresentata nella Tavola 3 (Allegato 3), il cui estratto è riportato in Figura 29, è da considerarsi relativa ad eventi con volumi inferiori o uguali al volume d'innesco;

- non è stato considerato il fenomeno di rimobilitazione dei blocchi isolati individuati lungo il pendio per effetto del crollo di porzioni di pareti rocciose soprastanti, che potrebbero indurre un eventuale crollo a sciame.

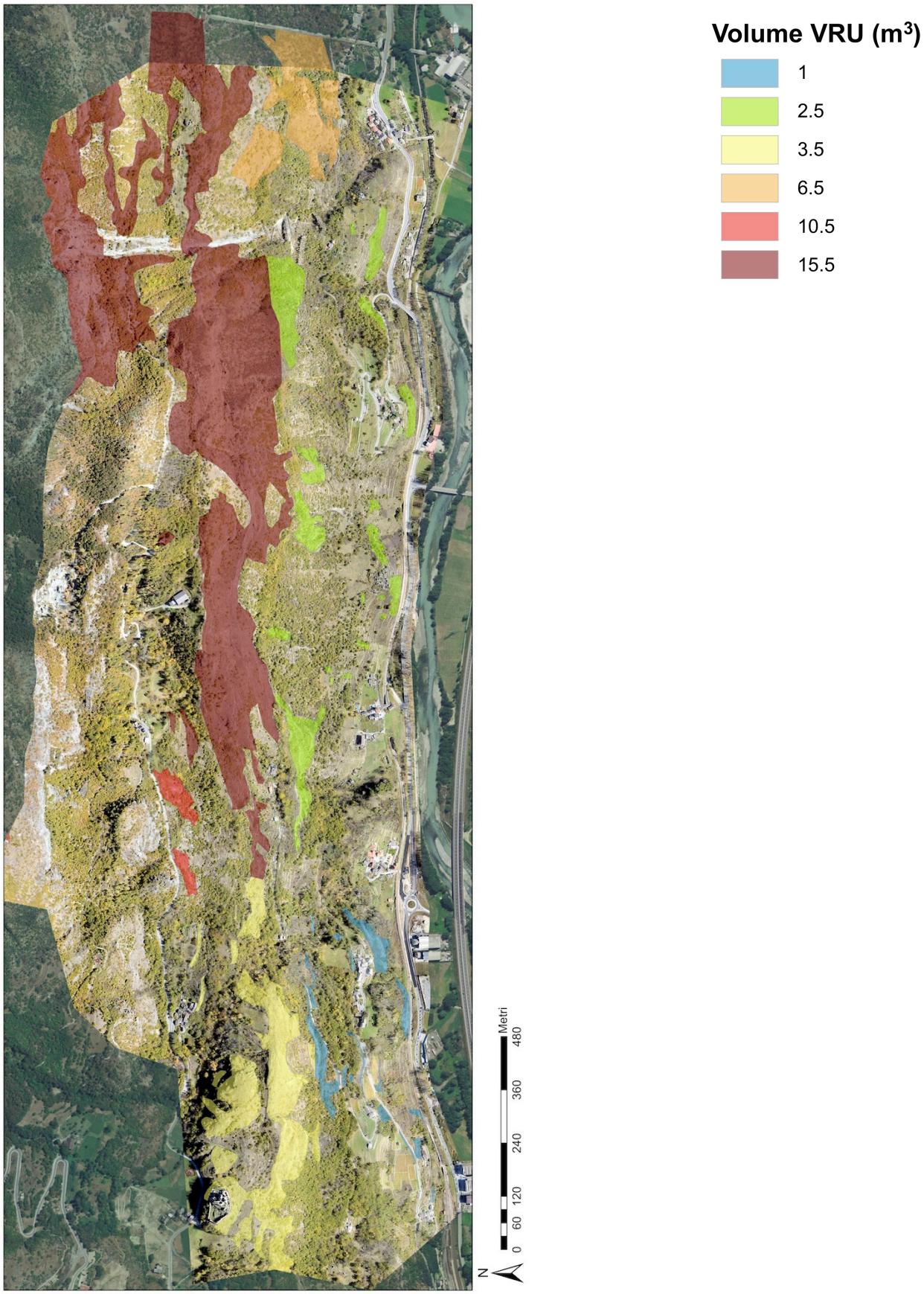


Figura 27. Estratto dalla Tavola 1 (Allegato 1) indicante i volumi di innesco utilizzati nelle analisi di propagazione tridimensionali.

7.2 Analisi traiettografiche di propagazione tridimensionali

Le analisi di propagazione effettuate hanno mirato all'individuazione della probabilità di occorrenza spaziale del fenomeno, così come espresso al §3.2 della presente. Le analisi con modello di simulazione di traiettorie di caduta tridimensionali sono state eseguite con il codice di calcolo Rockyfor 3D (www.ecorisq.org; Dorren, 2015). Questo applicativo software consente di operare su dati territoriali preparati in ambiente GIS e restituisce le informazioni relative alle aree di invasione.

Il modello combina algoritmi deterministici con approcci stocastici, in quanto, date le incertezze connesse alla determinazione dei parametri questi sono determinati in maniera stocastica, facendoli variare entro un intervallo di valori plausibili.

I dati di input richiesti dal modello sono:

- modello digitale del terreno (DEM);
- posizione delle "celle sorgenti", ovvero le zone da cui potenzialmente potrebbe distaccarsi un blocco,
- densità dei massi (per ogni cella sorgente);
- dimensioni del blocco (altezza, larghezza e lunghezza, per ogni cella sorgente);
- forma del blocco di caduta (per ogni cella sorgente): la forma del blocco determina come vengono calcolati il volume del blocco e il momento di inerzia, mentre per calcolare la posizione del blocco, il rimbalzo sulla superficie del pendio e l'impatto contro gli alberi, Rockyfor3D usa sempre una forma sferica;
- scabrezza della superficie inclinata, espressa come dimensione del materiale del materiale che ricopre la superficie del pendio, percepita guardando il pendio verso valle, lungo la direzione di caduta di un ipotetico masso. Tale scabrezza viene espressa in termini probabilistici da tre classi di probabilità, chiamate rg70, rg20, rg10. Queste classi descrivono la probabilità che un masso ha di incontrare un ostacolo di una certa altezza (espressa in m) lungo il suo percorso. È quindi il parametro che determina l'energia persa durante il rimbalzo sulla superficie e non una scabrezza aggiuntiva alla topografia;
- tipologia del suolo: rappresenta l'elasticità del terreno e consente di calcolare il coefficiente di restituzione normale R_n (rapporto tra le componenti normali delle velocità post- e pre- impatto) sulla base degli algoritmi del codice. Il codice di calcolo prevede 8 tipi di suolo, collegati direttamente al valore di R_n.

Il modello fisico di cui si avvale è di tipo ibrido, in quanto, relativamente al moto il modello simula la caduta libera in aria con un algoritmo standard per il moto parabolico uniformemente accelerato, permettendo così di determinare la posizione e la velocità all'intersezione con la topografia. Il moto in caduta libera è quindi indipendente dal volume e dalla forma del blocco. Relativamente al rimbalzo, invece, la velocità (di traslazione e di rotolamento) dopo un rimbalzo sulla superficie è funzione della forma e della dimensione del blocco stesso. L'angolo di deviazione dopo un rimbalzo sulla superficie è determinato dalla topografia, dalla direzione di caduta del blocco prima del rimbalzo e dalla velocità del blocco che cade.

Le simulazioni eseguite hanno previsto differenti punti di distacco.

Per ogni cella sorgente sono stati effettuati 500 lanci (ossia circa 308 milioni di blocchi in caduta simulati su tutta l'area), che quindi costituiscono un campione statistico rappresentativo. La rappresentatività del campione è stata analizzata verificando che il numero di blocchi per cella minimizzasse l'errore, al fine di limitare gli errori epistemici dovuti al modello.

Le analisi sono stati realizzate identificando le sorgenti di distacco e i volumi di distacco così come definiti nella Tavola 1 (Allegato 1) ed espresso al §7.1.5 della presente. Si precisa che i volumi scelti sono stati cautelativi, al fine di individuare tutte le possibili zone di raggiungimento dei blocchi, ossia di valutare la probabilità che un evento di caduta massi di volume inferiore o uguale a quello simulato si verifichi in una data area. Questo ha permesso di ottenere una mappa della probabilità di accadimento spaziale, non considerando il termine temporale.

I dati di input utilizzati sono stati:

- DTM con risoluzione di cella 1x1 m;
- densità dei massi: 2700 kg/m^3;
- dimensioni del blocco in funzione delle volumetrie scelte;
- forma del blocco di caduta: sferica;
- scabrezza della superficie inclinata:(rg70, rg20, rg10): si veda la Tabella 4;
- tipologia del suolo: si vedano la Tabella 4 e la Figura 28.

I dettagli della validazione dei dati di inputi sono riportati al §7.2.1.

Tabella 4. Parametri di input utilizzati per le analisi tridimensionali.

Descrizione	**Codice**	**rg70**	**rg20**	**rg10**	**soil**
Roccia Boscata	RBV	0	0,05	0,05	6
Prato boscato	PB	0	0,05	0,1	2
Detrito fine con presenza di massi e muretti	DFM	0,05	0,1	0,3	3
Prato/terrazzamenti prativi/vigne	PT	0	0,03	0,05	2
Detrito vegetato sotto il canale	DFV	0,05	0,15	0,25	4
Edifici/asfalto	EA	0	0	0	7
Detrito scarsamente vegetato	DSV	0,1	0,1	0,2	4
Roccia affiorante	R	0	0	0,05	6
Terrazzamenti incolti	TI	0,1	0,15	0,25	3
Detrito mediamente/ scarsamente vegetato sopra canale	DMV	0,1	0,15	0,2	4

Rockyfor3D fornisce la probabilità di invasione di ciascuna cella. Come già espresso, nella presente analisi di propagazione viene considerata la probabilità che un evento di caduta massi si verifichi in una data area. In

altre parole, l'informazione ottenuta è di natura spaziale, totalmente svincolata da una probabilità annua di accadimento. Sono state definite le seguenti classi di probabilità di occorrenza (spaziale) *p*:

Tabella 5. Classi di probabilità di occorrenza spaziale p.

Bassa	$p \leq 1\%$
Medio-bassa	$1\% < p \leq 5\%$
Medio-alta	$5\% < p \leq 10\%$
Alta	$10\% < p \leq 30\%$
Altissima	$p > 30\%$

La *p* rappresenta la probabilità che un blocco, distaccatosi, raggiunga una data cella del modello. La Tavola 2 (Allegato 2) riporta i risultati in termini di probabilità di occorrenza spaziale. La sovrapposizione tra occorrenza spaziale e elementi a rischio è riportata nella Tavola 3 (Allegato 3), il cui estratto è riportato in Figura 29.

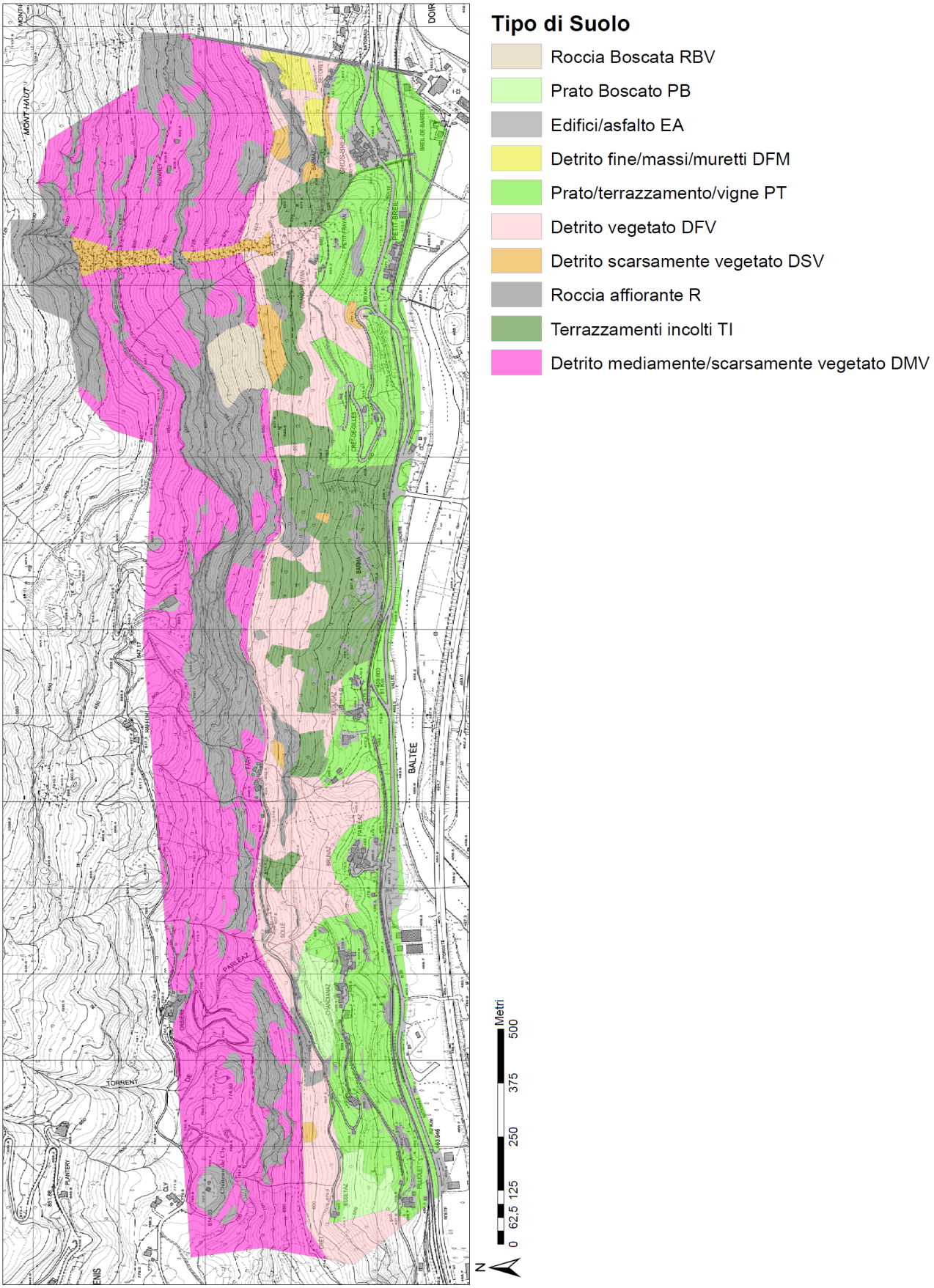


Figura 28. Tipologie di suolo utilizzate per le analisi traiettografiche 3D.

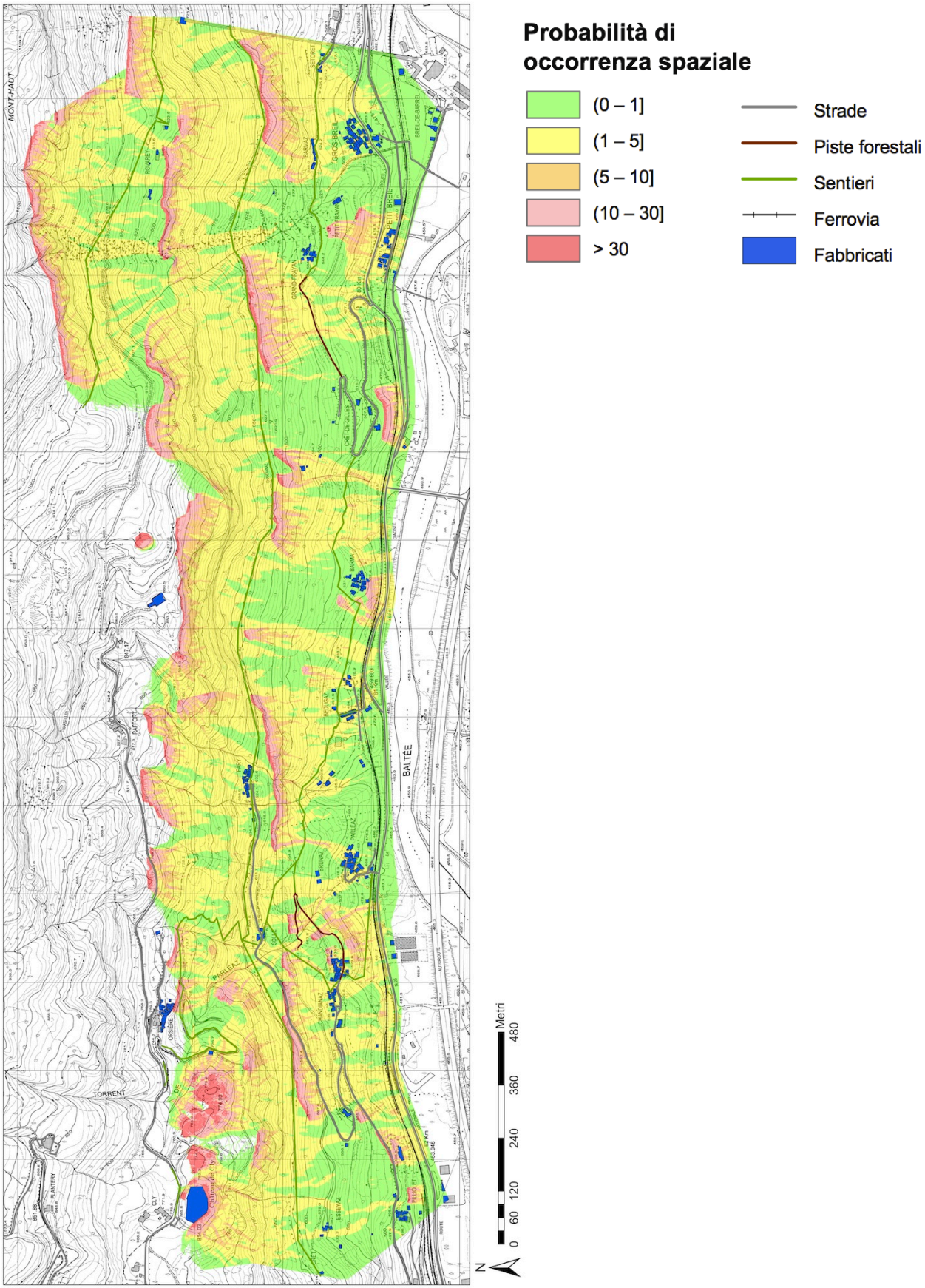


Figura 29. Estratto dalla Tavola 3 (Allegato 3) con indicata la probabilità di occorrenza spaziale e gli elementi a rischio.

7.2.1 Validazione dei parametri di input

Il codice adottato nelle analisi condotte (Rockyfor3D), di tipo ibrido, utilizza dati di input che possono essere definiti in campo: la scabrezza, funzione delle dimensioni dei blocchi, è stata geometricamente investigata *in-situ* dalle evidenze del rilievo, mentre la tipologia di suolo è stata scelta in accordo con gli studi geologici, i rilievi in situ e i suggerimenti forniti dal manuale del codice di calcolo.

Avendo quantificato *in-situ* i valori di rg70, rg20, rg10, per limitare le incertezze aleatorie del terreno ed epistemiche del modello cercando di tarare al meglio il coefficiente relativo alla tipologia del suolo, è stata inoltre eseguita una verifica qualitativa in termini di aree di invasione.

Si precisa infatti che le analisi di propagazione 3D condotte sono mirate ad una valutazione della sola probabilità di occorrenza spaziale e non alla valutazione dell'intensità del fenomeno.

Si precisa inoltre che l'esecuzione di una back-analysis completa presuppone la conoscenza della zona di innesco, della volumetria, eventuali interferenze lungo il percorso, e della zona di arrivo di uno specifico evento di crollo, per cui quindi si conosce la traiettoria e si ricercano i parametri che meglio rappresentano l'interazione suolo-blocco. Nel caso di informazioni mancanti o di analisi su grande scala questo tipo di calibrazione non risulta sempre possibile.

È stata pertanto eseguita una validazione dei parametri scelti effettuando analisi 3D su specifiche porzioni di territorio individuate al fine di comparare in termini di aree di invasione le risultanze di eventi pregressi realmente occorsi di cui si hanno informazioni di maggior dettaglio (benchè sempre di media accuratezza) e verificare quindi che le ipotesi assunte producano risultati comparabili con i dati reali.

In particolare dal Catasto Dissesti regionale è stato possibile reperire informazioni mediamente accurate relative a tre eventi: l'evento del 29/10/2018 in località Cesseyaz (ID 34275 e ID 34375), l'evento del 5/11/2011 in località Bedeguaz (ID 20644), e l'evento del 6/05/2002 in località Frayan (ID 18575).

Al seguito vengono riportate una descrizione sommaria dell'evento, le aree (con riquadro rosso) e i rispettivi volumi di innesco di input e le risultanze delle simulazioni effettuate, in termini di probabilità di occorrenza spaziale del fenomeno, con individuazione dell'area sorgente identificata. Si specifica che, a livello grafico, la legenda utilizzata è quella riportata in Tabella 5.

Ai fini delle simulazioni sono stati adottati i seguenti parametri geomeccanici di input:

- DTM con risoluzione di cella 1x1 m;
- densità dei massi: 2700 kg/m^3;
- dimensioni del blocco in funzione della volumetria unitaria indicata nel catasto dissesti in relazione all'evento (se disponibile);
- forma del blocco di caduta: sferica;
- scabrezza della superficie inclinata:(rg70, rg20, rg10): si veda la Tabella 4;
- tipologia del suolo: si vedano la Tabella 4 e Figura 28.

Le risultanze delle analisi mostrano come le aree di invasione risultanti dalle analisi siano comparabili con gli arrivi dei blocchi identificati negli eventi reperiti e cartografati negli archivi disponibili.

7.2.1.1 Evento del 29/10/2018 in località Cesseyaz (ID 34275 e ID 34375)

«Caduta massi dalla parete rocciosa che sovrasta il Ru Chandianaz (sentiero n.103) e la frazione Cesseyaz. I massi si sono arrestati in parte in corrispondenza della passerella, in parte sulla strada comunale che conduce alla località Farys.» (ID 34275)

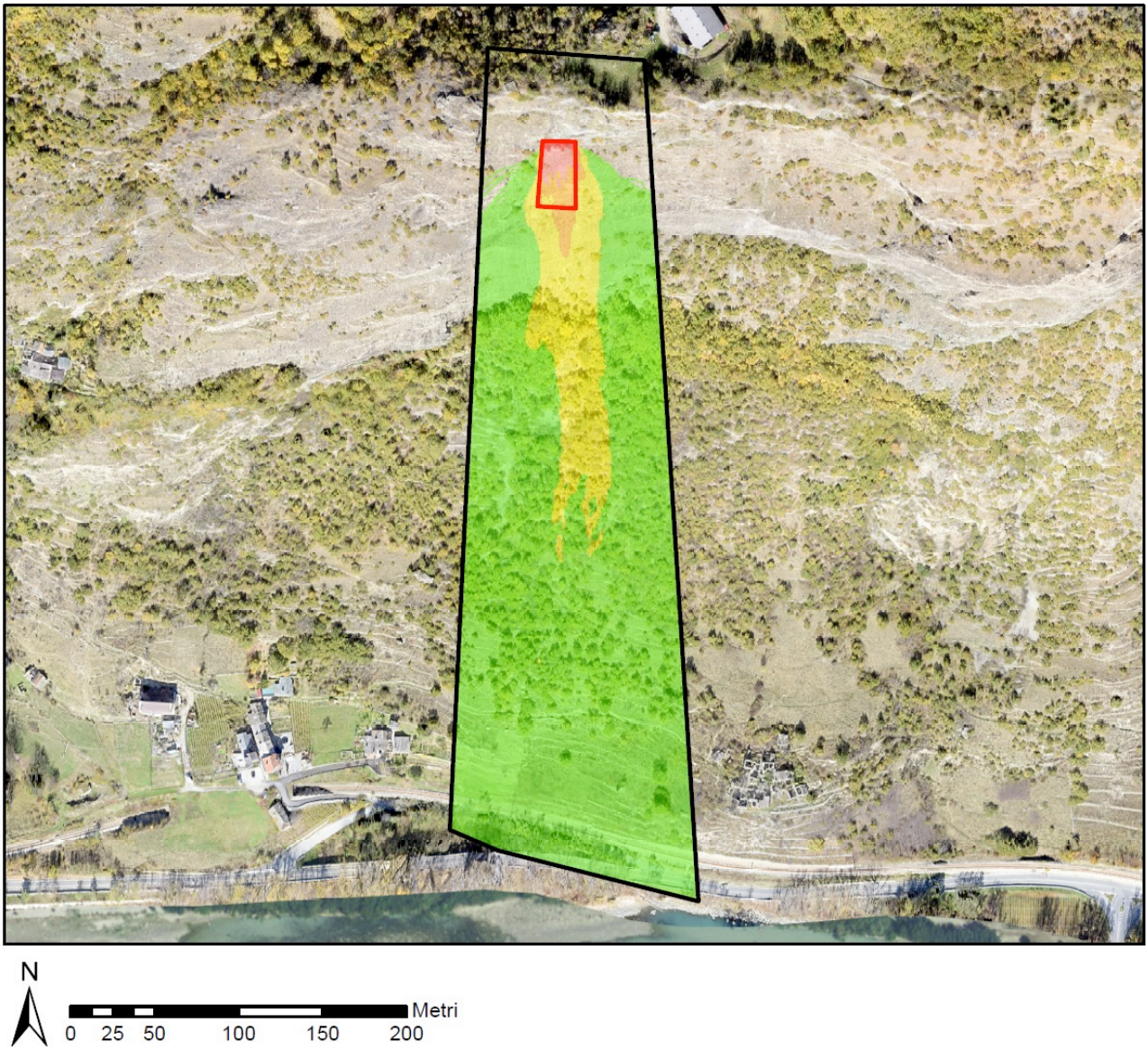
«Crollo di materiale lapideo dalla parete localizzata a monte del Ru Chandianaz ad una quota di 650 m s.l.m. Alcui blocchi hanno impattato sulla passerellain acciaio a protezione del canale irriguo danneggiandola. Altri si sono arrestati sulla sottostante infrastruttura viaria. Materiale coinvolto 3 - 5 mc.» (ID 34375)

Volume di partenza stimato (da fotointerpretazione): 1 m^3

7.2.1.2 Evento del 5/11/2011 in località Bedeguaz (ID 20644)

«Frana di crollo con blocchi ciclopici (10-15 mc) che si sono arrestati appena a monte del tracciato ferroviario. volume stimato: 40-50 mc.d al ru Chandianaz con sfondamento delle condotte in cemento»

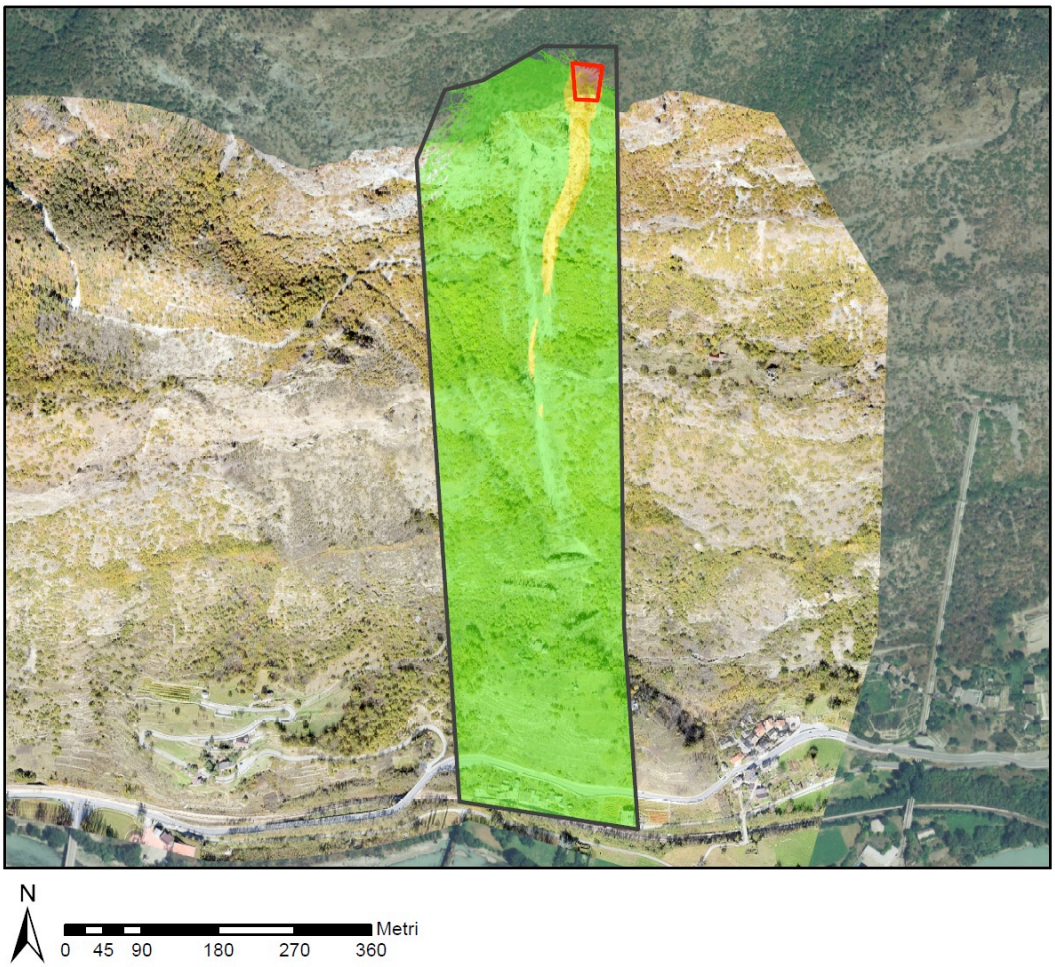
Volume di partenza stimato: 14 m^3



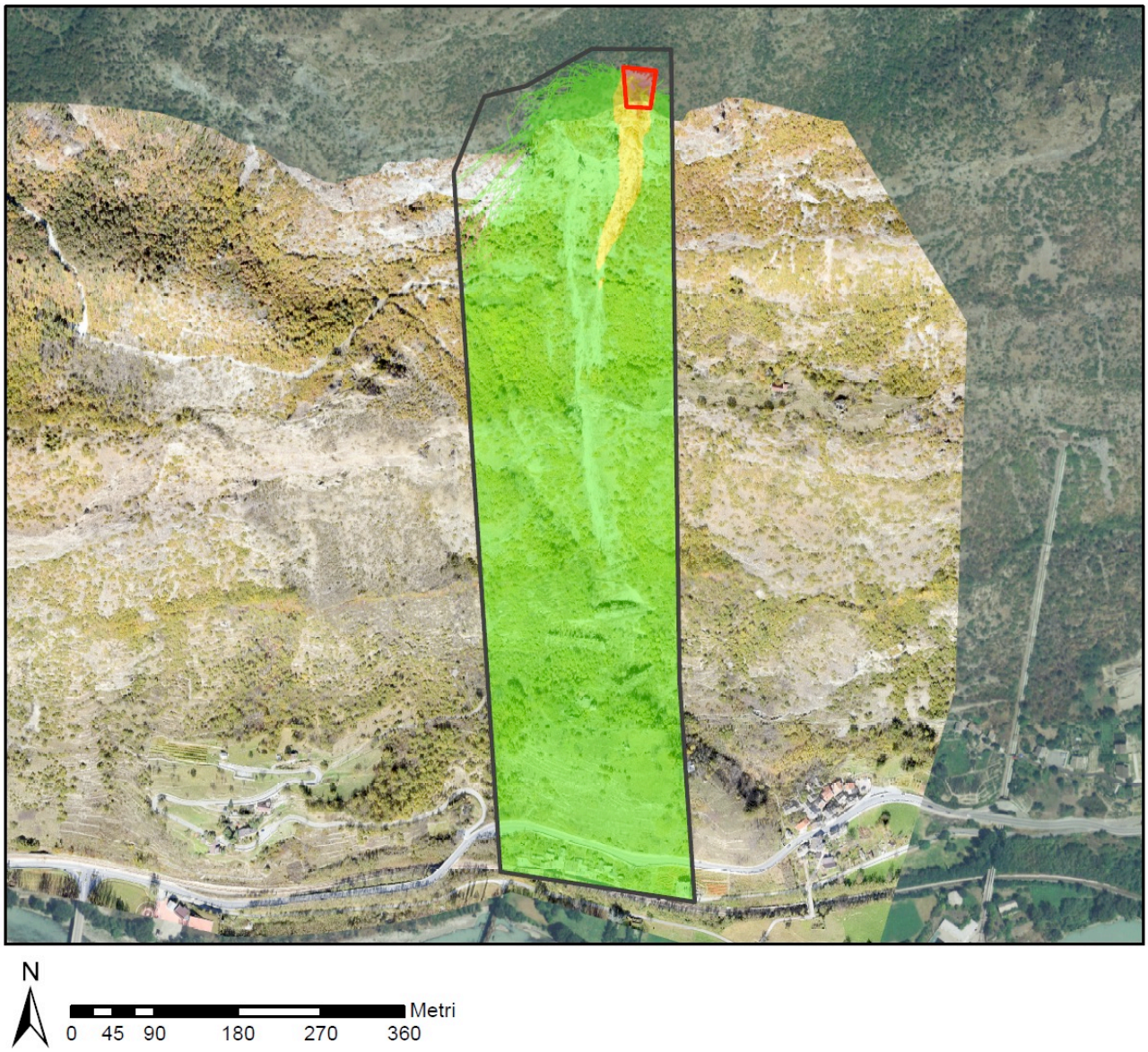
7.2.1.3 Evento del 6/05/2002 in località Frayan (ID 18575)

«Da una stima effettuata a distanza la zona di distacco è stata individuata nel settore sinistro della parete sommitale, sovrastante il colatoio detritico, indicativamente alla quota di 1100 m. s.l.m. La massa rocciosa franata .. nella sua discesa si è frantumata in numerosi blocchi, rimobilizzando blocchi di detrito e percorrendo il canalone sottostante con arresti sia nel settore sommitale sia in prossimità e in corrispondenza delle opere di protezione realizzate a monte di Petit Frayan. La massa rocciosa franata è valutabile in prima approssimazione in 500 mc. Sono stati rilevati due blocchi di dimensioni rilevanti: 40e 80 mc circa. Altri blocchi hanno volumi max di 3-4 mc e altri, quelli che hanno superato il secondo rilevato, raaggiungono i 0.5 mc di volume. Un blocco (di 80 mc circa) ha distrutto l'ultimo montante e il relativo basamento della rete paramassi presente sul primo rilevato paramassi. Un secondo blocco (di 40 mc), con traiettoria verso il margine destro del canalone ha sfondato la rete paramassi posizionata sul primo rilevato con schianto del montante. 'Questo secondo blocco è stato intercettato dal secondo rilevato in corrispondenza della sua porzione media superiore, come testimoniato dalla rottura del basamento in cemento a posa della rete paramassi sovrastante. Anche le reti paramassi poste a N di Grand Frayan, che hanno intercettato altri blocchi, risultano essere notevolmente compromesse.»

Volume di partenza stimato: 4 m^3



Volume di partenza stimato: 40 m^3



7.3 Calcolo del rischio per elementi a esposizione non unitaria

Il presente paragrafo riporta le assunzioni ed i dati di input per il calcolo del rischio sugli elementi individuati precedentemente e secondo le metodologie riportate al §5. Gli elementi a rischio con esposizione non unitaria sono rappresentati dalle strade, dalle piste e dalla rete sentieristica. La Tavola 3 (Allegato 3) localizza gli elementi a rischio nell'area oggetto di studio. La presente analisi è finalizzata alla valutazione del rischio su tre tipologie di elementi: le strade comunali a servizio delle frazioni dei comuni di Saint-Denis, Chambave e Châtillon, le piste forestali utilizzate dai proprietari dei fondi agricoli, e la rete sentieristica, comprensiva del canale irriguo ru Chandianaz che corre in direzione est-ovest tra la quota 640 m s.l.m. (attraversamento della condotta forzata della centrale CVA di Breil) e la quota 620 m s.l.m. in corrispondenza della loc. Crêt. La probabilità di occorrenza spaziale su tali elementi è riportata nella Tavola 4 (Allegato 4). In riferimento agli elementi a rischio con esposizione non unitaria, ossia per le infrastrutture di transito, non è possibile identificare, a priori, il traffico su ciascun tratto. Pertanto, il rischio è stato valutato in riferimento a differenti condizioni di traffico. Questo permette, definito il livello di rischio, di determinare il massimo numero di transiti all'ora.

7.3.1 Strade comunali

Le valutazioni di rischio sulle strade comunali sono state condotte secondo le seguenti ipotesi:

Velocità del veicolo = 30 km/h
Lunghezza del veicolo = 5 m
Distanza visiva decisionale = 30 m
Percorribilità = 8740 ore/anno
Persone per veicolo ≥ 3

$P_{i,fatal,1}$ = 0,2 (fonte Bunce *et al.*, 1997)
P_f = 0,5
$P_{s,fatal}$ = 0,041 (fonte dati ISTAT 2010-2018)
P_t = 0,2 (fonte dati storici)
$P_{d,fatal}$ = 0,026 (fonte dati ISTAT 2010-2018)

Il numero di eventi atteso su ciascun tratto di strada è stato ricavato dall'analisi dei dati pregressi e dalle risultanze dei sopralluoghi in sito. Tale valore è riportato nella Figura 30. Ai fini dell'analisi del rischio, la frequenza attesa N_R deve essere opportunamente distribuita su ciascuna porzione di strada secondo l'Eq. (5.2). Il rischio su ciascun tratto di strada, espresso in probabilità di vittima, per differenti condizioni di traffico (numero di veicoli all'ora) è riportato nella Tavola 5A e nella Tavola 5B (Allegato 5).

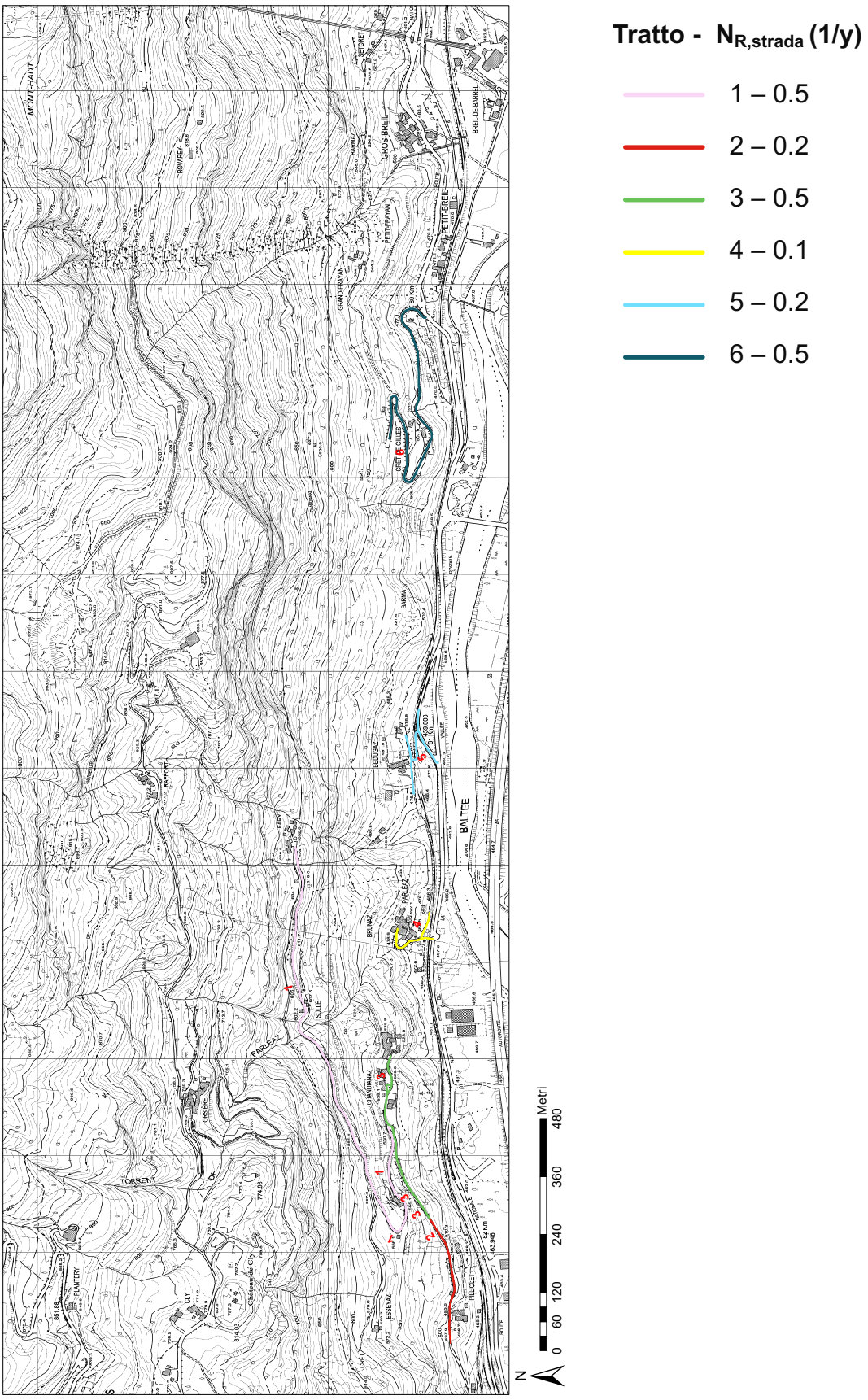


Figura 30. Frequenza dei crolli attesi su ciascun tratto di strada.

7.3.2 Piste forestali

Le valutazioni di rischio sulle piste forestali sono state condotte secondo le seguenti ipotesi:

Velocità del veicolo = 10 km/h

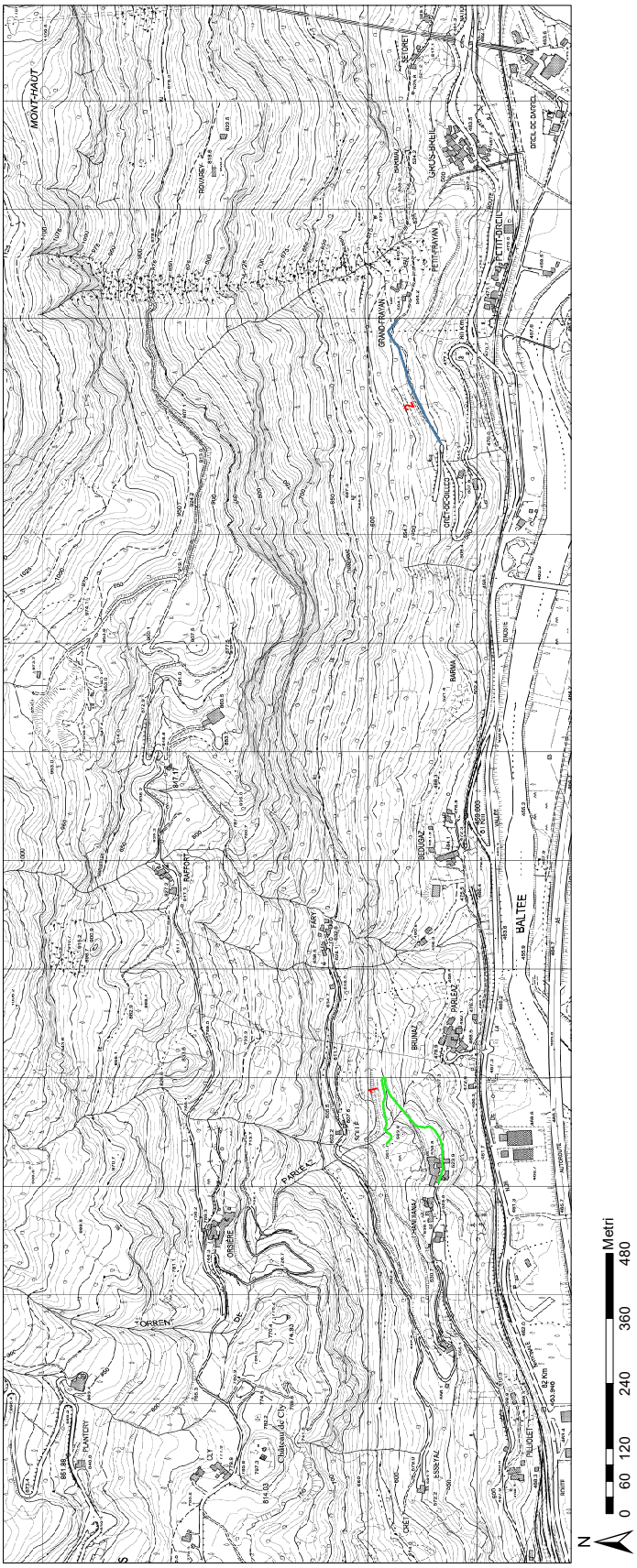
Lunghezza del veicolo = 5 m

Percorribilità = 8740 ore/anno

Persone per veicolo ≥ 3

$P_{i,fatal,1}$ = 0,2 (fonte Bunce *et al.*, 1997)

Il numero di eventi atteso su ciascun tratto di pista è stato ricavato dall'analisi dei dati pregressi e dalle risultanze dei sopralluoghi in sito. Tale valore è riportato nella Figura 31. Ai fini dell'analisi del rischio, la frequenza attesa N_R deve essere opportunamente distribuita su ciascuna porzione di strada secondo l'Eq. (5.2). Il rischio su ciascun tratto di pista, espresso in probabilità di vittima, per differenti condizioni di traffico (numero di veicoli all'ora) è riportato nella Tavola 7 (Allegato 7).



Tratto - $N_{R,pista}$ (1/y)

1 – 0.1

2 – 0.5

Figura 31. Frequenza dei crolli attesi su ciascun tratto di pista.

7.3.3 Rete sentieristica

Le valutazioni di rischio sulla rete sentieristica sono state condotte secondo le seguenti ipotesi:

Velocità di transito = 3,8 km/h sul ru Chandianaz (tratti 1, 9, 10 e 11)
2,0 km/h sulla bassa via 3 (tratti 5, 6, 7 e 8)
1,8 km/h sui sentieri da Bedeugaz a Cly (tratti 2, 3 e 4)
2,0 km/h sul sentiero alto da Chameran a Saint-Denis (tratti 12 e 13)

Lunghezza della persona = 0,6 m

Tempo di sosta = 0,05 h

Percorribilità = 8740 ore/anno

Le velocità di transito sono state desunte dai tempi di percorrenza riportati sul catasto sentieri della Valle d'Aosta (https://mappe.regione.vda.it/pub/geosentieri/index.html). Il numero di eventi atteso su ciascun tratto di pista è stato ricavato dall'analisi dei dati pregressi e dalle risultanze dei sopralluoghi in sito, come riportato nella Figura 32. Particolare attenzione è stata posta ai crolli di muri a secco (aventi blocchi di piccole dimensioni) instabili a causa della manutenzione assente e alle piccole pareti aggettanti sul sentiero. Ai fini dell'analisi del rischio, la frequenza attesa N_R deve essere opportunamente distribuita su ciascuna porzione di strada secondo l'Eq. (5.2). Il rischio su ciascun tratto di sentiero, espresso in probabilità di vittima, per differenti condizioni di traffico (numero di escursionisti all'ora) è riportato nelle Tavole 6A, 6B, 6C e 6D (Allegato 6). Data l'estensione dell'area, la presenza di un apparato vegetativo assai consistente e l'acclività del versante, non si esclude che puntuali sorgenti crollo non siano state individuate e modellate. Queste tuttavia possono essere ricondotte a piccole e limitate porzioni di pareti aggettanti, perlopiù insistenti sulla rete sentieristica, per le quali la traiettoria di crollo è facilmente individuabile comportando velocità limitate. Esempi di tali situazioni sono riportati in Figura 33.

7.3.3.1 Manutenzioni sul ru Chandianaz

Ai fini della valutazione del rischio per le maestranze impegnate nella manutenzione dell'infrastruttura idraulica del ru Chandianaz è stato calcolato il numero orario di eventi di crollo su una porzione tratto di canale di lunghezza pari a 20 m. Tale valore è riportato da Figura 34 a Figura 37 e varia in funzione della probabilità di occorrenza spaziale lungo lo stesso. La probabilità di vittima per le maestranze chiamate ad eseguire un intervento è pari al prodotto

$$P = N_{R,cantiere} \cdot N_{maestranze} \cdot H_{cantiere}. \quad (7.7)$$

dove $N_{R,cantiere}$ è il numero orario di eventi attesi sul cantiere, $N_{maestranze}$ è il numero di maestranze contemporaneamente presenti nell'area delle lavorazioni e $H_{cantiere}$ è la durata delle lavorazioni (in ore). Il termine $N_{R,cantiere}$ è valutato in accordo con la Eq. (5.2) come :

$$N_{R,cantiere} = \frac{P_{(T:D)} \ell_{cantiere}}{\sum_{h=1}^{n} P_{(T:D)}^{h} \ell_h} N_R \quad (7.8)$$

Un esempio applicativo è riportato nell'Allegato 8.

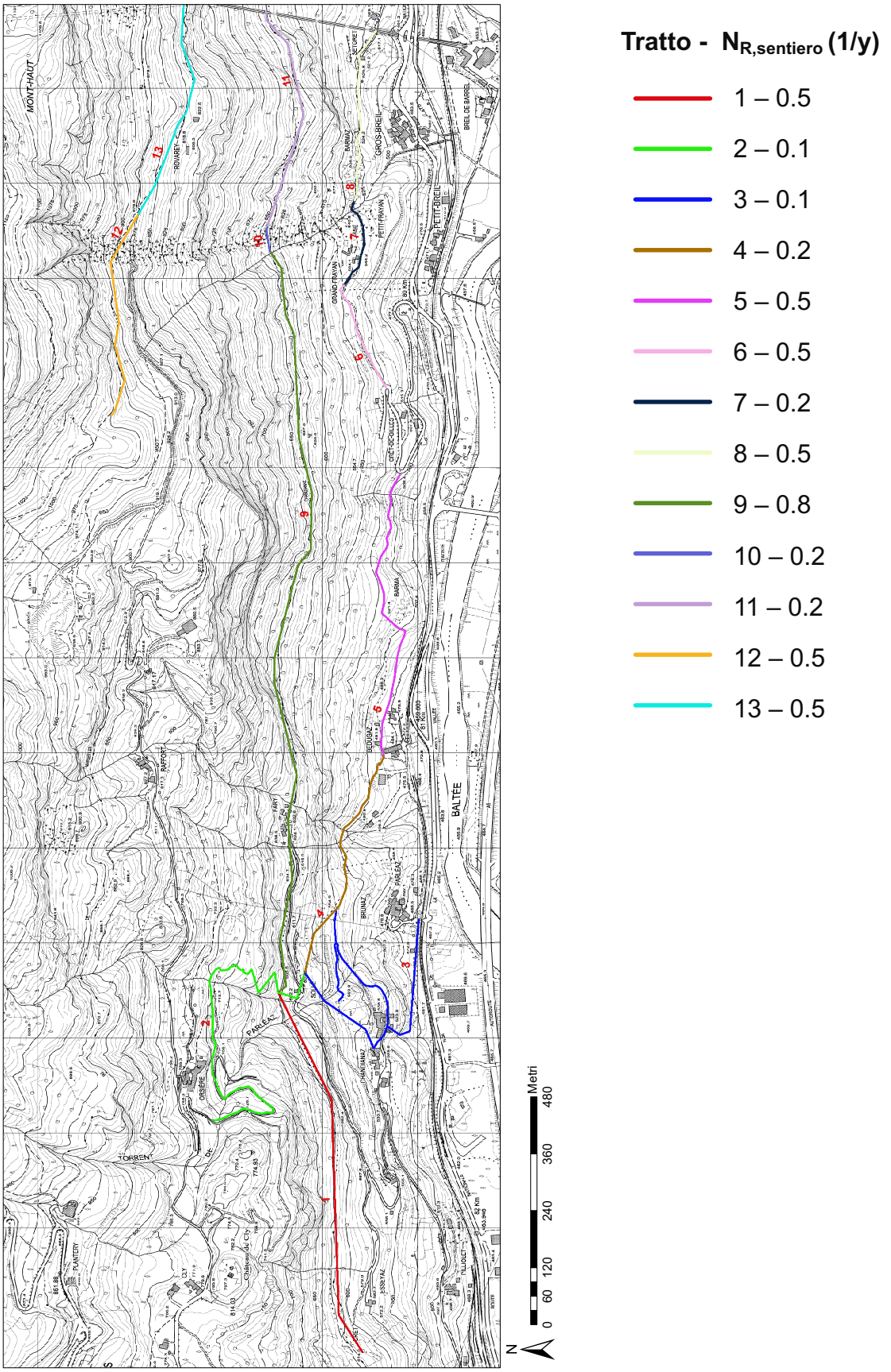


Figura 32. Frequenza dei crolli attesi su ciascun tratto di sentiero.

Figura 33. Ru Chandianaz: esempi di porzioni di ammasso a ridosso della sentieristica.

Tratto 1 – Numero eventi all'anno sul tratto = 0.5

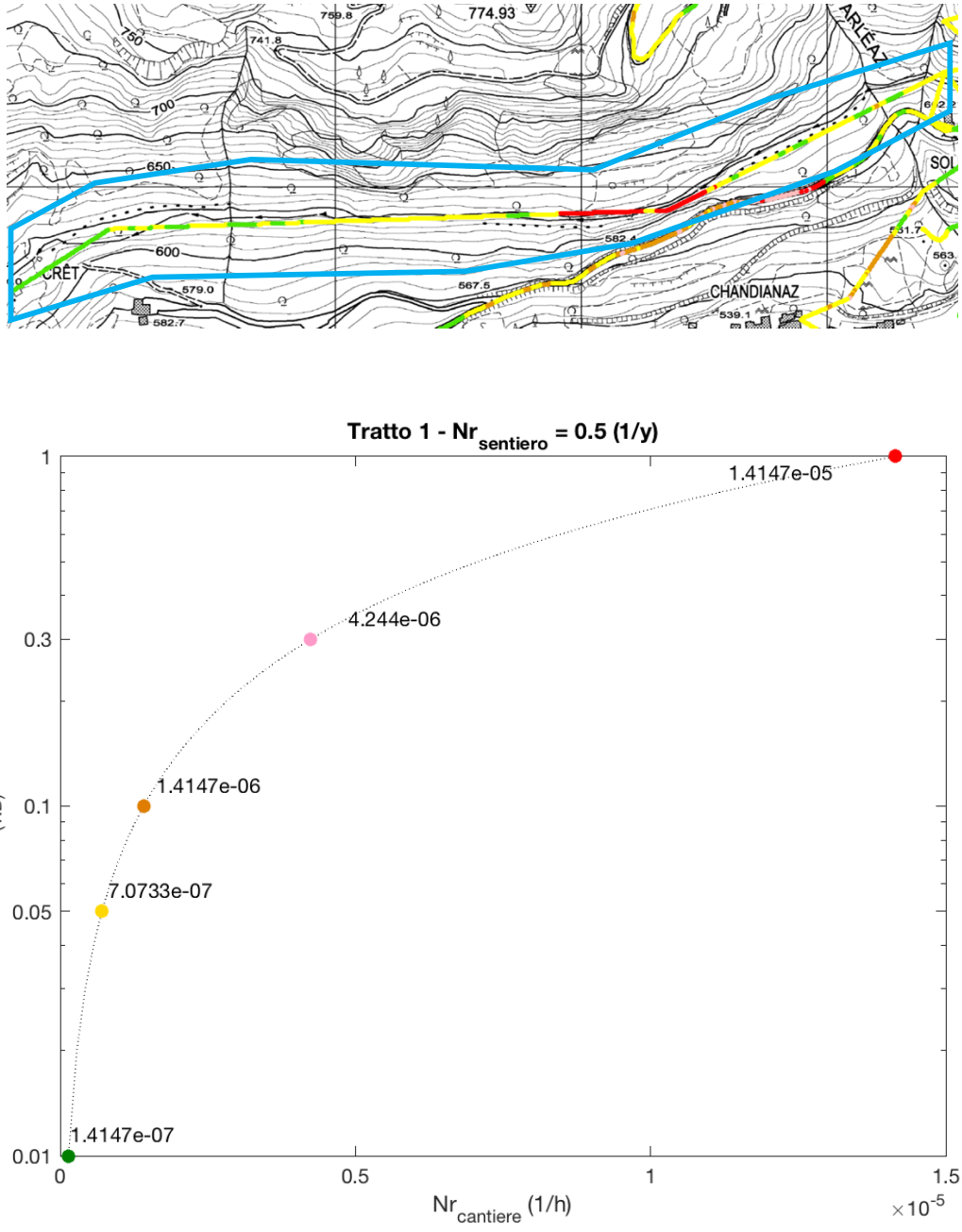
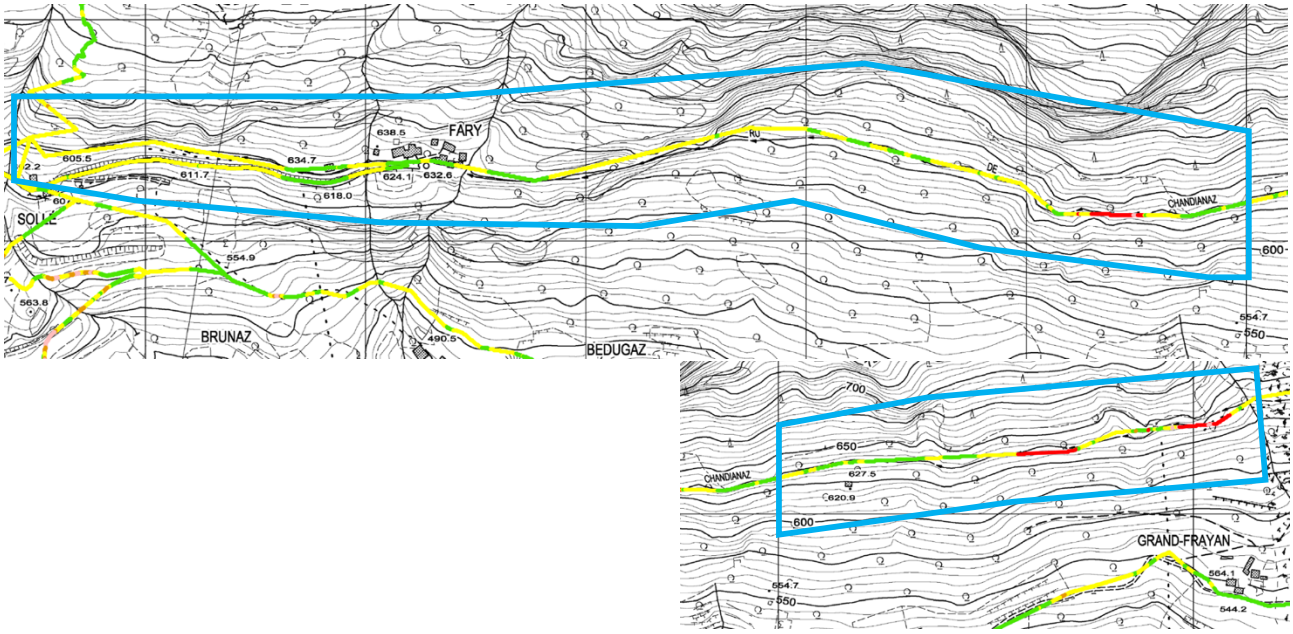


Figura 34. Tratto 1: numero orario di crolli su una porzione di canale di lunghezza pari a 20 m in funzione della probabilità di occorrenza spaziale.

Tratto 9 – Numero eventi all'anno sul tratto = 0.8



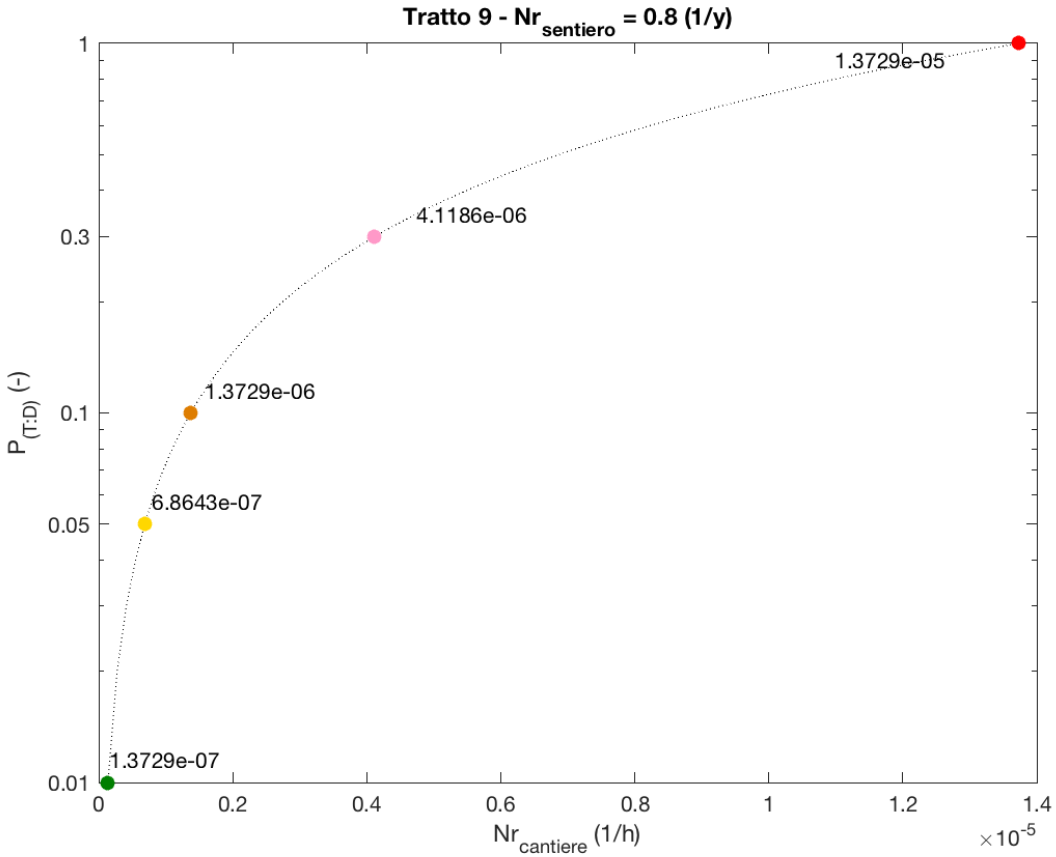


Figura 35. Tratto 9: numero orario di crolli su una porzione di canale di lunghezza pari a 20 m in funzione della probabilità di occorrenza spaziale.

Tratto 10 – Numero eventi all'anno sul tratto = 0.2

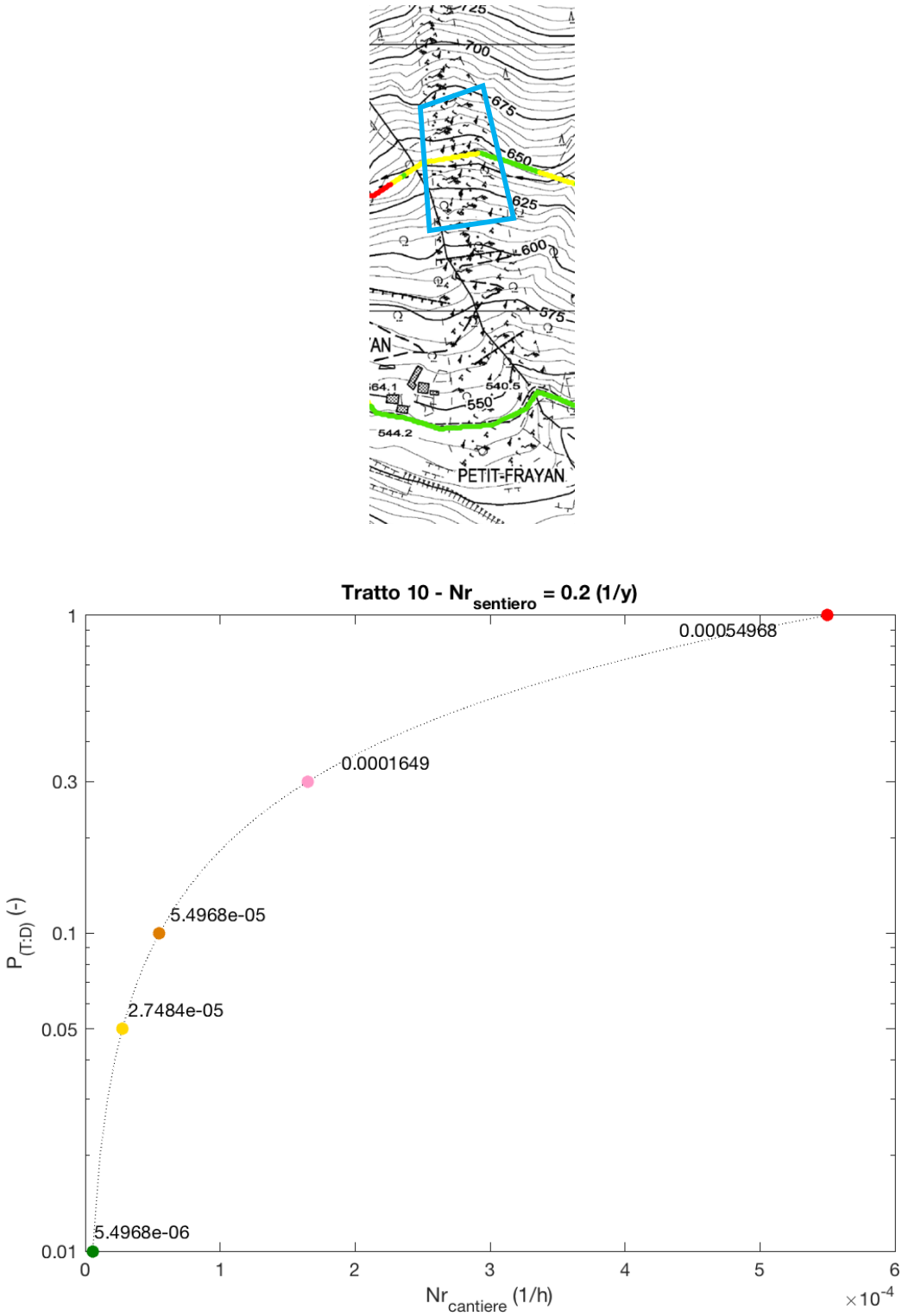


Figura 36. Tratto 10: numero orario di crolli su una porzione di canale di lunghezza pari a 20 m in funzione della probabilità di occorrenza spaziale.

Tratto 11 – Numero eventi all'anno sul tratto = 0.2

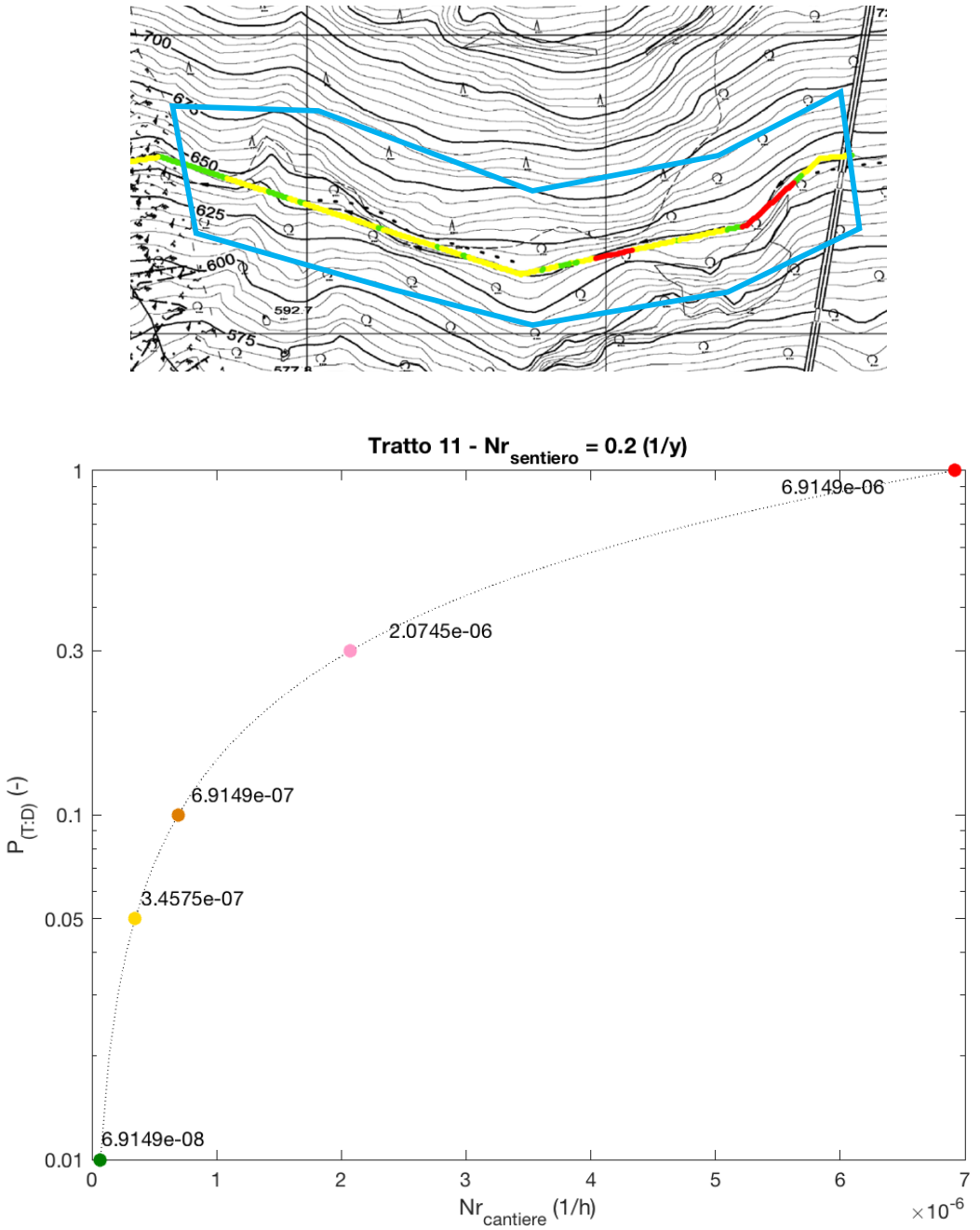


Figura 37. Tratto 11: numero orario di crolli su una porzione di canale di lunghezza pari a 20 m in funzione della probabilità di occorrenza spaziale.

7.4 Calcolo del rischio per elementi a esposizione unitaria

In funzione di quanto esposto al §6.2, viene qui applicata la metodologia proposta per un'analisi preliminare del rischio a scala di borgata. È evidente che, considerato che il presente lavoro di ricerca opera a "media scala", si potranno approfondire le analisi in modo specifico per lo studio di edifici puntuali e per un'eventuale progettazione di opere di protezione, se necessarie. La Figura 38 riporta il valore della probabilità di occorrenza spaziale dettagliandone il valore nel range 0% - 1% (in complessivi 4 livelli). Sono state considerate nello studio le sole borgate aventi una probabilità di occorrenza spaziale (quindi priva del termine temporale) superiore a 0.5%. Queste risultano essere:

- Chandianaz (vedasi §7.4.3);
- Parleaz (vedasi §7.4.4);
- Bedeguaz (vedasi §7.4.5);
- Fary (vedasi §7.4.6);
- Gros Breil (vedasi §7.4.7).

Come espresso al §6.2, per ciascuna delle borgate considerate, sono fornite:

- una mappa delle potenziali zone d'innesco insistenti sulla borgata (sempre da considerarsi a "media scala"), con l'individuazione del volume d'innesco considerato per le analisi di propagazione tridimensionale (di cui al §7.2). Si specifica che a livello grafico la legenda utilizzata è riportata in Figura 39;
- una mappa di dettaglio della probabilità di occorrenza spaziale dell'evento di caduta massi (di cui all'Allegato 2). Si specifica che a livello grafico la legenda utilizzata è riportata in Figura 39;
- l'individuazione delle direttrici ritenute particolarmente significative;
- risultati delle analisi traiettografiche bidimensionali (eseguite con RocFall 2019) su queste direttrici. Per ogni sezione vengono riportate le immagini relative a:
    - profilo con individuazione della tipologia di suolo utilizzata (come da Figura 40) , delle linee di distacco (a livello grafico indicata nelle figure con pallini bianchi) e delle traiettorie per ogni linea di distacco (rappresentate nelle figure con colori differenti a seconda della linea di distacco da cui provengono). Nei casi in cui non evidenti rimbalzi, il moto è in prevalenza di rototraslazione. Lungo il profilo è indicato un collettore corrispondente alla borgata (punto più a monte).
    - punti di arresto lungo il pendio sulla specifica direttrice;
    - distribuzione delle velocità lungo il pendio sulla specifica direttrice;
    - frequenza di arresto, per ogni linea di distacco, in corrispondenza della borgata (punto più a monte);
    - velocità 95% in corrispondenza della borgata (punto più a monte) con indicazione della linea di distacco di provenienza;
    - altezza di volo 95% in corrispondenza della borgata (punto più a monte) con indicazione della linea di distacco di provenienza.

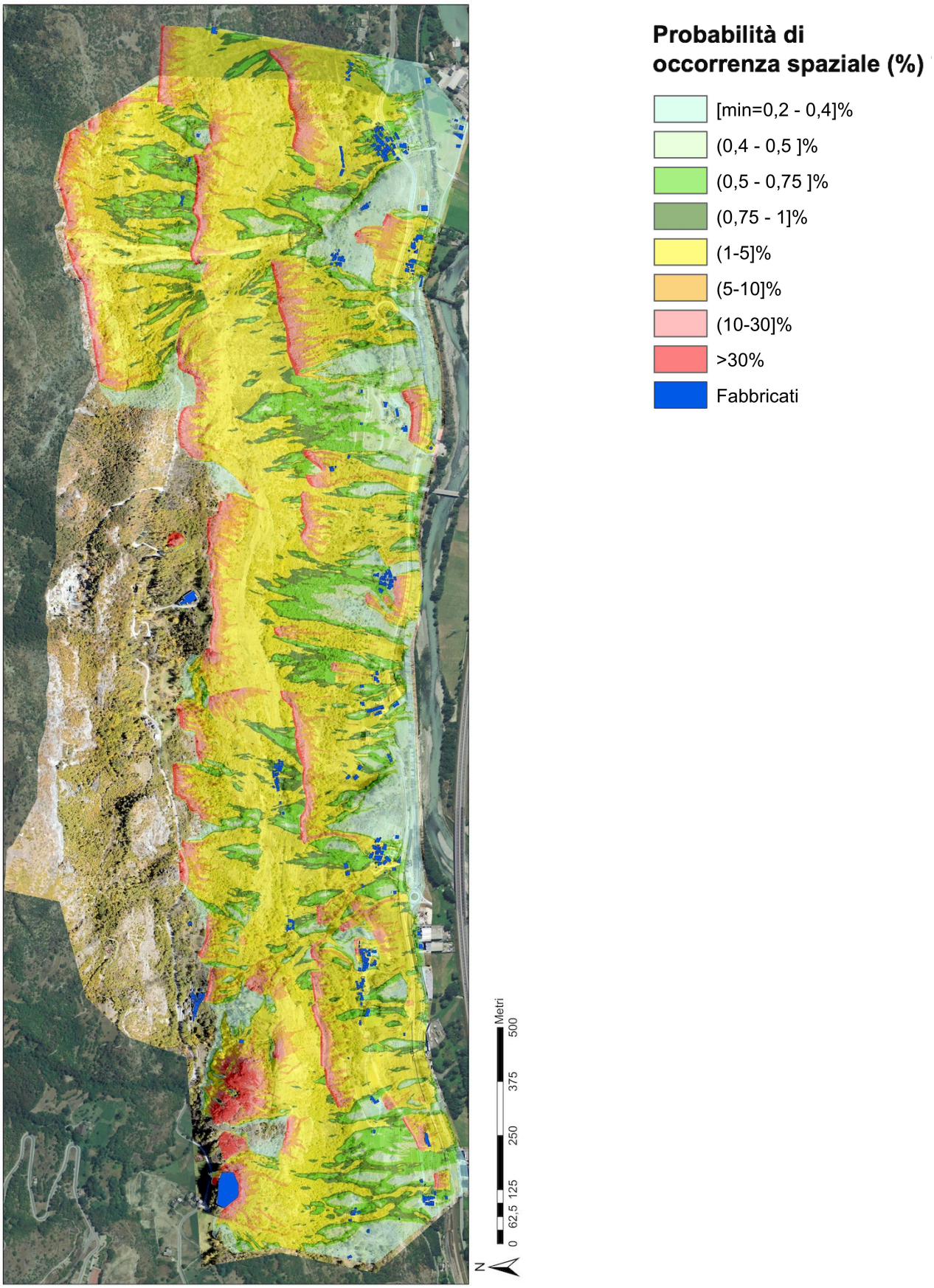


Figura 38. Probabilità di occorrenza spaziale con dettaglio nel range 0% - 1%.

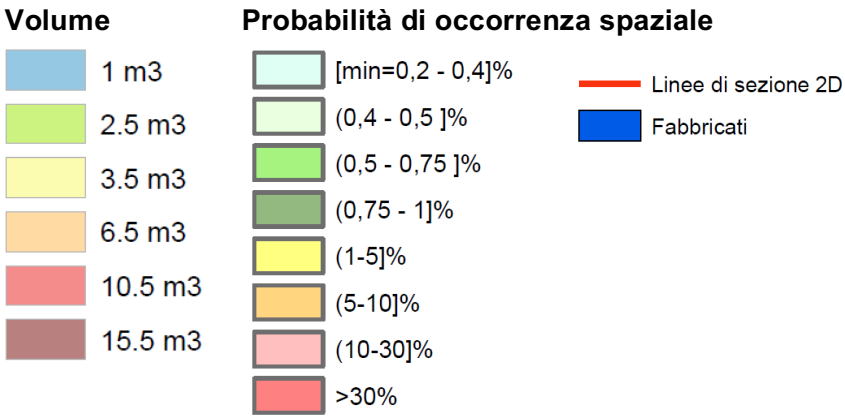


Figura 39. Legende relative alle mappe delle potenziali zone d'innesco e della probabilità di occorrenza spaziale.

7.4.1 Analisi traiettografiche bidimensionali: assunzioni di calcolo

Le simulazioni preliminari per la valutazione dell'energia sono state impostate su sezioni trasversali al versante ritenute particolarmente significative, in funzione dei risultati delle analisi di propagazione tridimensionali effettuate nell'analisi di pericolosità e scegliendo il percorso di caduta più probabile in funzione della topografia del sito.

Il codice di calcolo adottato, Rocfall 2019, si avvale di un modello di moto bidimensionale e comportamento di tipo lumped mass.

Ai fini della simulazione sono stati adottati i seguenti parametri geomeccanici di input:

- base topografica di input: rilievo di dettaglio con isoipse ogni 1 m;
- velocità di caduta iniziale: 1 m/s;
- sorgenti di distacco lineari;
- densità della roccia: 2700 kg/m^3;
- 5000 simulazioni per ogni sorgente di distacco di tipo lineare: queste costituiscono un campione statistico rappresentativo. La rappresentatività del campione è stata analizzata verificando che il numero di blocchi per cella minimizzasse l'errore, al fine di limitare gli errori epistemici dovuti al modello;
- assenza di fenomeni di frantumazione dei blocchi;
- metodo probabilistico Montecarlo per la determinazione del coefficiente di restituzione normale R_n e del coefficiente di restituzione tangenziale R_t L'angolo di attrito al rotoscivolamento φ è stato scelto come valore deterministico cautelativo di 30°. Per i coefficienti di restituzione è stata adottata una distribuzione normale con i valori di media e deviazione standard (σ) riportati in Tabella 6. La Figura 40 riporta invece le tipologie di terreno utilizzate.

Tabella 6. Parametri di restituzione normale e tangenziale di input nelle analisi 2D.

Descrizione	**Codice**	**R_n (-)**	**R_t (-)**
Roccia Boscata	RBV	0,45 (σ=0.04)	0,85 (σ=0.04)
Prato boscato	PB	0,28 (σ=0.04)	0,70 (σ=0.04)
Detrito fine con presenza di massi e muretti	DFM	0,30 (σ=0.04)	0,75 (σ=0.04)
Prato/terrazzamenti prativi/vigne	PT	0,25 (σ=0.04)	0,60 (σ=0.04)
Detrito vegetato sotto il canale	DFV	0,30 (σ=0.04)	0,75 (σ=0.04)
Edifici/asfalto	EA	0,40 (σ=0.04)	0,90 (σ=0.03)
Detrito scarsamente vegetato	DSV	0,40 (σ=0.04)	0,85 (σ=0.04)
Roccia affiorante	R	0,50 (σ=0.04)	0,90 (σ=0.04)
Terrazzamenti incolti	TI	0,33 (σ=0.04)	0,83 (σ=0.04)
Detrito mediamente/ scarsamente vegetato sopra canale	DMV	0,35 (σ=0.04)	0,85 (σ=0.04)

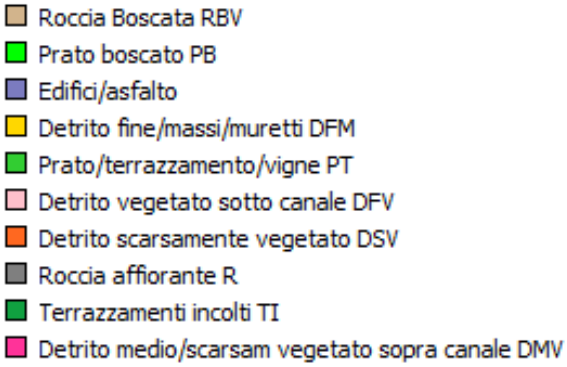


Figura 40. Tipologie di terreno e colore associato nelle analisi 2D.

7.4.2 Scelta dei parametri di restituzione

Per la scelta dei parametri di restituzione da adottare occorre, in linea di principio, ove possibile, effettuare:

- un accurato rilievo in situ per individuare la tipologia di terreno su cui il blocco eventualmente impatta;
- uno studio bibliografico della letteratura presente;
- i suggerimenti del software di calcolo adottato, in funzione delle assunzioni semplificative e delle ipotesi di calcolo su cui si basa;
- una calibrazione mediante back-analysis di eventi passati.

L'esecuzione di una back-analysis completa presuppone la conoscenza della zona di innesco, della volumetria, eventuali interferenze lungo il percorso e della zona di arrivo di uno specifico evento di crollo, per cui quindi si conosce la traiettoria e si ricercano i parametri che meglio rappresentano l'interazione suolo-blocco. Tali parametri sono funzione del codice di calcolo adottato.

Nel caso di informazioni mancanti o di analisi su media/grande scala questo tipo di calibrazione non risulta sempre possibile.

Nel caso in esame, è stato effettuato un accurato rilievo in situ, utile per l'individuazione dei parametri di input per le analisi di propagazione tridimensionale, unitamente ad uno studio della letteratura presente e del manuale del software di calcolo adottato (https://www.rocscience.com/help/rocfall/baggage/rn_rt_table.htm).

Relativamente ad una completa calibrazione, il presente lavoro inquadra un territorio a vasta scala, di cui si dispongono solo alcune informazioni rispetto ad eventi pregressi in specifici punti del territorio. Pertanto, in sede di una calibrazione mediante back-analysis, è stata eseguita una validazione dei parametri scelti effettuando analisi 2D su specifiche traiettorie individuate al fine di risimulare gli eventi pregressi di cui si hanno informazioni di maggior dettaglio (benché sempre di media accuratezza) e verificare che le ipotesi assunte producano risultati comparabili con le risultanze di questi eventi realmente occorsi.

In particolare dal Catasto Dissesti regionale è stato possibile reperire informazioni mediamente accurate relative a tre eventi: l'evento del 29/10/2018 in località Cesseyaz (ID 34275), l'evento del 5/11/2011 in località Bedeguaz (ID 20644), e l'evento del 6/05/2002 in località Frayan (ID 18575).

A seguito vengono riportate le descrizioni sintetiche di questi eventi e risultanze delle simulazioni effettuate, in termini di:

- profilo con individuazione della tipologia di suolo utilizzata (come da Figura 40), delle linee di distacco (a livello grafico indicata nelle figure con pallini bianchi) e delle traiettorie per ogni linea di distacco (rappresentate nelle figure con colori differenti a seconda della linea di distacco da cui provengono);
- punti di arresto lungo il pendio sulla specifica direttrice;
- distribuzione delle velocità lungo il pendio sulla specifica direttrice.

Ai fini delle simulazioni sono stati adottati i seguenti parametri geomeccanici di input:

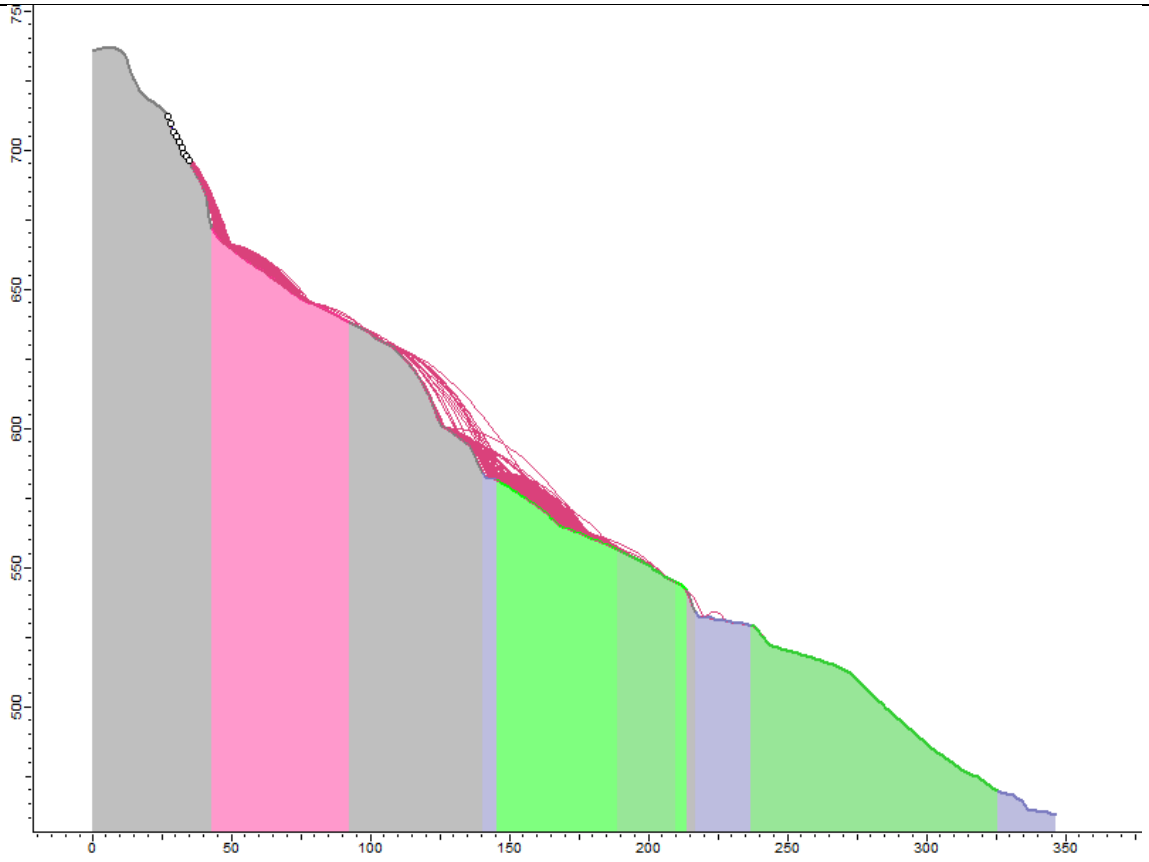
- base topografica di input: rilievo di dettaglio con isoipse ogni 1 m;
- velocità di caduta iniziale: 0 m/s;
- sorgente di distacco lineare in corrispondenza delle indicazioni reperite nel Catasto Dissesti (a livello grafico indicata nelle figure con pallini bianchi);
- densità della roccia: 2700 kg/m^3;
- 5000 simulazioni per ogni sorgente di distacco di tipo lineare (2000 nel caso dell'evento in località Frayan a causa degli oneri computazionali eccessivi richiesti alla macchina): queste costituiscono un campione statistico rappresentativo. La rappresentatività del campione è stata analizzata verificando che il numero di blocchi per cella minimizzasse l'errore, al fine di limitare gli errori epistemici dovuti al modello;
- assenza di fenomeni di frantumazione dei blocchi;
- metodo probabilistico Montecarlo per la determinazione del coefficiente di restituzione normale R_n e del coefficiente di restituzione tangenziale R_t. L'angolo di attrito al rotoscivolamento φ è stato scelto come valore deterministico cautelativo di 30°. Per i coefficienti di restituzione è stata adottata una distribuzione normale con i valori di media e deviazione standard (σ) riportati in Tabella 6. La Figura 40 riporta invece le tipologie di terreno utilizzate.

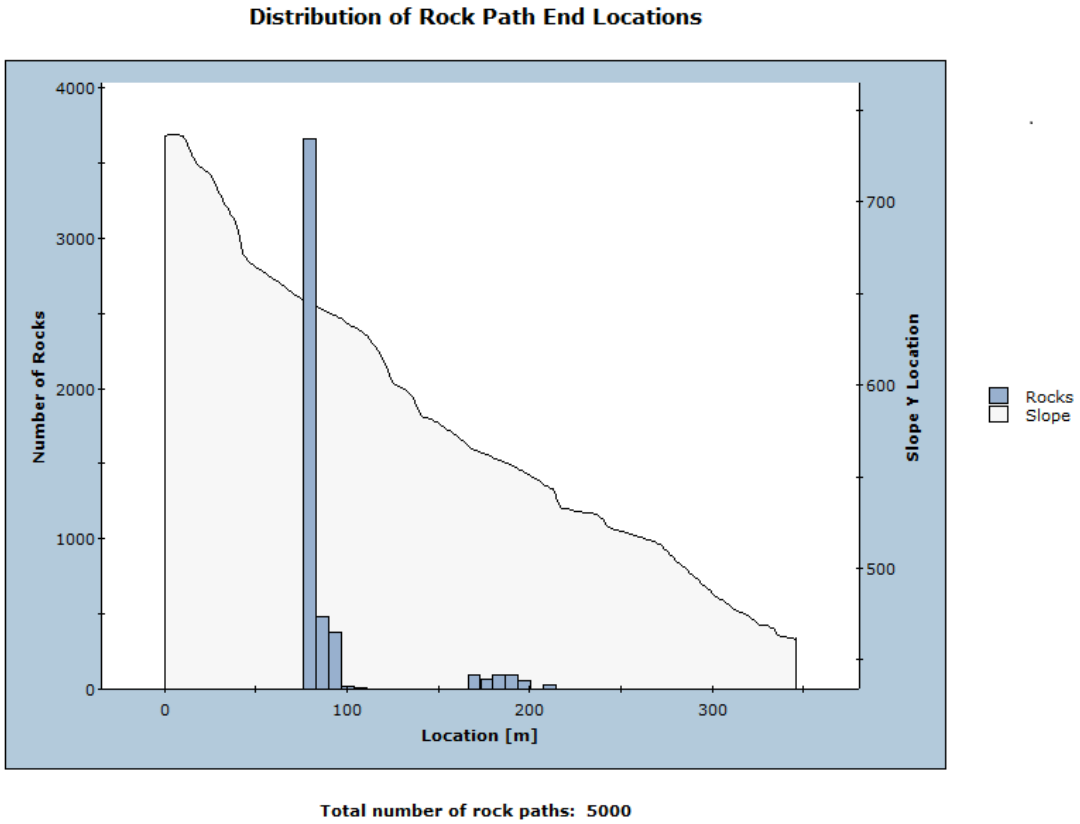
7.4.2.1 Evento del 29/10/2018 in località Cesseyaz (ID 34275)

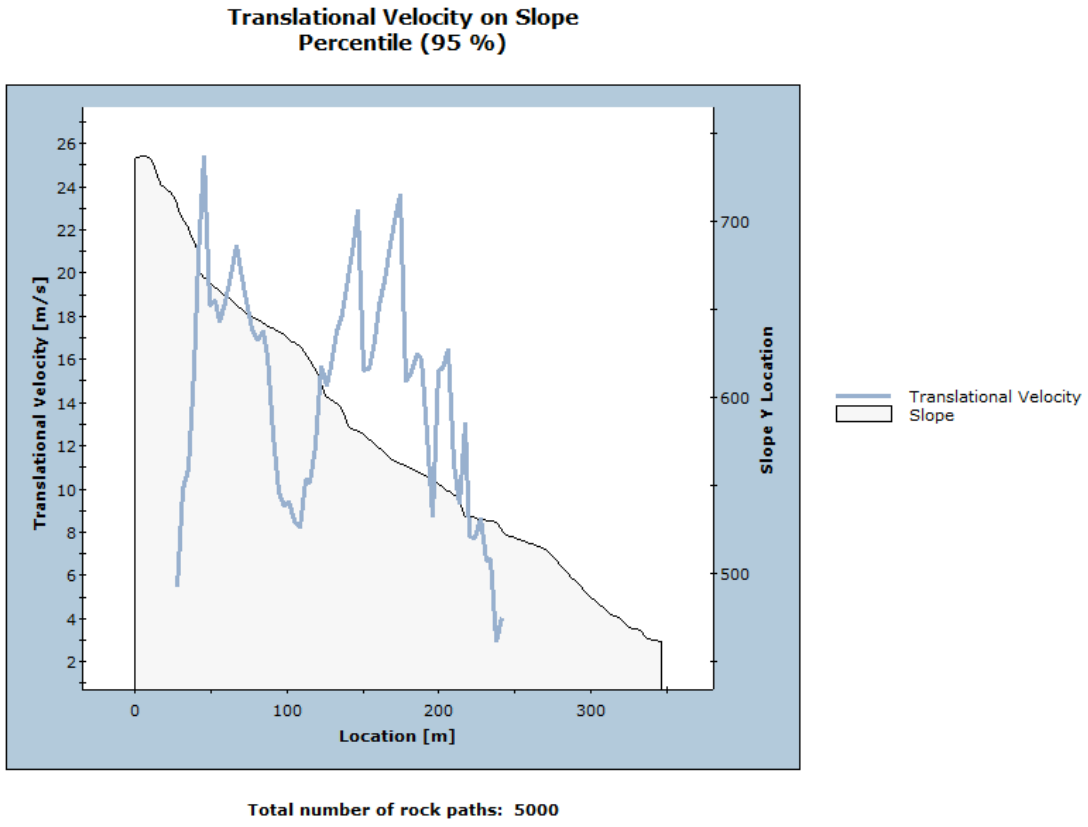
Il Catasto Dissesti riporta un occorso il 29/10/2018 in località Cesseyaz (ID 34275), descritto come "*Caduta massi dalla parete rocciosa che sovrasta il Ru Chandianaz (sentiero n.103) e la frazione Cesseyaz. I massi si sono arrestati in parte in corrispondenza della passerella, in parte sulla strada comunale che conduce alla località Farys.*" (Figura 41).

Figura 41: Foto dell'evento occorso il 29/10/2018 (Catasto Dissesti ID 34275).

1 linea di distacco (5000 lanci)







Si evidenzia come i blocchi arrivino e si arrestino in gran parte in corrispondenza della passerella, mentre altri arrivino arrestandosi sulla strada comunale che conduce alla località Farys.

7.4.2.2 Evento del 5/11/2011 in località Bedeguaz (ID 20644)

Il Catasto Dissesti segnala un evento in località Bedeguaz il il 5/11/2011 (ID 20644) di cui si riporta: "*Frana di crollo con blocchi ciclopici (10-15 mc) che si sono arrestati appena a monte del tracciato ferroviario […] Danni al ru Chandianaz con sfondamento delle condotte in cemento.*" (Figura 42). Di questo evento può essere nota la posizione di partenza e il percorso mediante fotointerpretazione (Figura 43).

Figura 42: Foto dell'evento occorso il 05/11/2011 (Catasto Dissesti ID 20644).

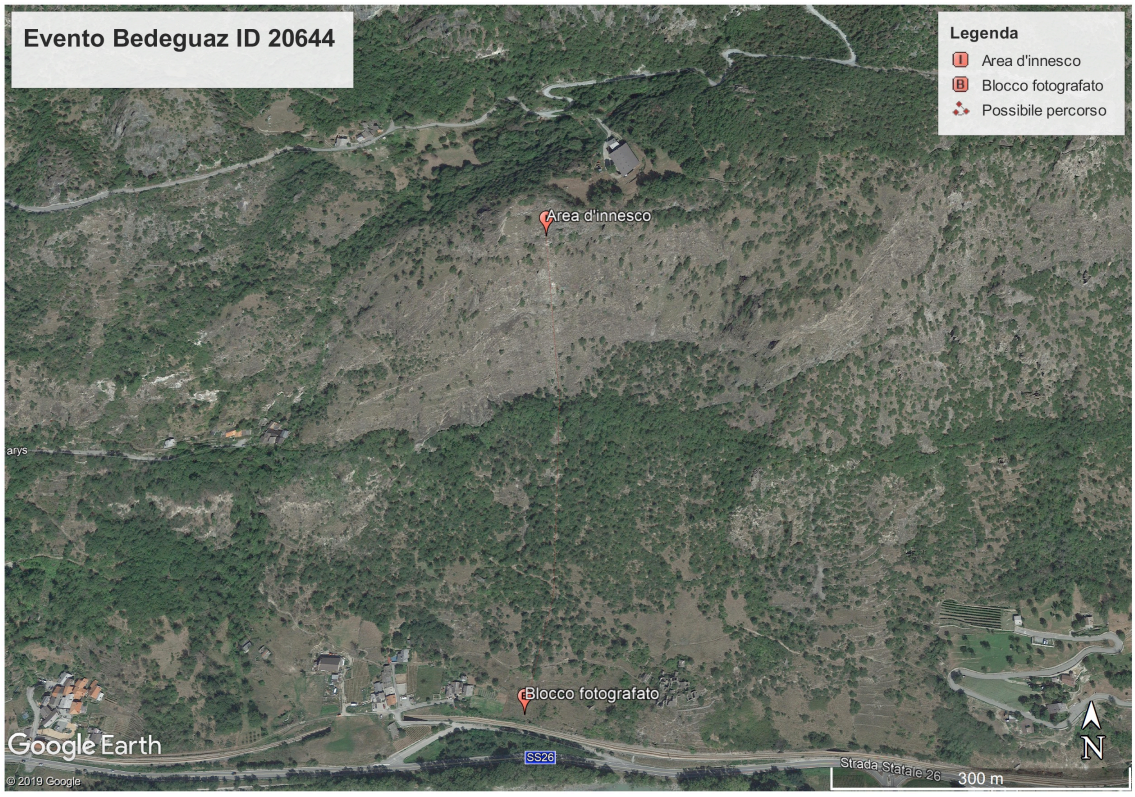
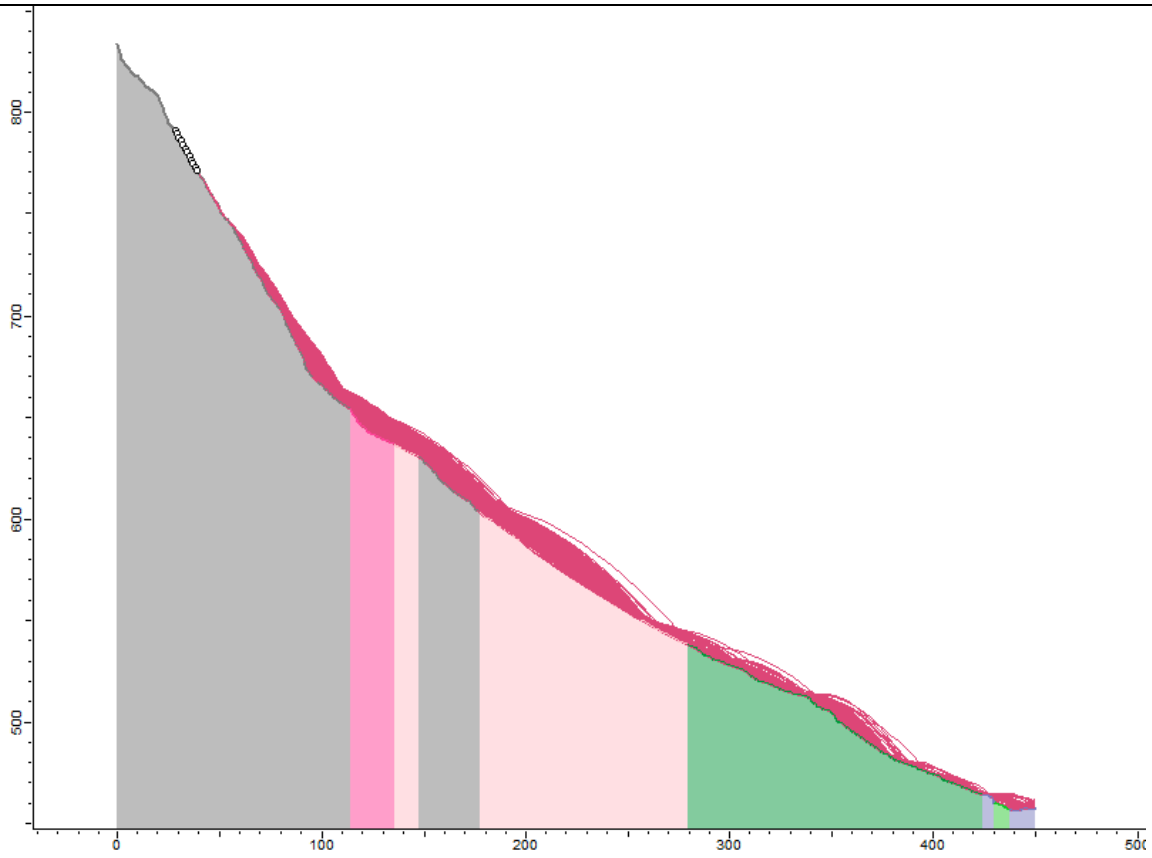
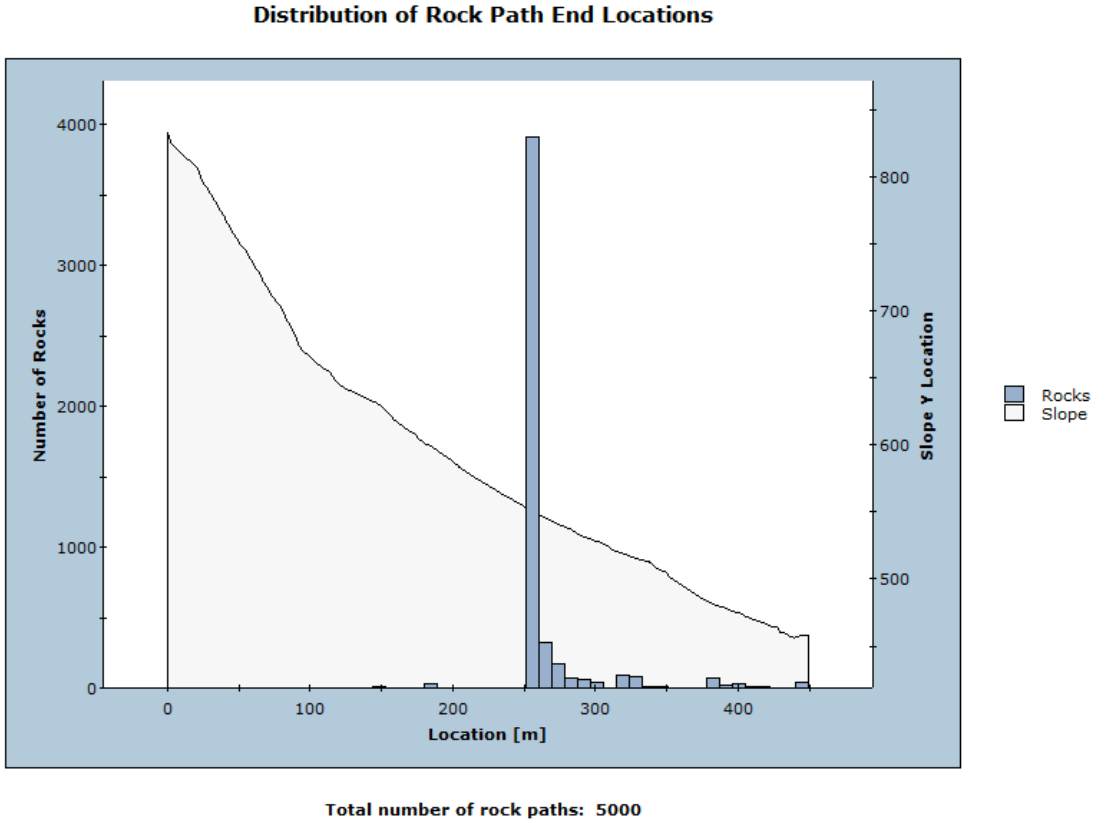
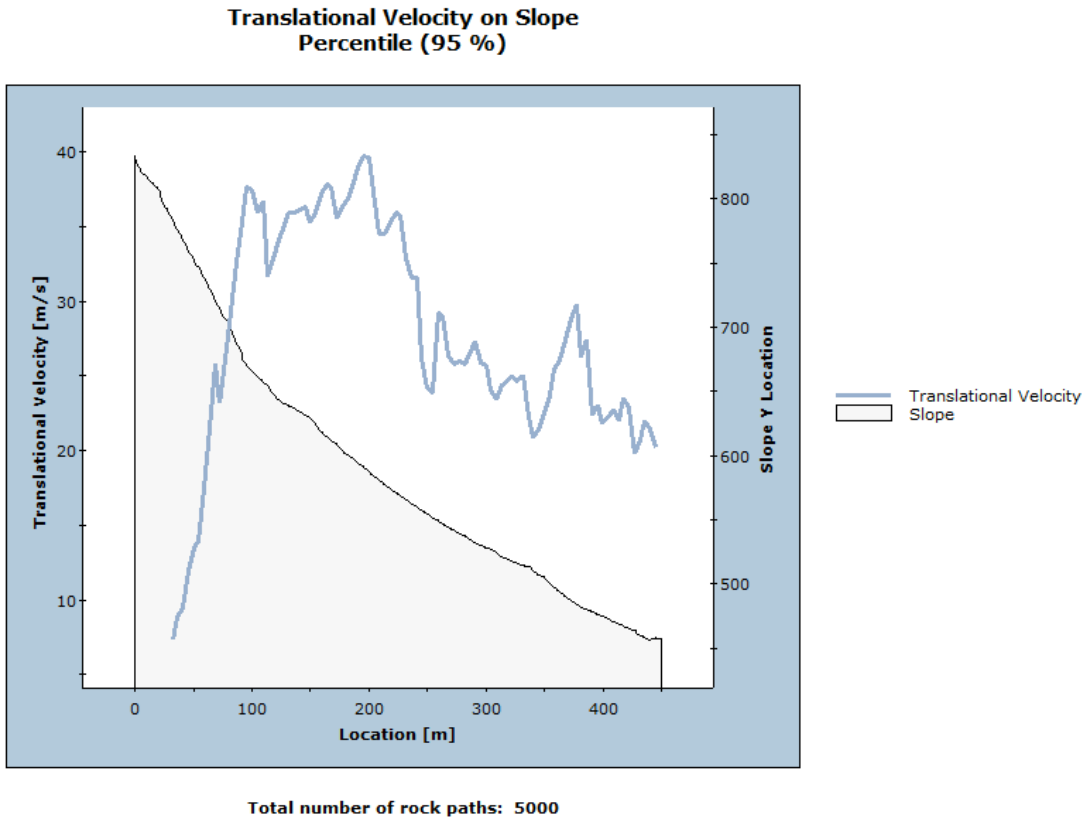


Figura 43: ricostruzione del possibile percorso del fenomeno occorso il 05/11/2011 (Immagine Google Earth).

1 linea di distacco (5000 lanci)







Si osserva come alcuni blocchi possano raggiungere il tracciato ferroviario.

7.4.2.3 Evento del 6/05/2002 in località Frayan (ID 18575)

In località Frayan, il 6/05/2002 il Catasto Dissesti ha registrato un evento (ID 18575) di cui si riporta: "*Da una stima effettuata a distanza la zona di distacco è stata individuata nel settore sinistro della parete sommitale, sovrastante il colatoio detritico, indicativamente alla quota di 1100 m s.l.m. La massa rocciosa franata nella sua discesa si è frantumata in numerosi blocchi, rimobilizzando blocchi di detrito e percorrendo il canalone sottostante con arresti sia nel settore sommitale sia in prossimità e in corrispondenza delle opere di protezione realizzate a monte di Petit Frayan.*" (Figura 44).

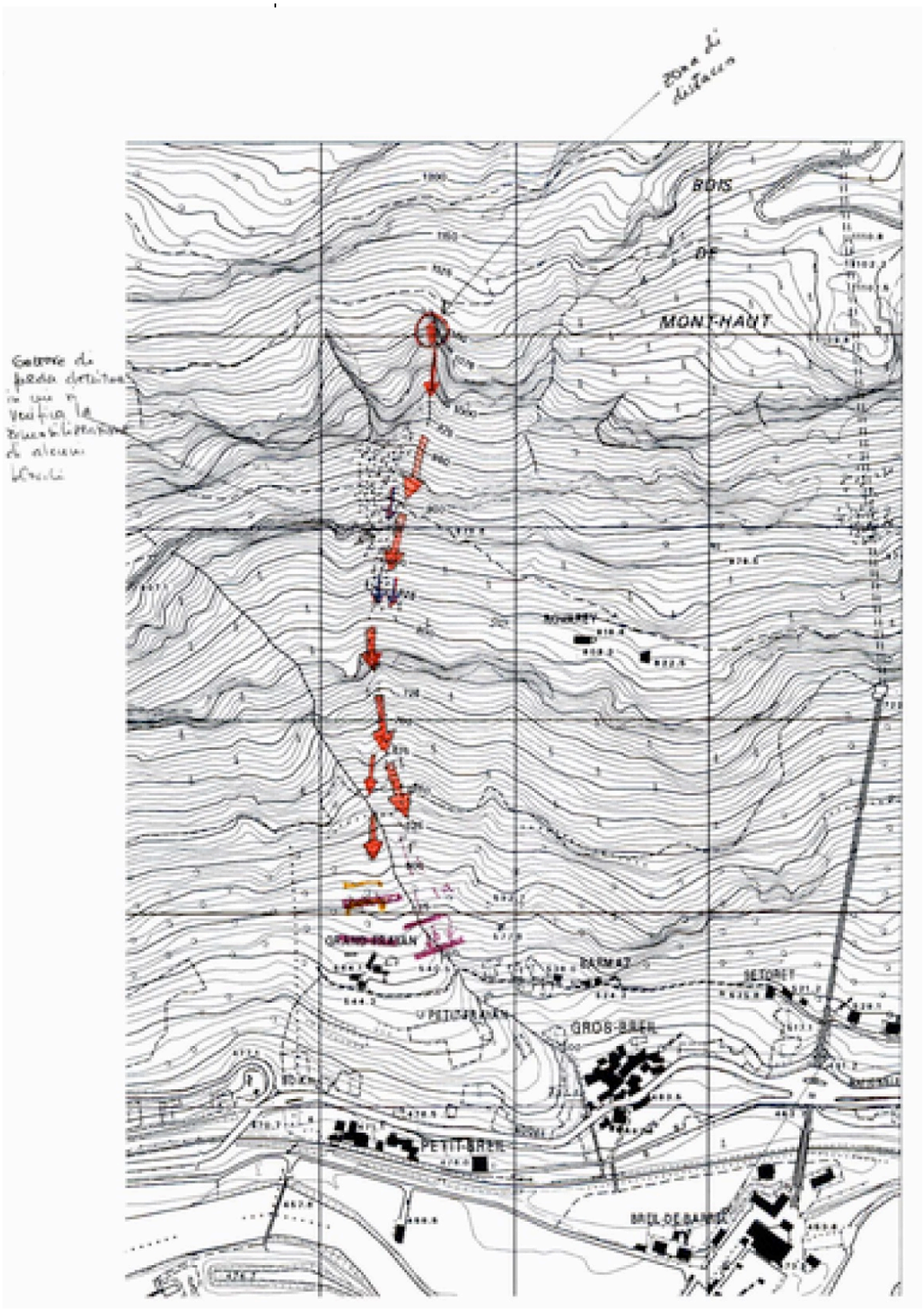
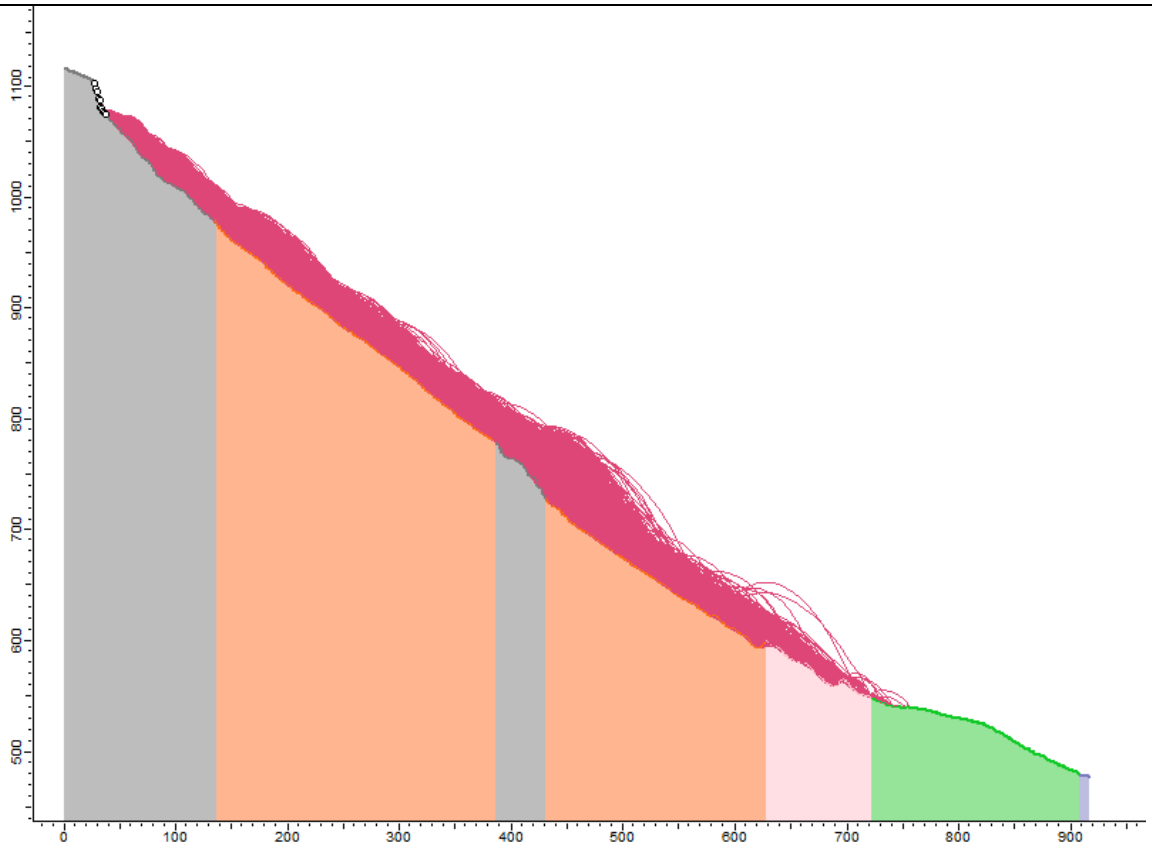
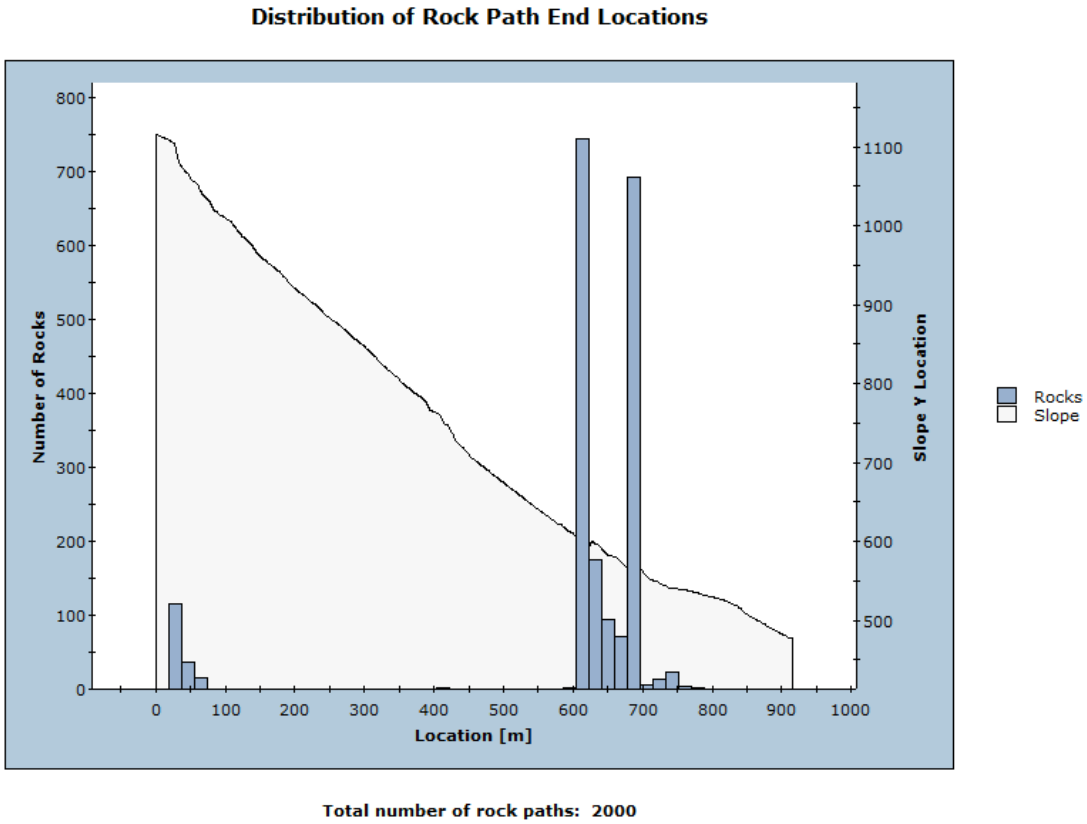
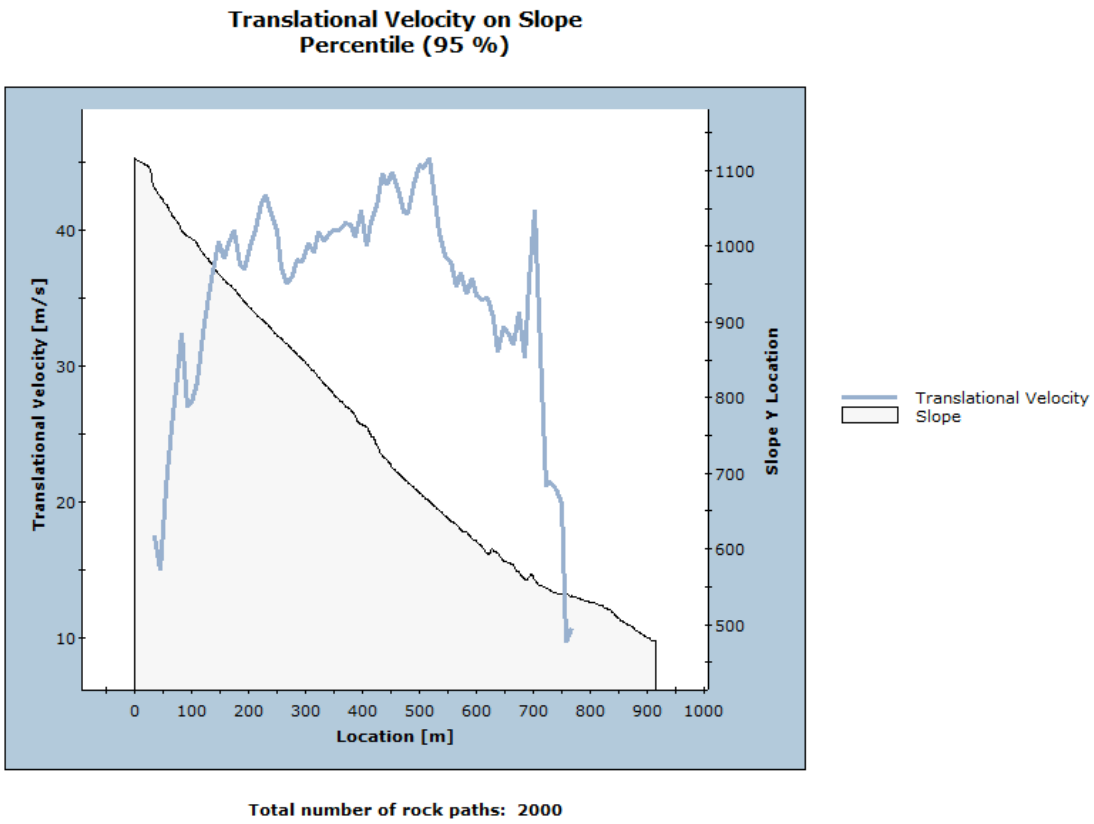


Figura 44: Corografia con ubicazione dell'evento del 06/05/2002 (Catasto Dissesti ID 18575).

1 linea di distacco (2000 lanci)



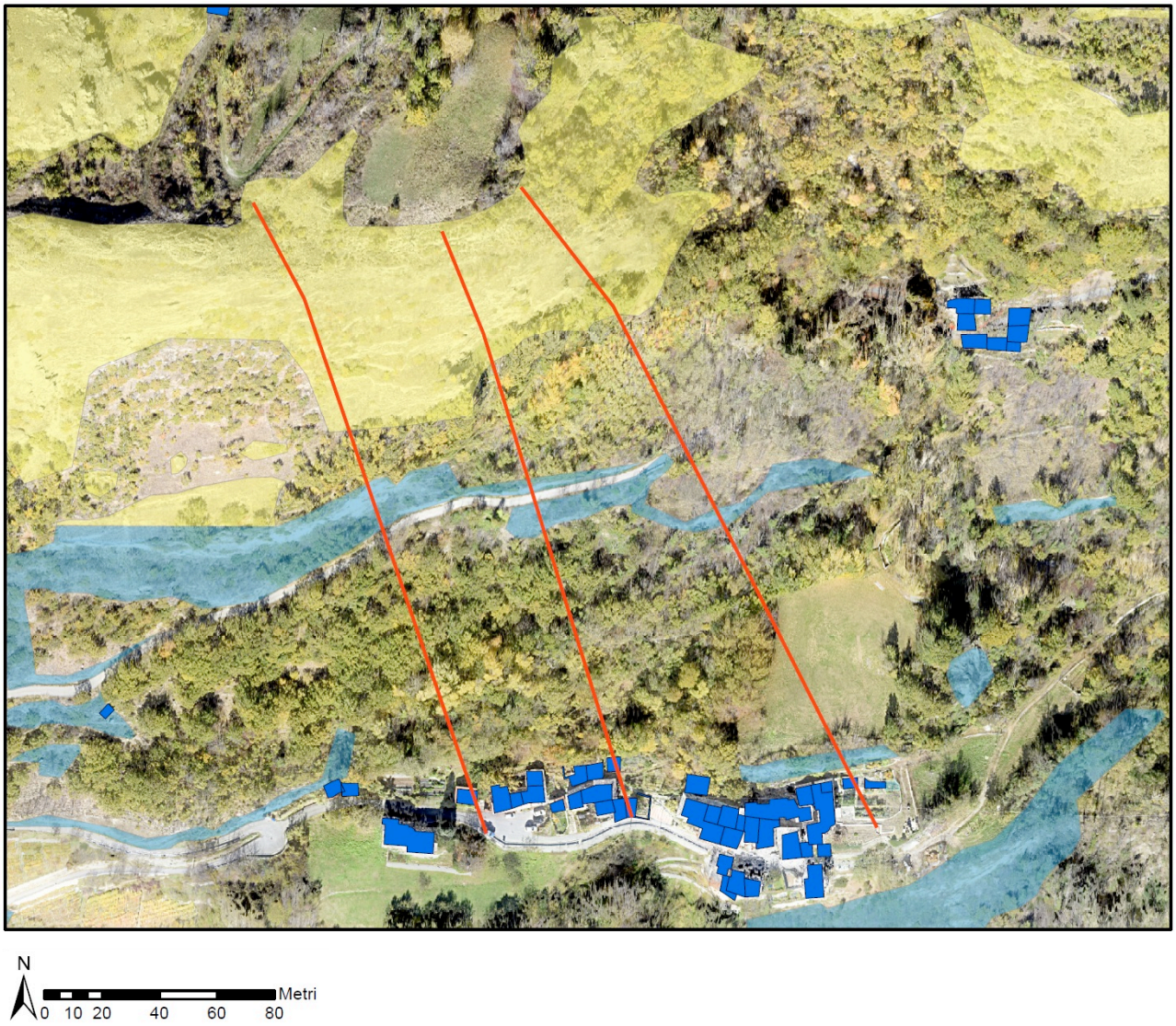


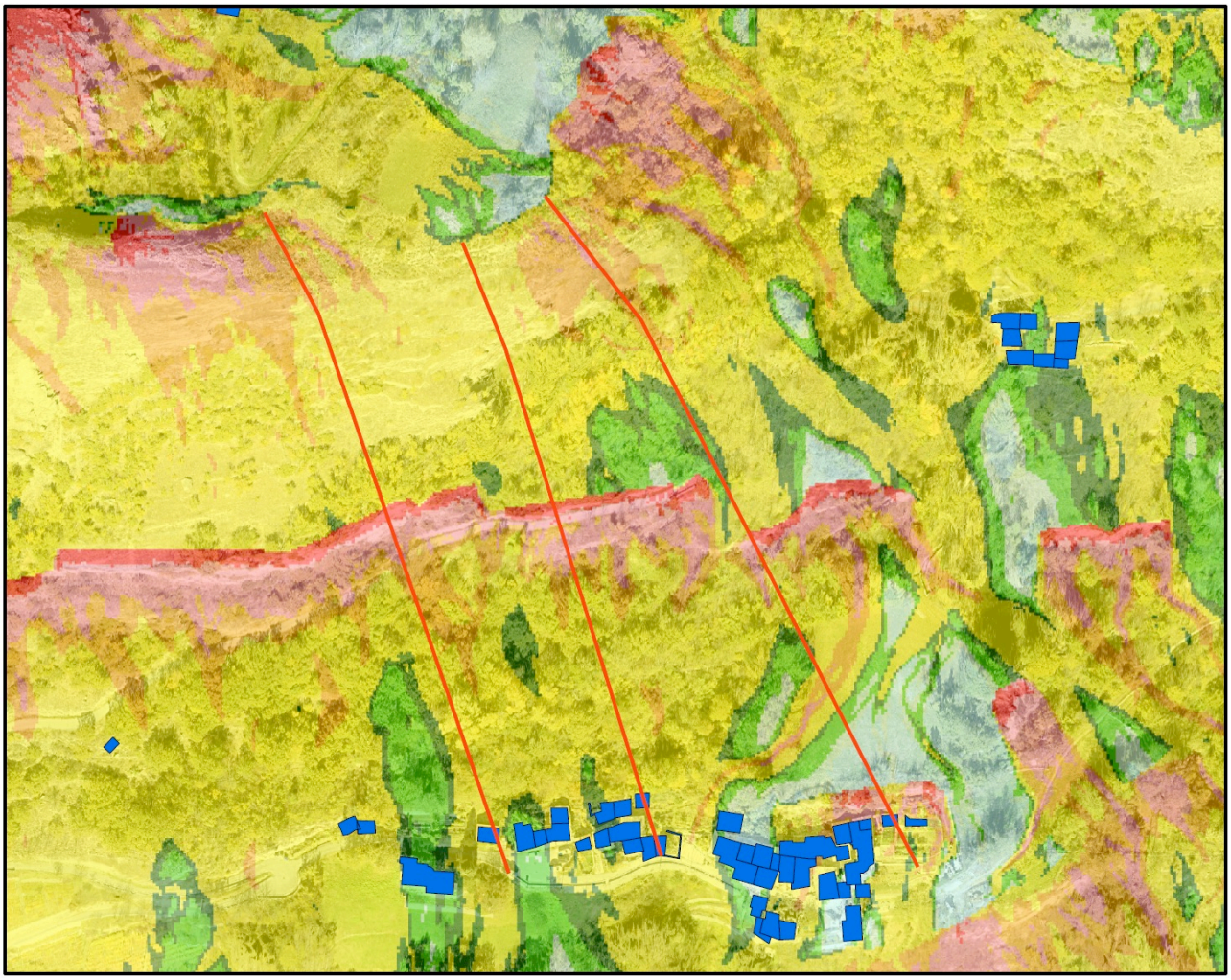


Si osserva come i blocchi, percorrendo il canalone, possano arrivare in prossimità e in corrispondenza delle opere di protezione che erano state realizzate a monte di Petit Frayan prima del 2002, arrestandosi a valle.

7.4.3 Località Chandianaz

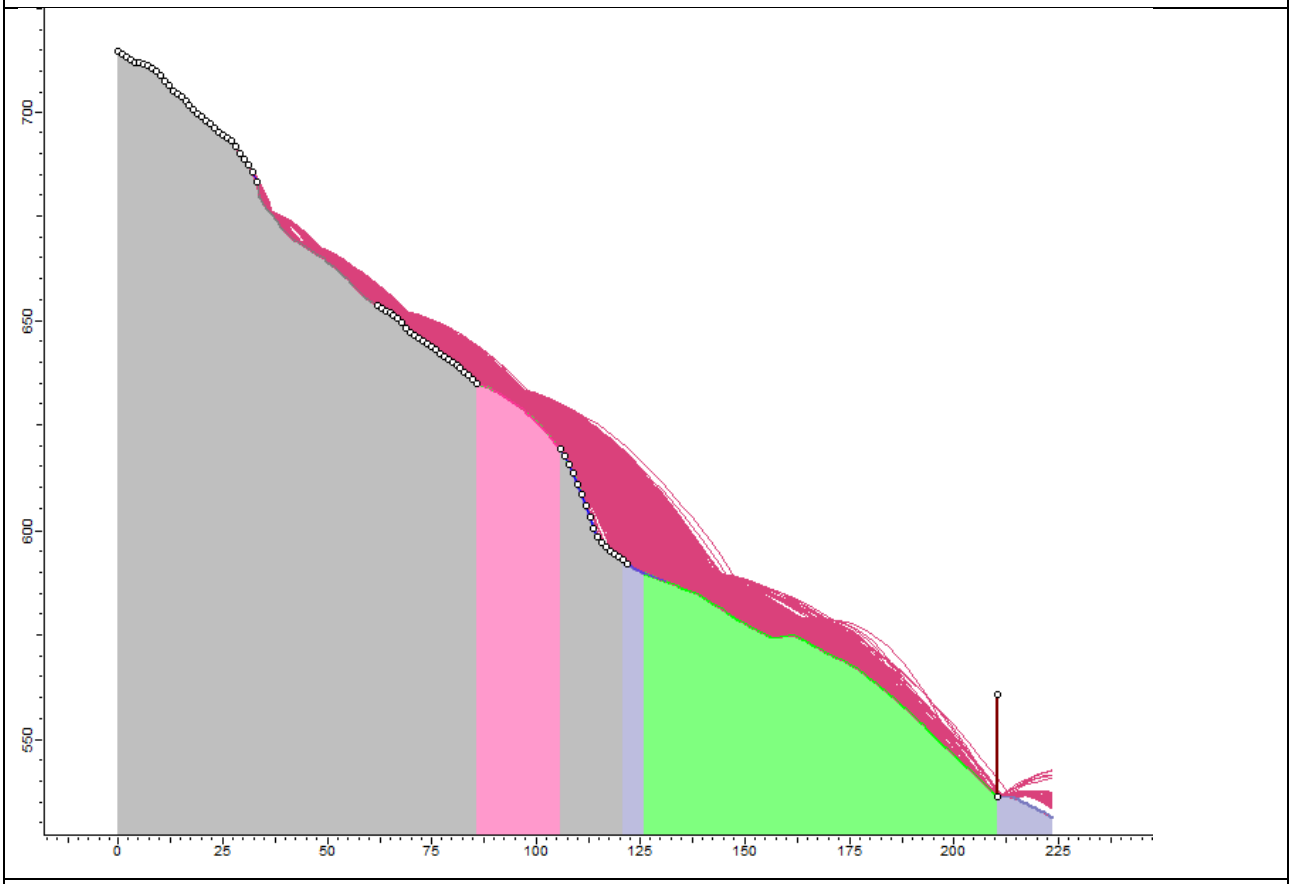
Si riportano nel seguito i risultati relativi alla loc. Chandianaz. In tale borgata sono state individuate tre sezioni rappresentative per le quali si registra l'arrivo di blocchi in prossimità dell'abitato nelle analisi di propagazione effettuate.

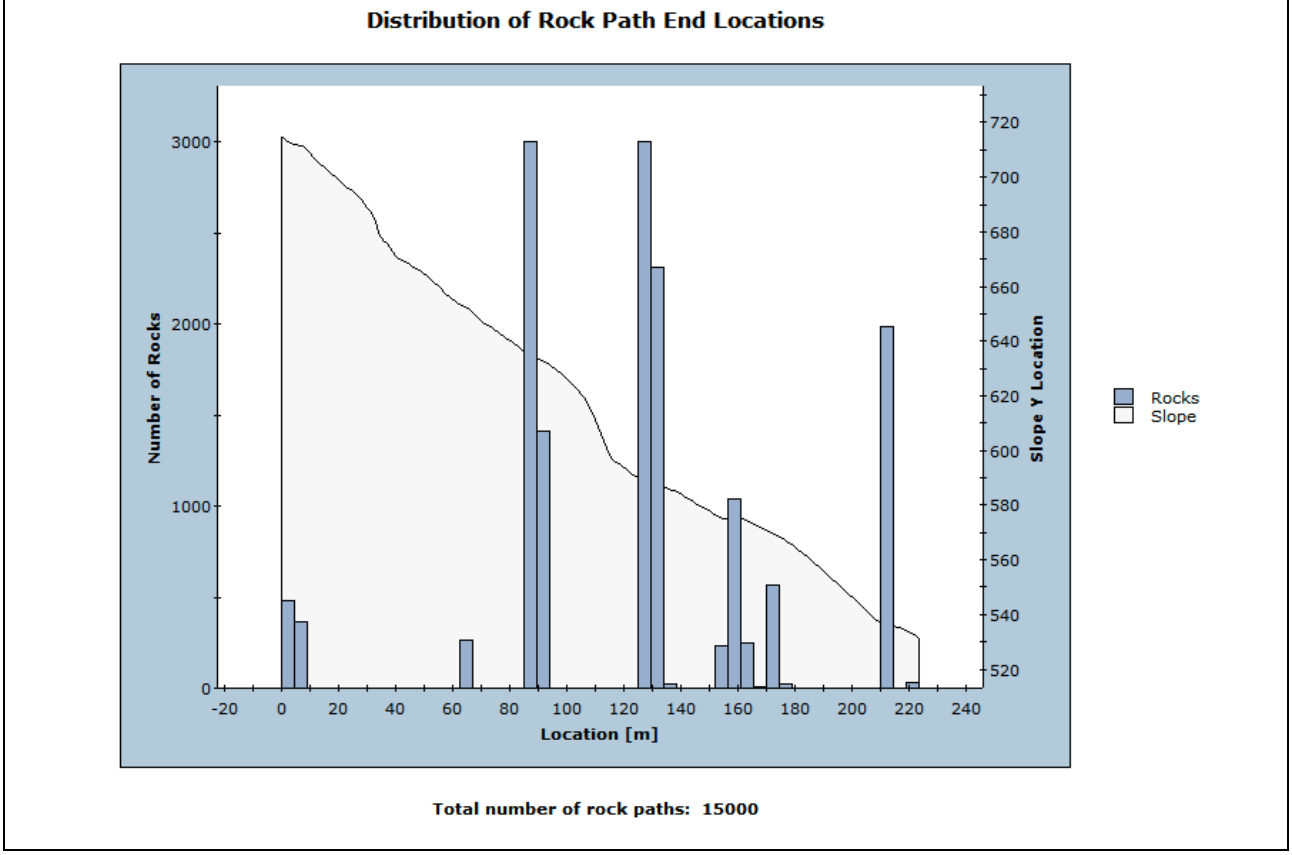


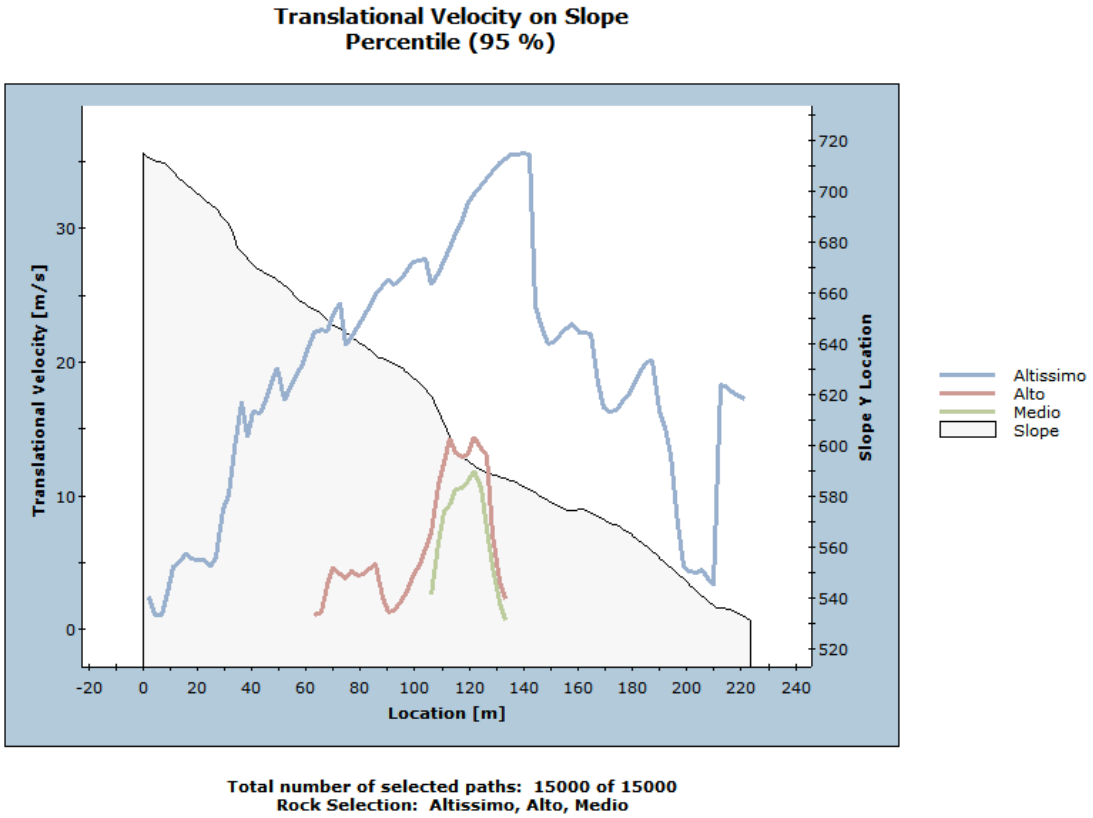

N
0 10 20 40 60 80
Metri

7.4.3.1 Sezione 1

3 linee di distacco (15000 lanci)







Collettore borgo:

Numero blocchi: 28 dalla sola sorgente «Altissima» (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente « Altissima »: 0,6 % e da tutte le sorgenti : 0,2%)

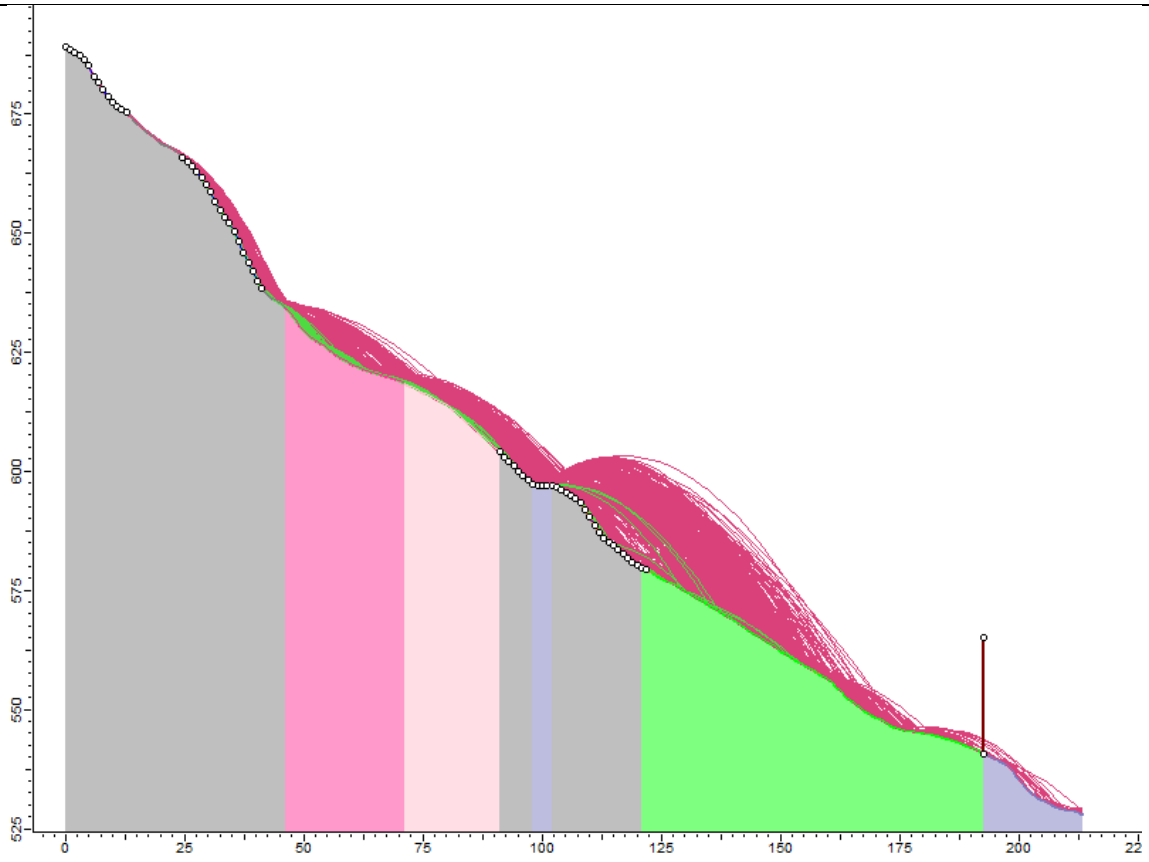
Volume sorgente: 3,5 m^3

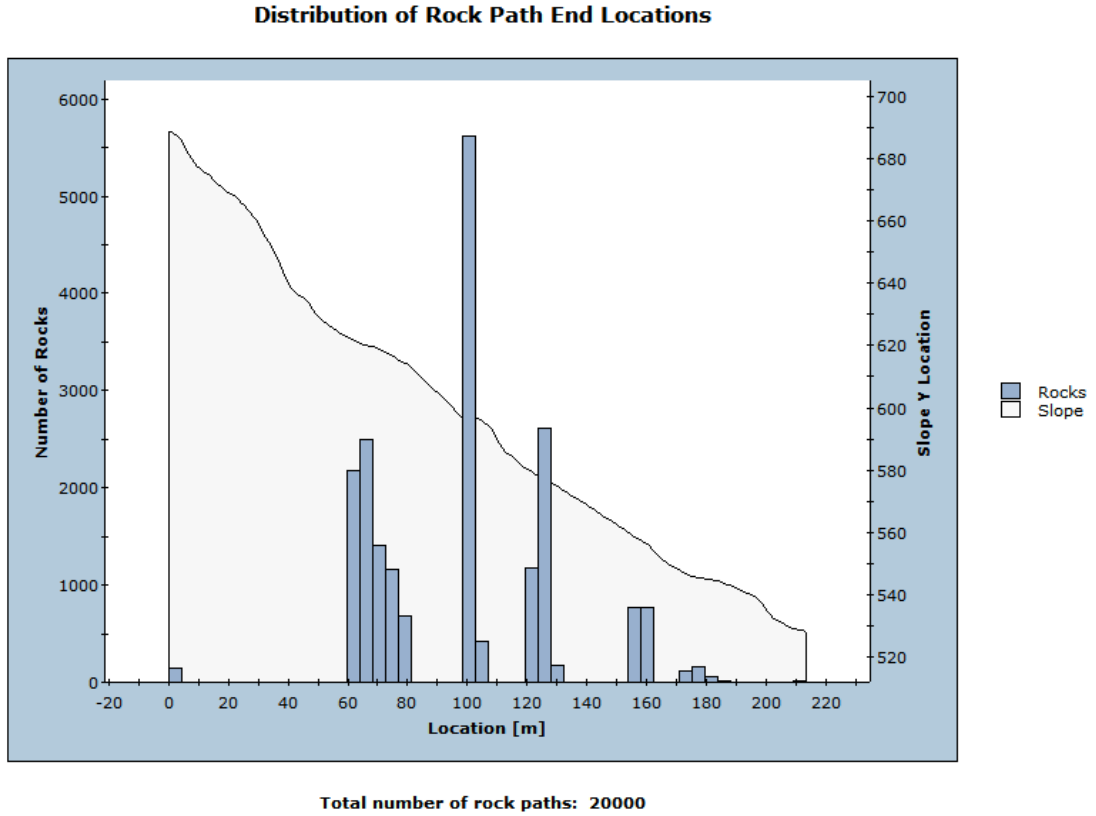
Velocità (95%): 39,50 m/s

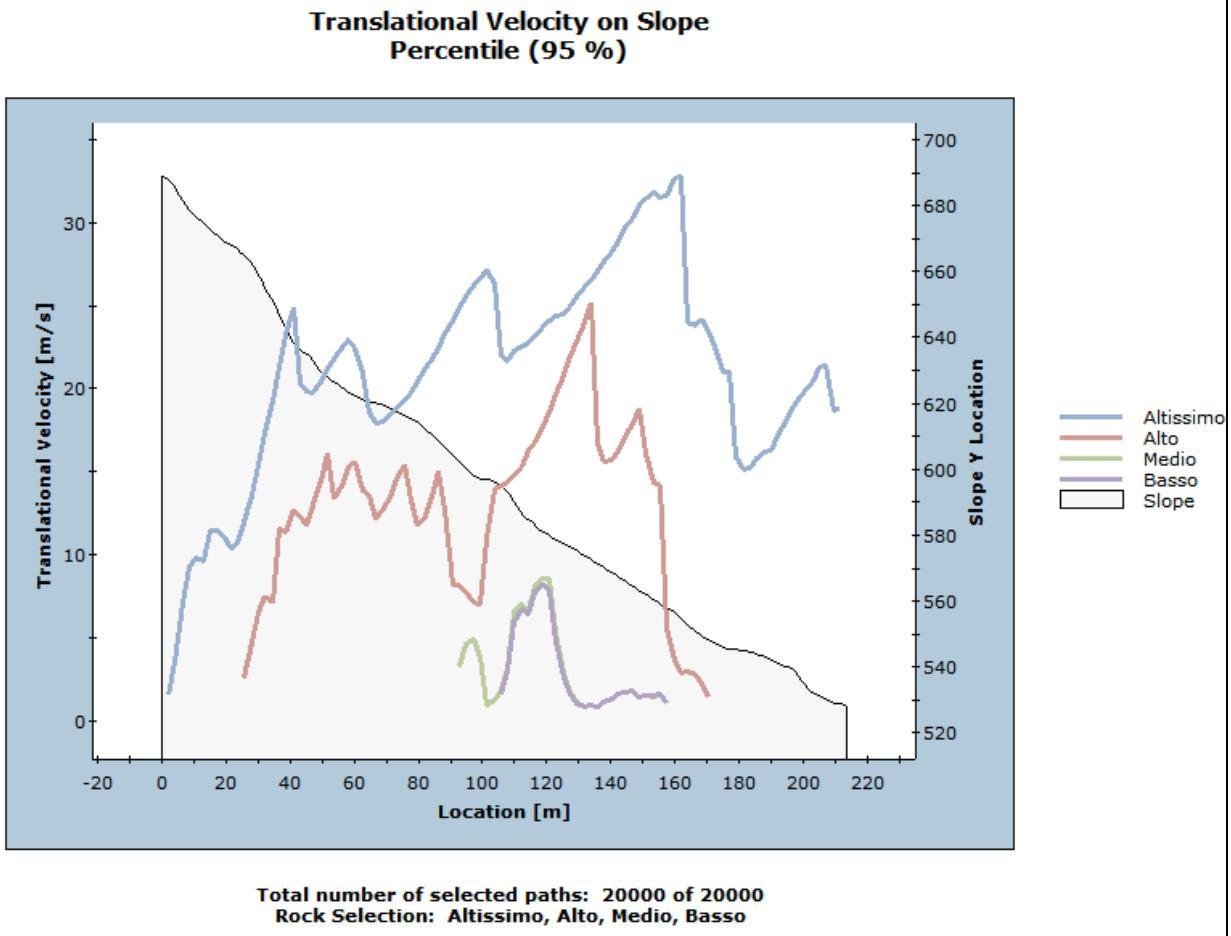
Altezza (95%): 1,52 m

7.4.3.2 Sezione 2

4 linee di distacco (20000 lanci)







Collettore borgo:

Numero blocchi: 14 dalla sola sorgente «Altissima» (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Altissima»: 0,3 % e da tutte le sorgenti: 0,07%)

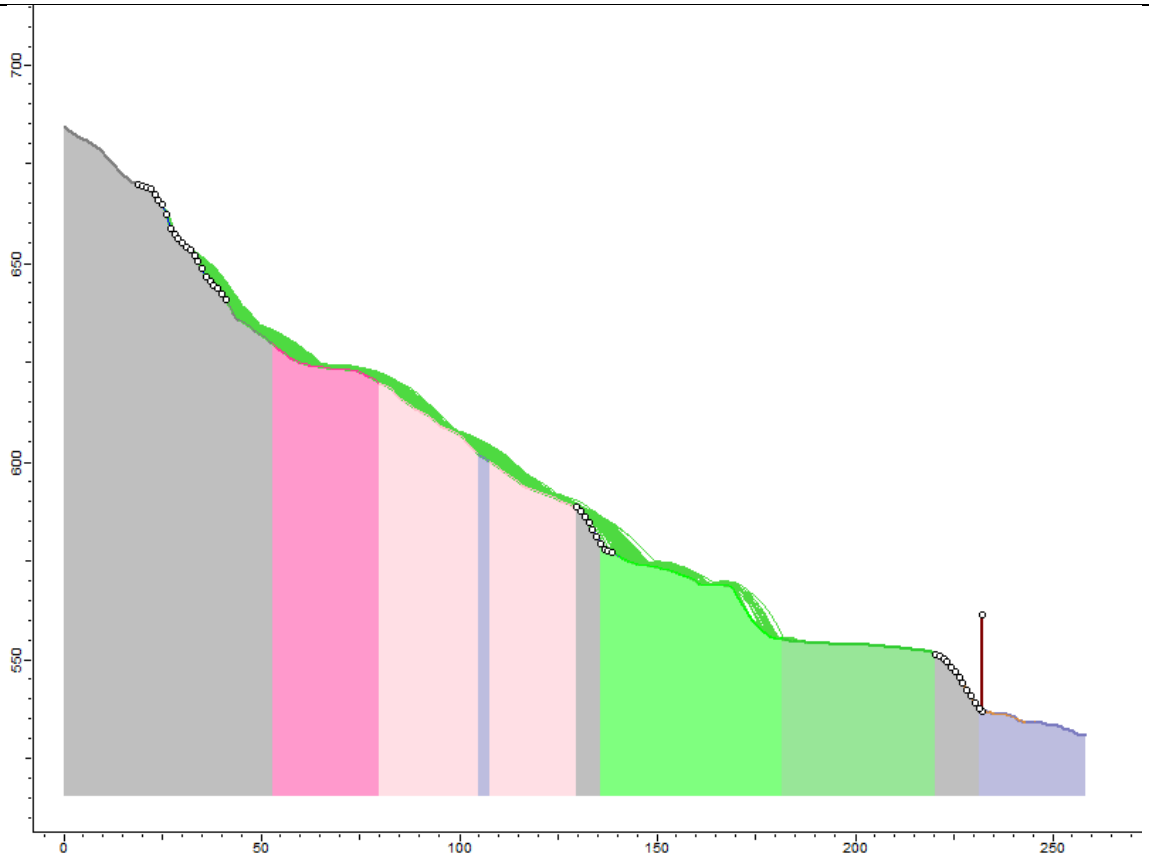
Volume sorgente: 3,5 m^3

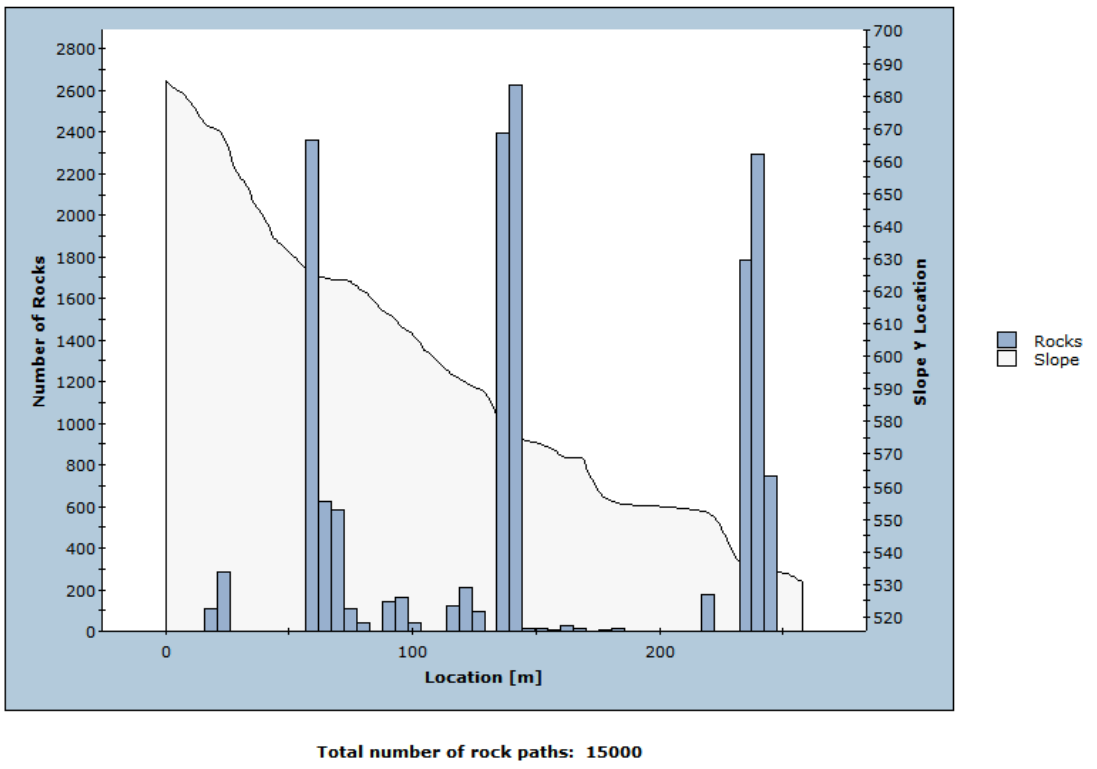
Velocità (95%): 20,90 m/s

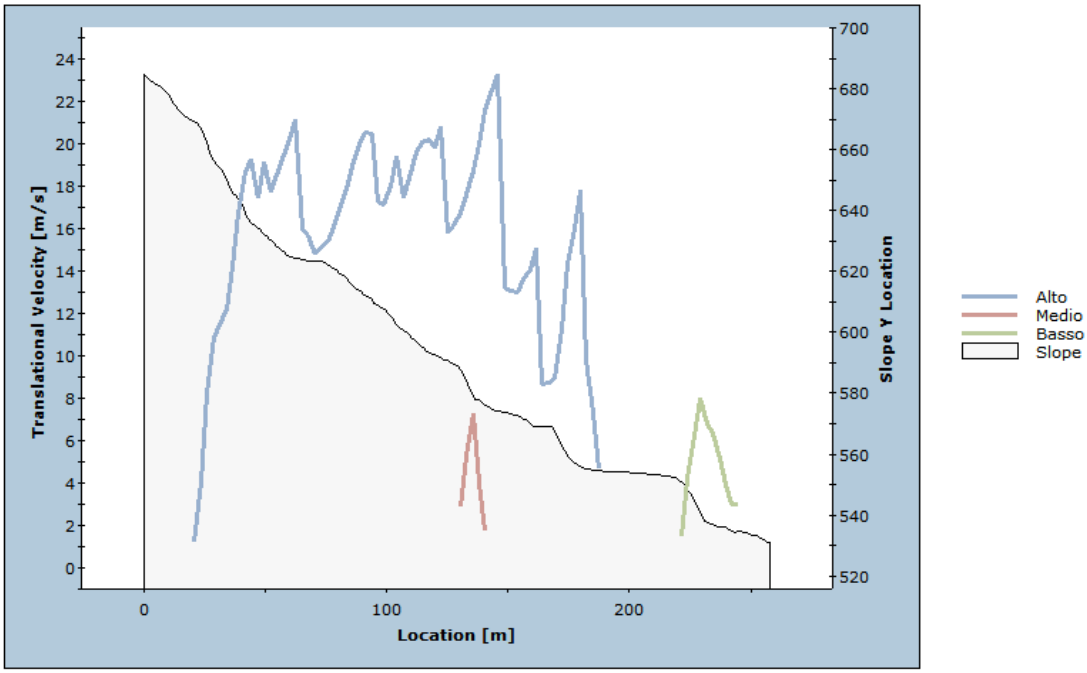
Altezza (95%): 2,98 m

7.4.3.3 Sezione 3

3 linee di distacco (15000 lanci)







Collettore borgo:

Numero blocchi: 4153 dalla sola sorgente «Bassa» (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Bassa»: 83 % e da tutte le sorgenti: 27,69 %)

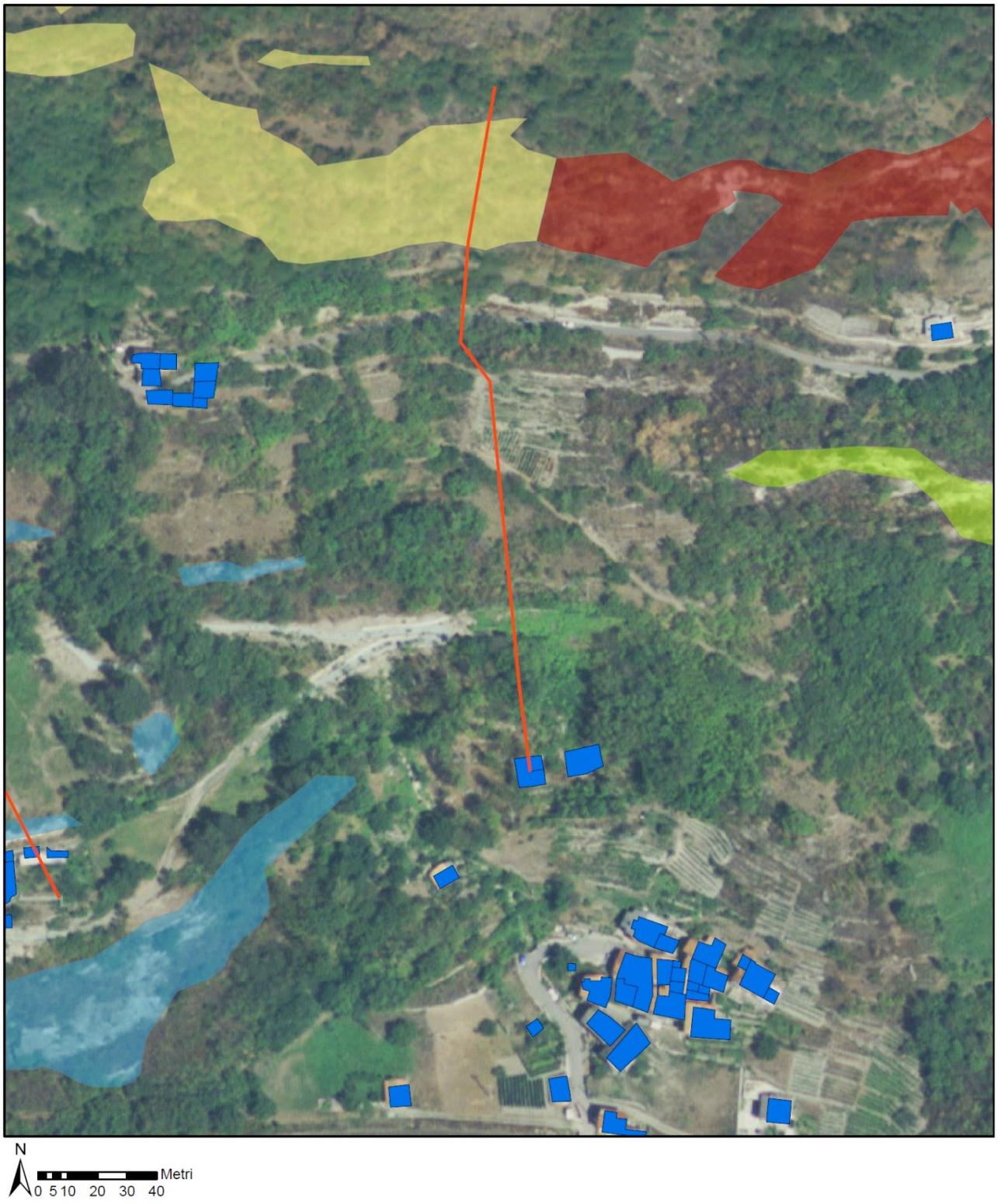
Volume sorgente: 1 m^3

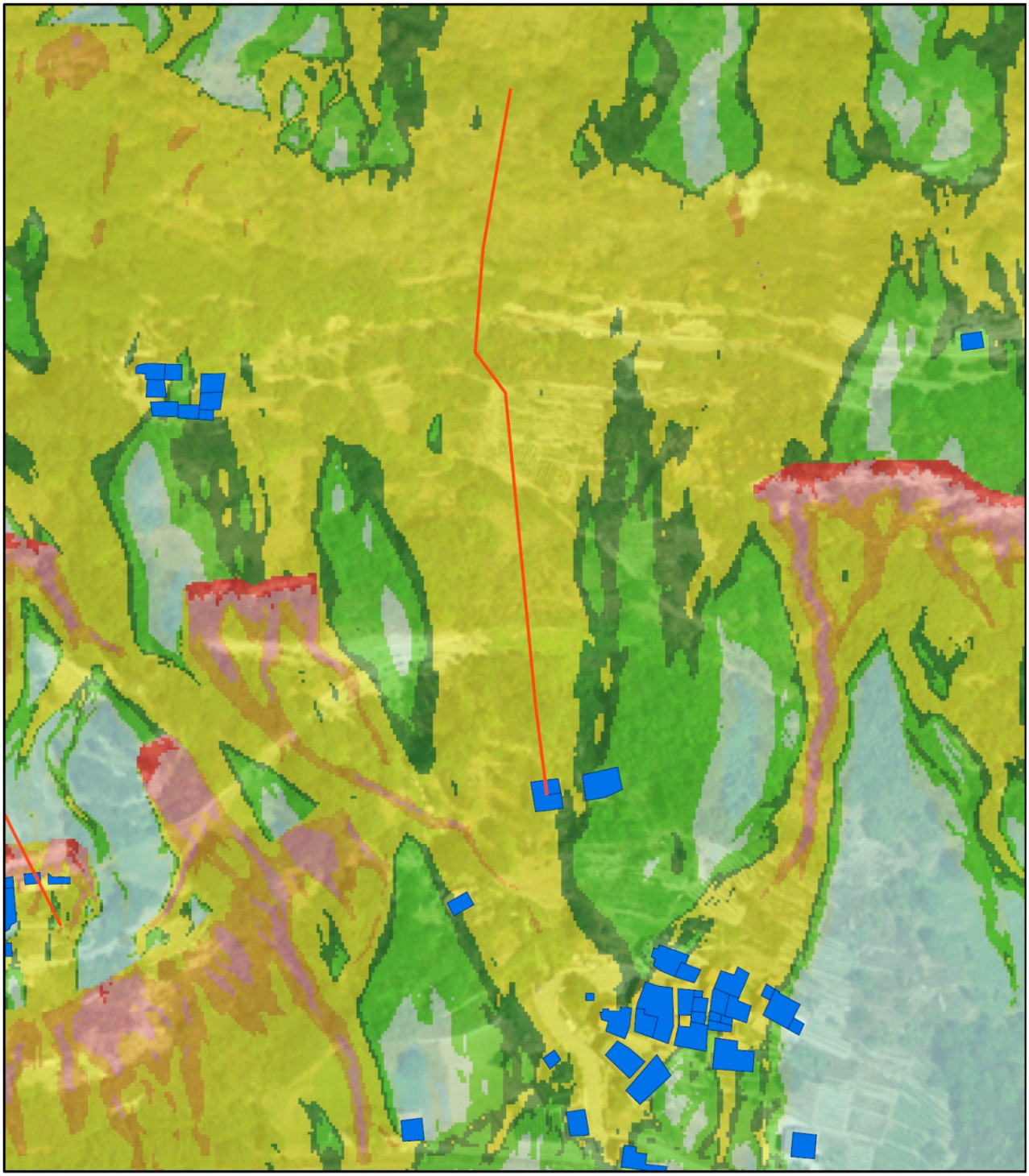
Velocità (95%): 7,04 m/s

Altezza (95%): 0,14 m

7.4.4 Località Parleaz

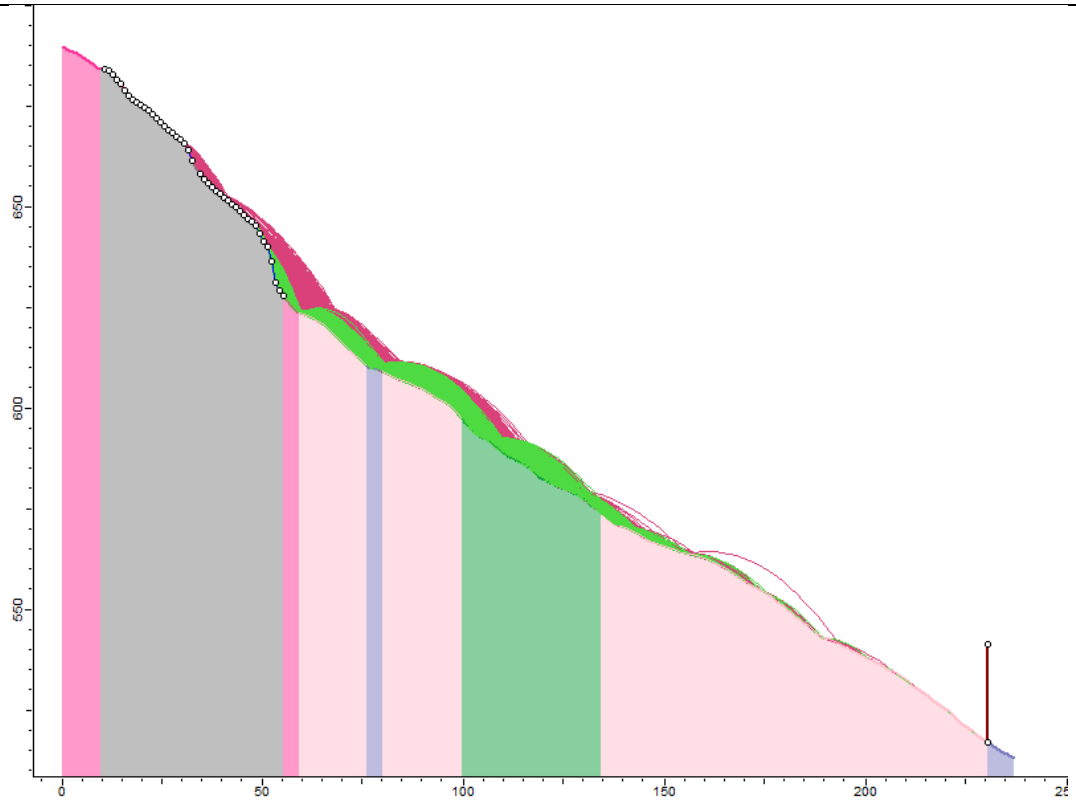
Si riportano nel seguito i risultati relativi alla loc. Parleaz. In tale borgata è stata individuata una unica sezione rappresentativa per la quali si registra l'arrivo di blocchi in prossimità dell'abitato nelle analisi di propagazione effettuate.

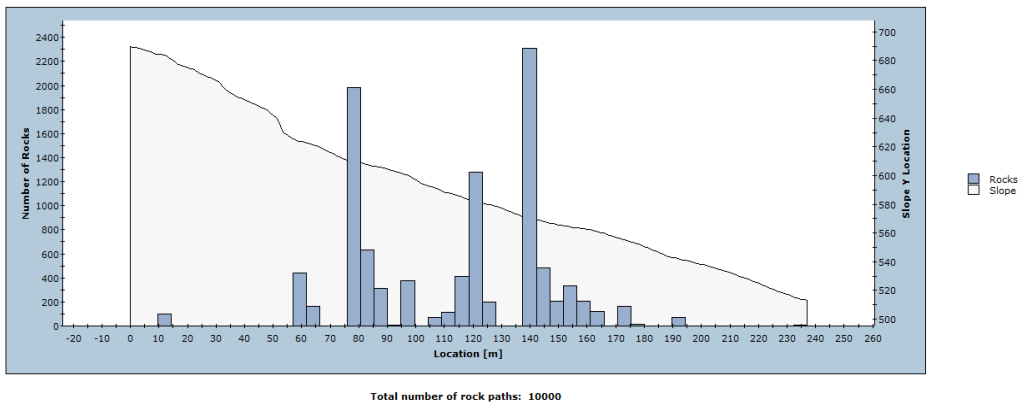


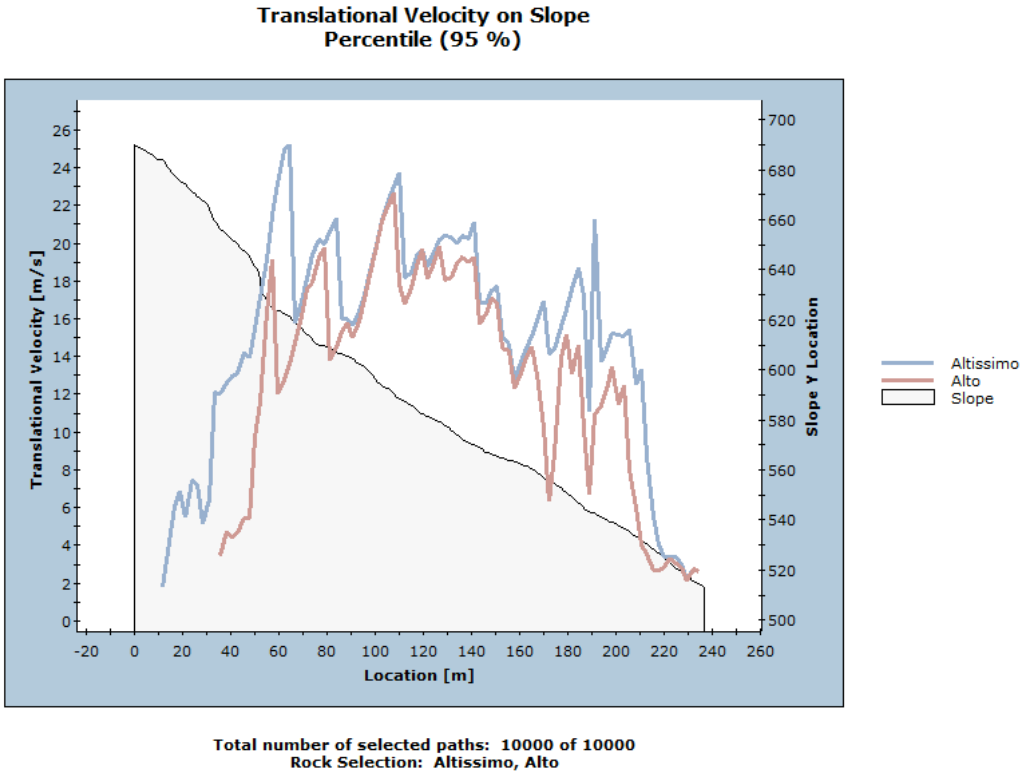

N
Metri
0 5 10 20 30 40

7.4.4.1 Sezione 1

2 linee di distacco (10000 lanci)







Collettore borgo:

- **<u>Sorgente Altissima</u>:**

Numero blocchi: 5 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Altissima»: 0,1 % e da tutte le sorgenti: 0,05 %)

Volume sorgente: 3,5 m^3

Velocità (95%): 2,23 m/s

Altezza (95%): 0,18 m

- **<u>Sorgente Alta</u>:**

Numero blocchi: 1 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Alta»: 0,02 % e da tutte le sorgenti: 0,01 %)

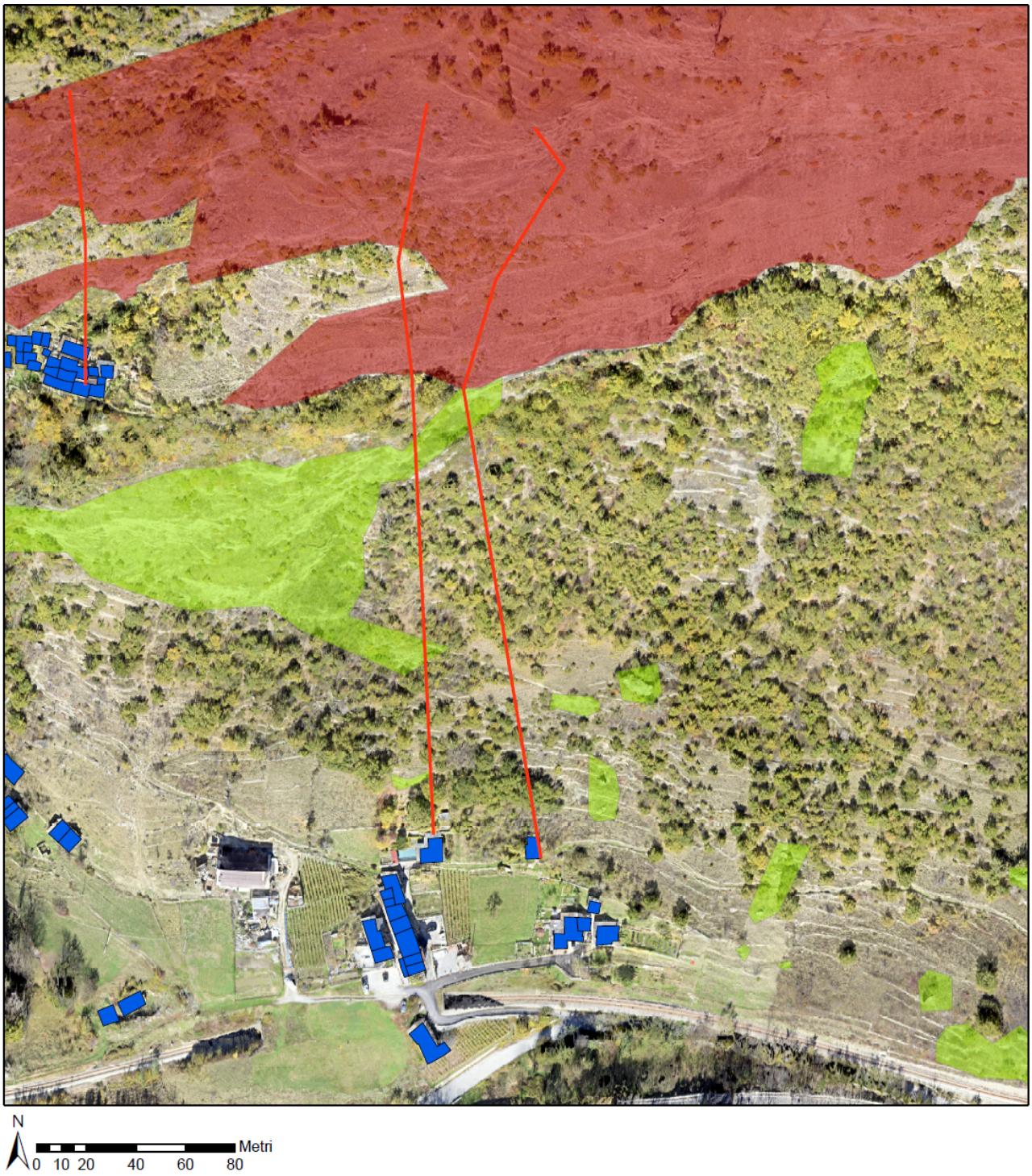
Volume sorgente: 3,5 m^3

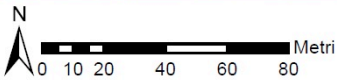
Velocità (95%): 2,19 m/s

Altezza (95%): 0,18 m

7.4.5 Località Bedeguaz

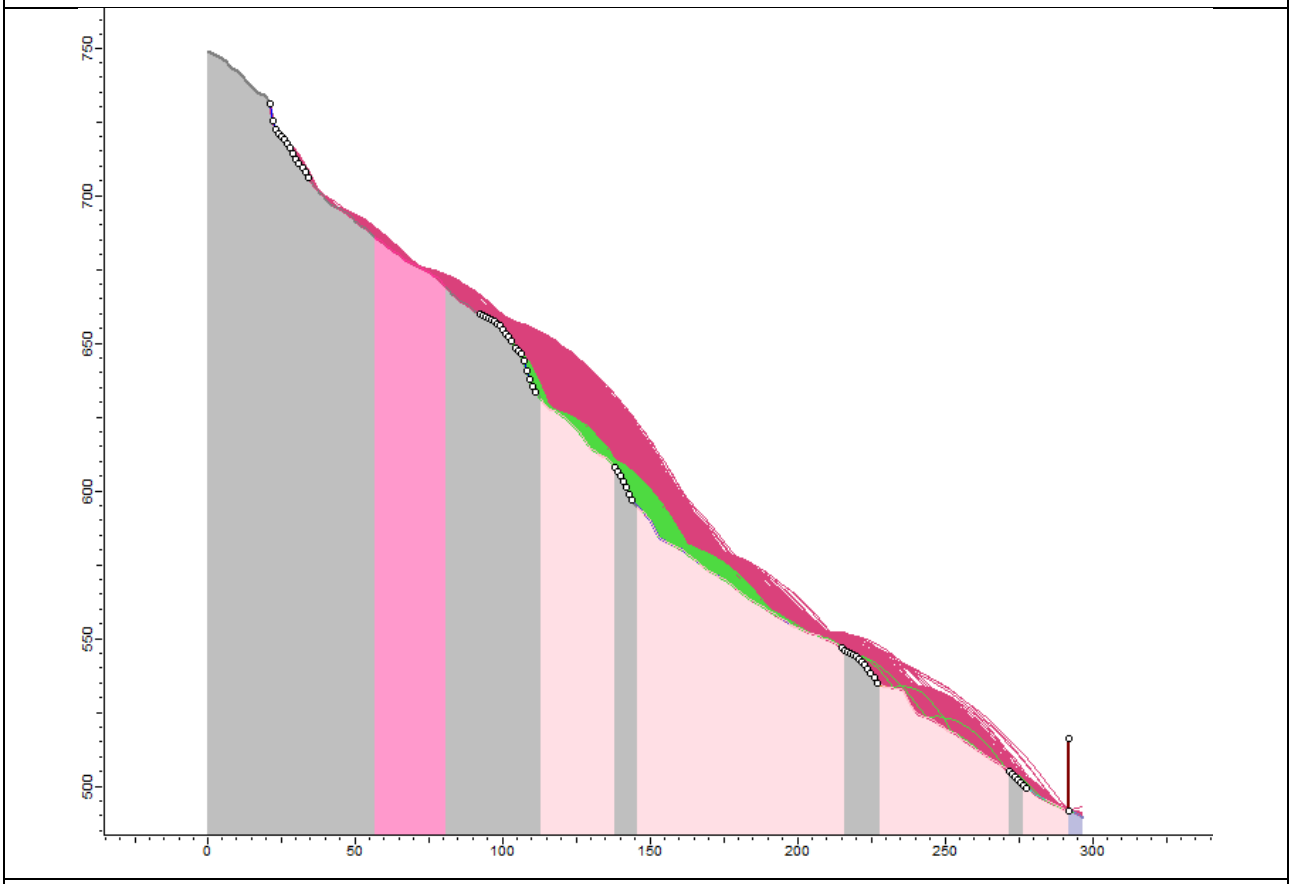
Si riportano nel seguito i risultati relativi alla loc. Bedeugaz. In tale borgata sono state individuate due sezioni rappresentative per le quali si registra l'arrivo di blocchi in prossimità dell'abitato nelle analisi di propagazione effettuate.

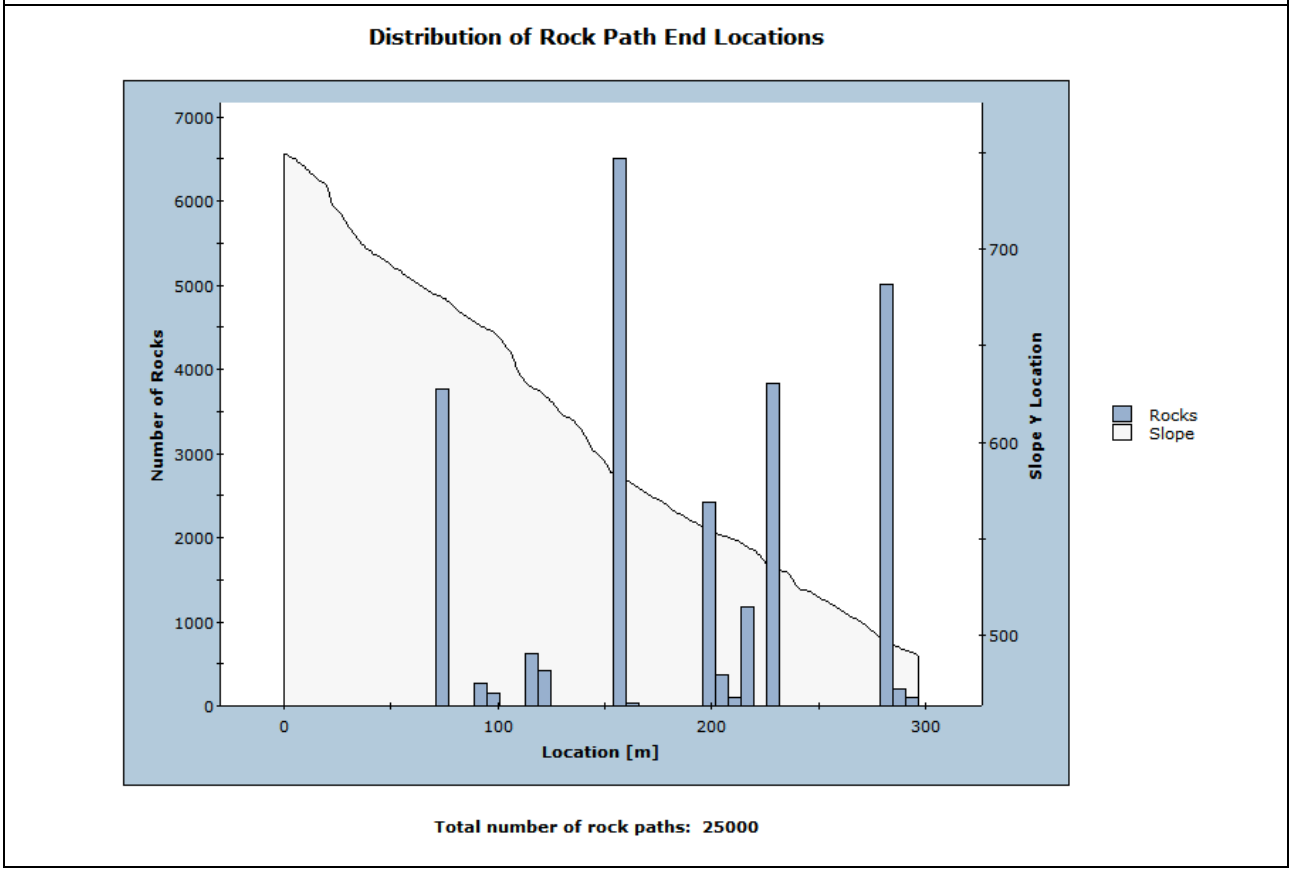


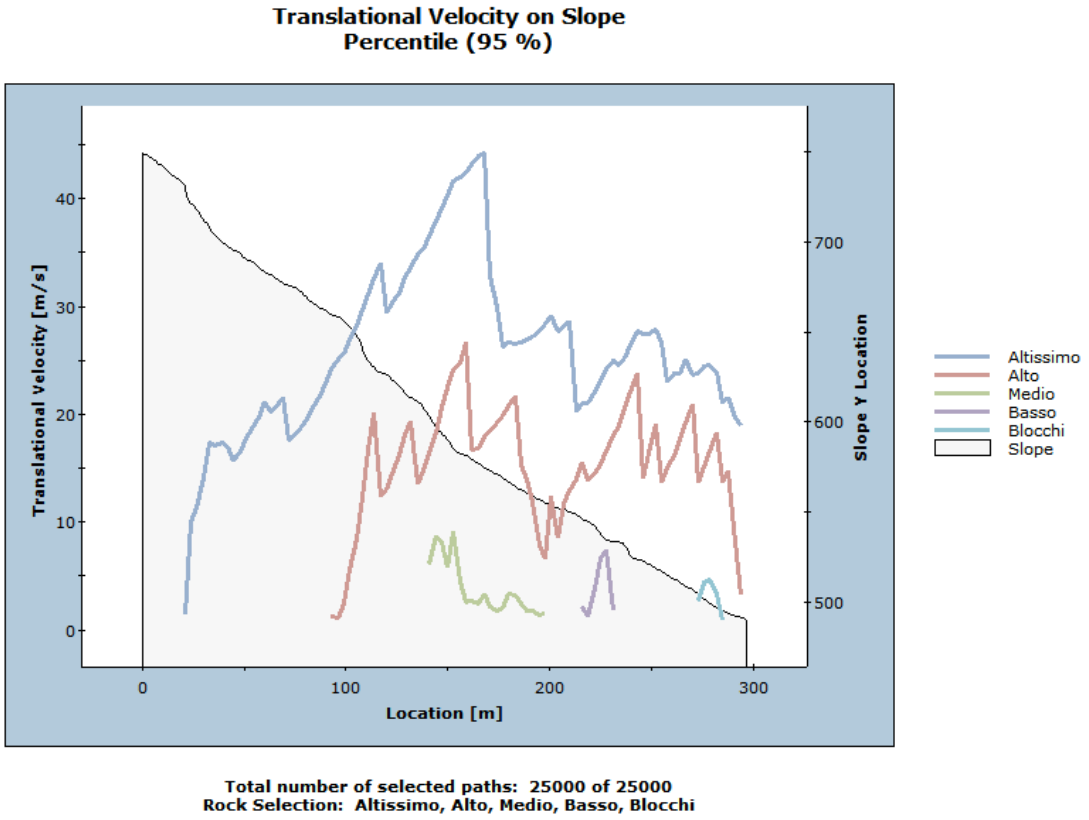

N
Metri
0 10 20 40 60 80

7.4.5.1 Sezione 1

5 linee di distacco (25000 lanci)







Collettore borgo:

- **<u>Sorgente Altissima</u>:**

Numero blocchi: 79 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Altissima»: 1,58 % e da tutte le sorgenti: 0,31 %)

Volume sorgente: 15,5 m^3

Velocità (95%): 20,08 m/s

Altezza (95%): 0,53 m

- **<u>Sorgente Alta</u>:**

Numero blocchi: 1 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Alta»: 0,02 % e da tutte le sorgenti: 0,004 %)

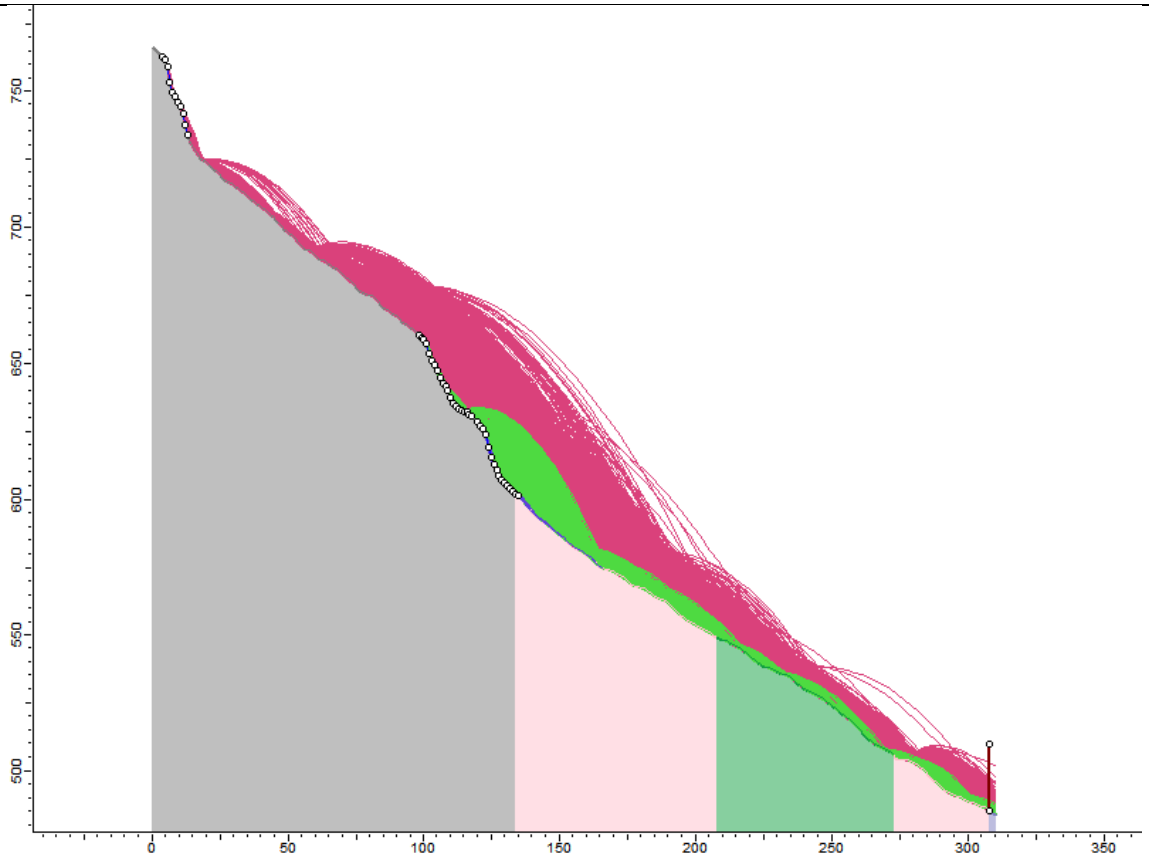
Volume sorgente: 15,5 m^3

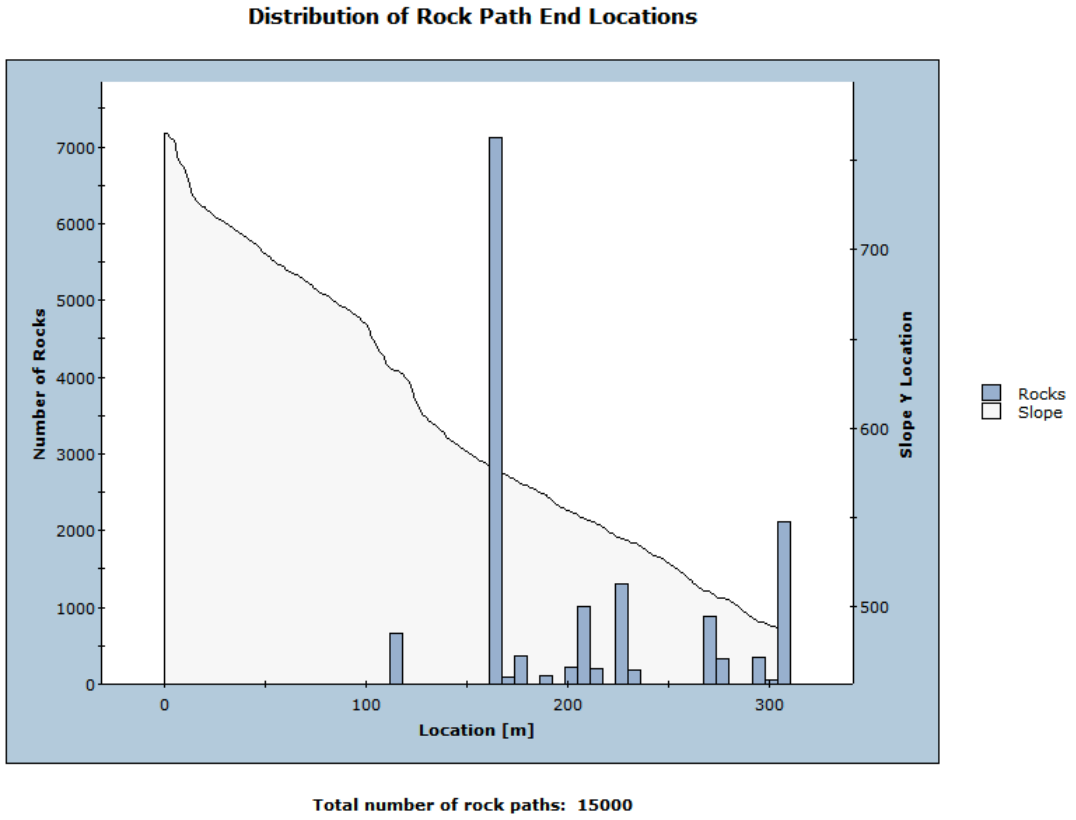
Velocità (95%): 1,69 m/s

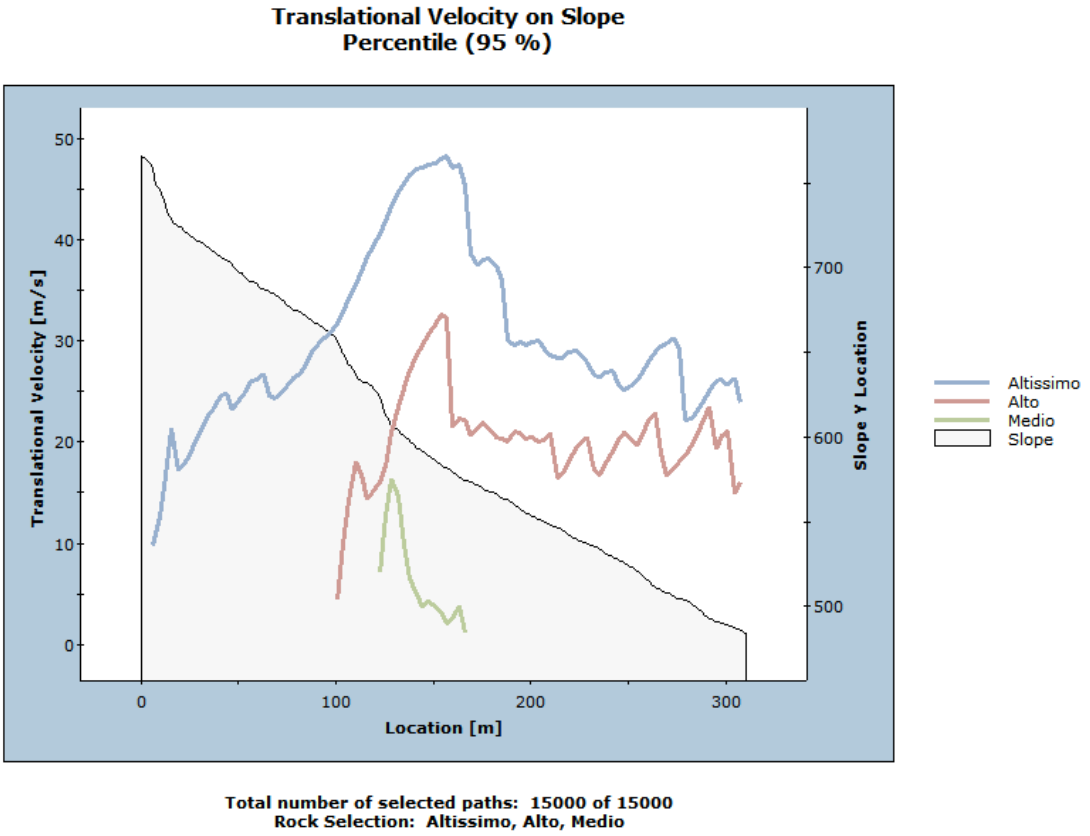
Altezza (95%): 0,10 m

7.4.5.2 Sezione 2

3 linee di distacco (15000 lanci)







Collettore borgo:

- **<u>Sorgente Altissima</u>:**

Numero blocchi: 1825 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Altissima»: 24,60 % e da tutte le sorgenti: 12,17 %)

Volume sorgente: 15,5 m^3

Velocità (95%): 24,84 m/s

Altezza (95%): 4,93 m

- **<u>Sorgente Alta</u>:**

Numero blocchi: 75 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Alta»: 1,50 % e da tutte le sorgenti: 0,5 %)

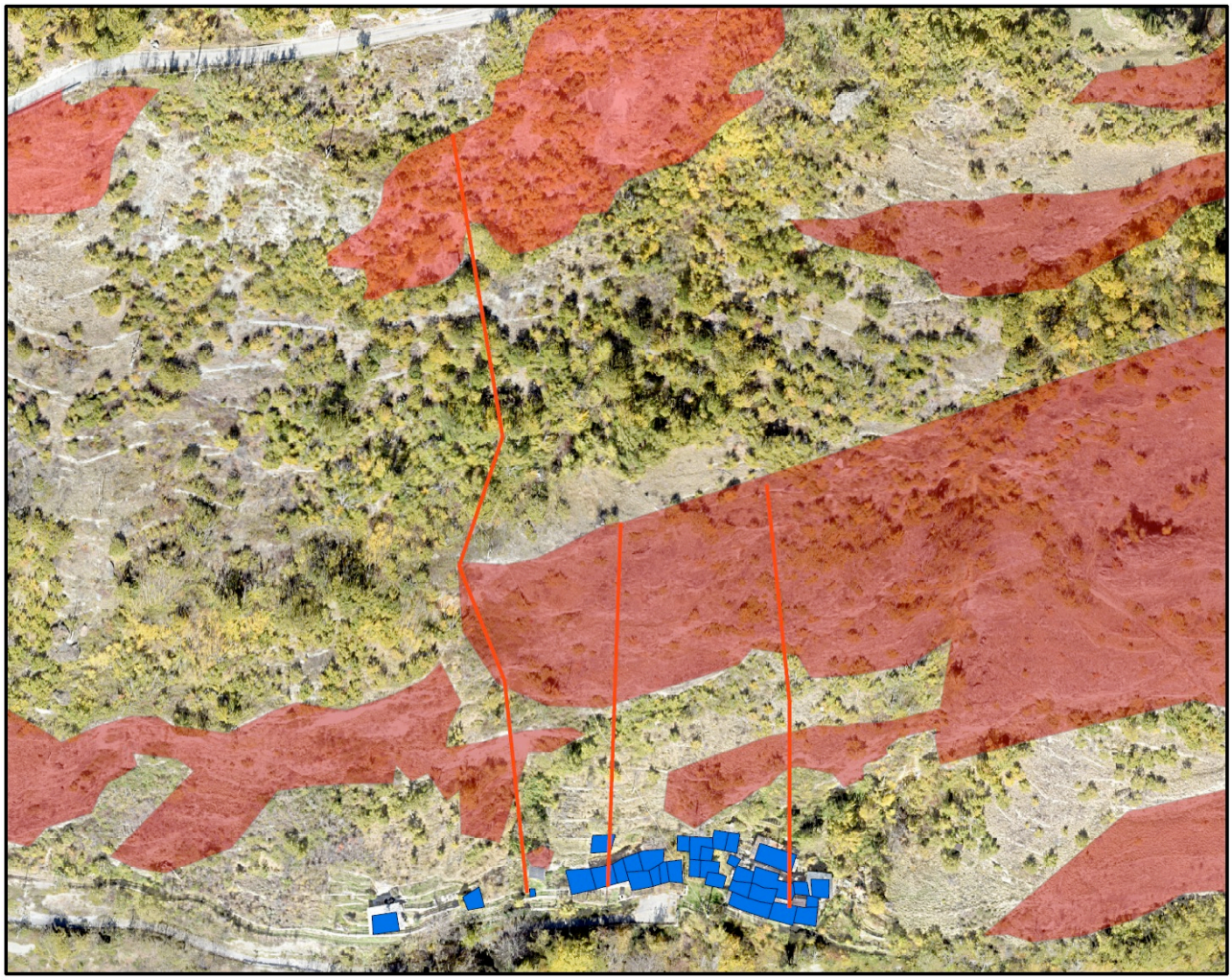
Volume sorgente: 15,5 m^3

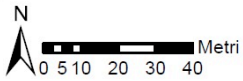
Velocità (95%): 16,80 m/s

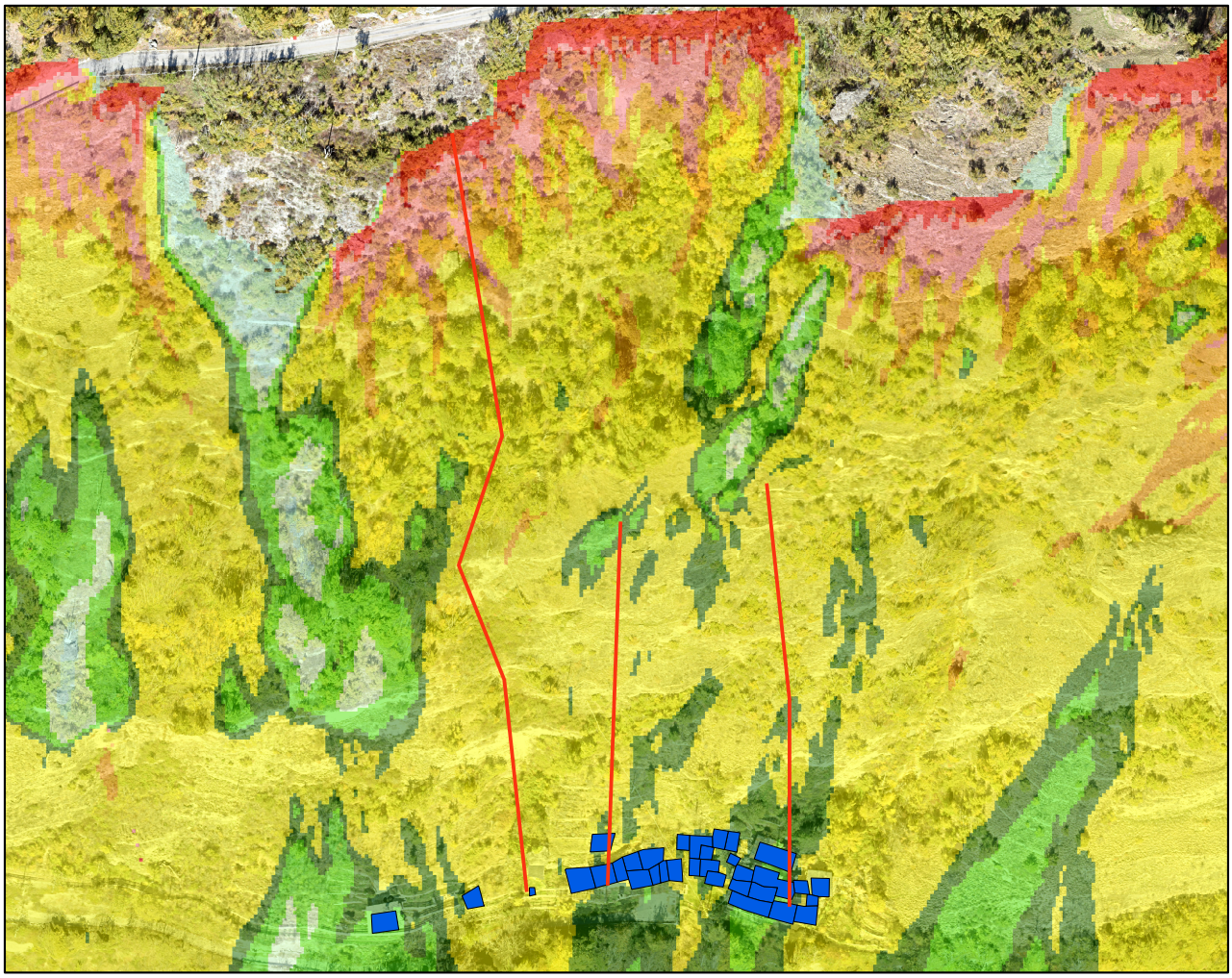
Altezza (95%): 2,78 m

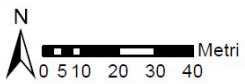
7.4.6 Località Fary

Si riportano nel seguito i risultati relativi alla loc. Fary. In tale borgata sono state individuate tre sezioni rappresentative per le quali si registra l'arrivo di blocchi in prossimità dell'abitato nelle analisi di propagazione effettuate.



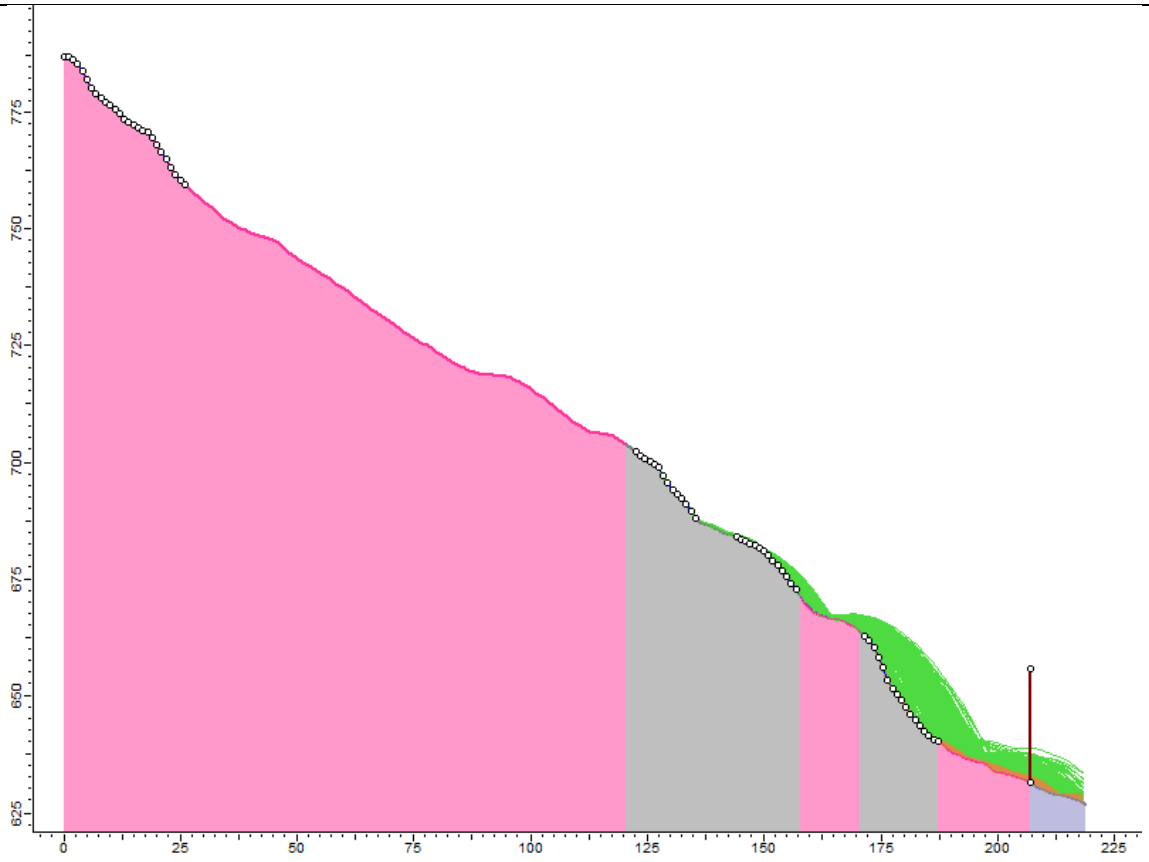


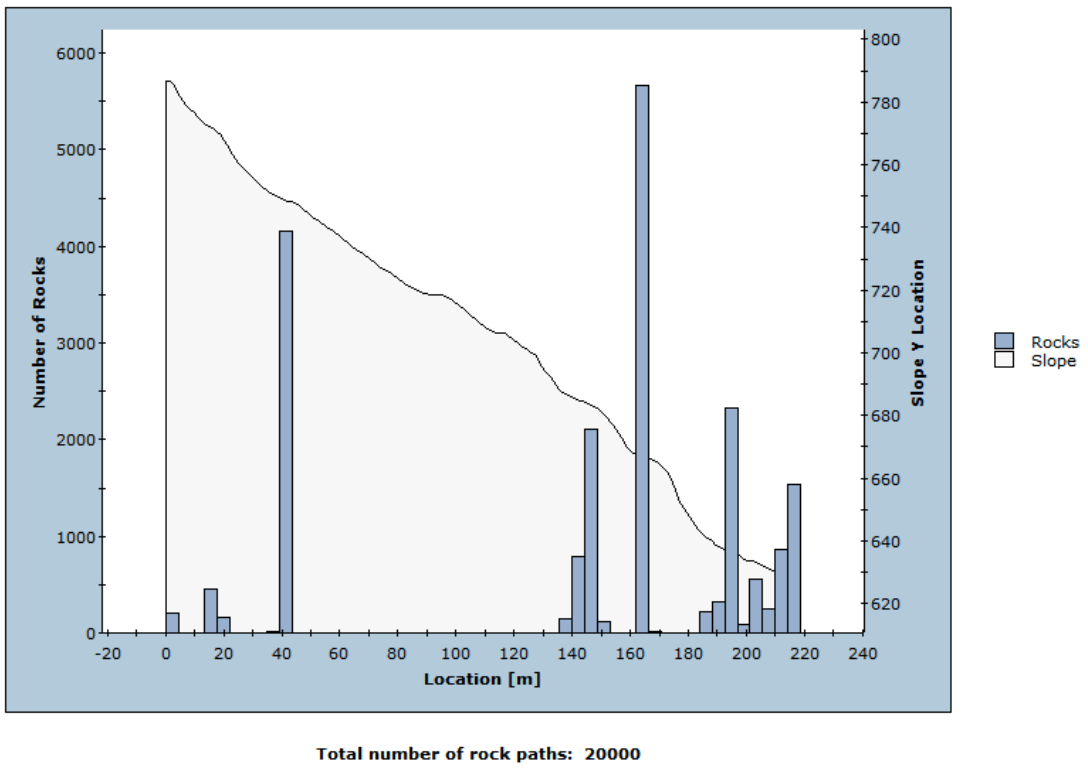


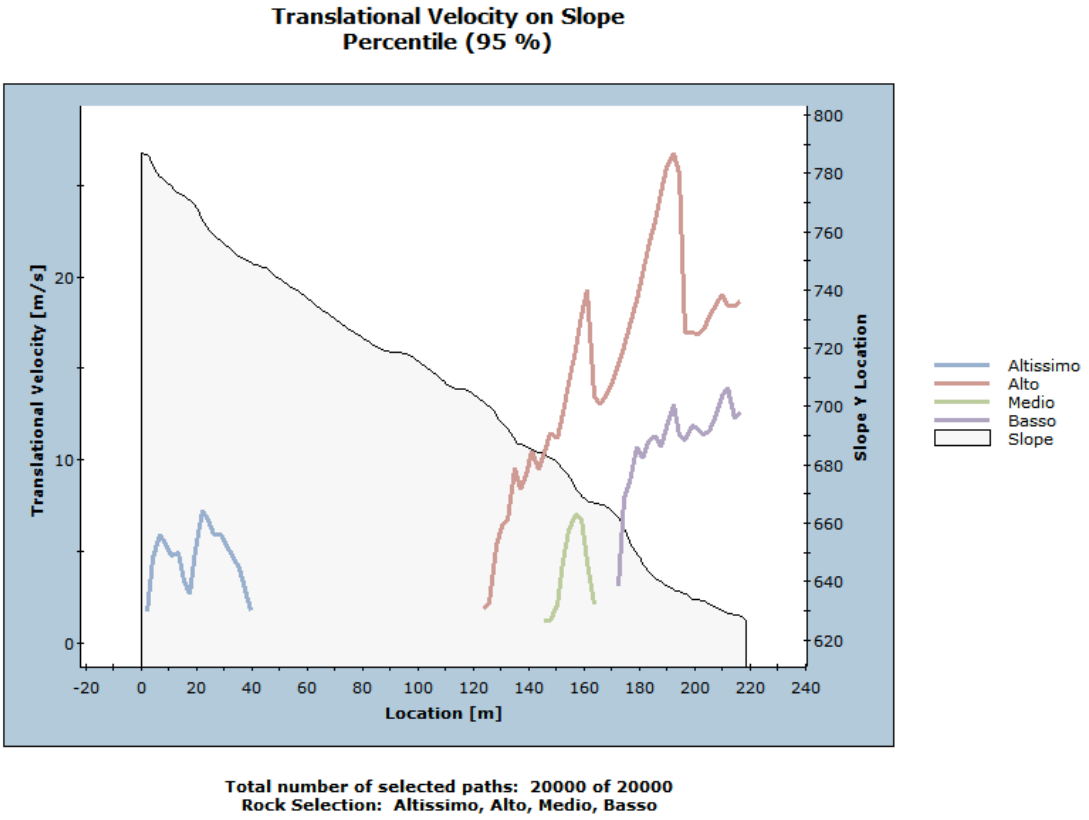

N
Metri
0 5 10 20 30 40

7.4.6.1 Sezione 1

4 linee di distacco (20000 lanci)







Collettore borgo:

- **<u>Sorgente Alta</u>:**

Numero blocchi: 1090 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Alta»: 21,8 % e da tutte le sorgenti: 5,45 %)

Volume sorgente: 15,5 m^3

Velocità (95%): 18,50 m/s

Altezza (95%): 3,81 m

- **<u>Sorgente Bassa</u>:**

Numero blocchi: 453 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Bassa»: 9,06 % e da tutte le sorgenti: 2,57 %)

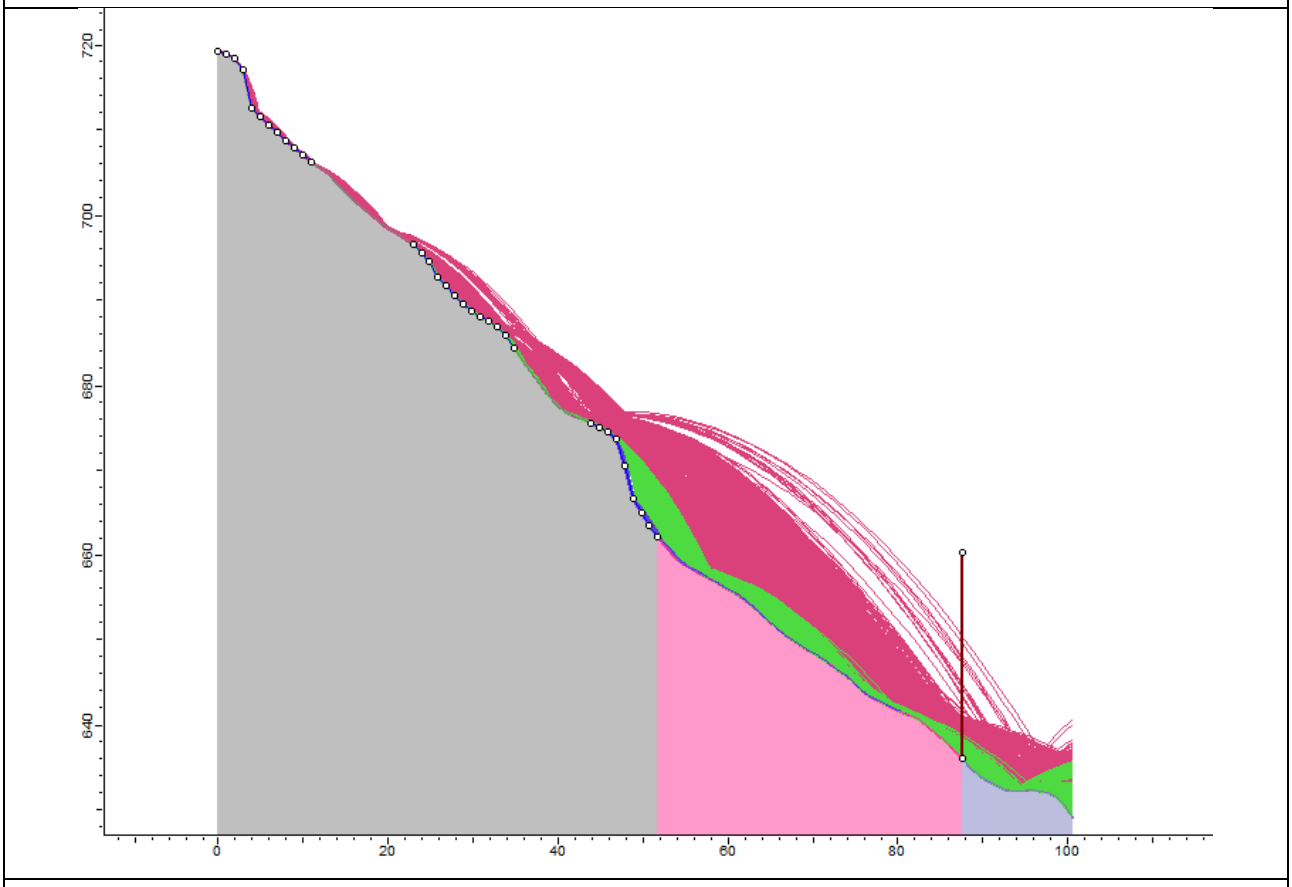
Volume sorgente: 15,5 m^3

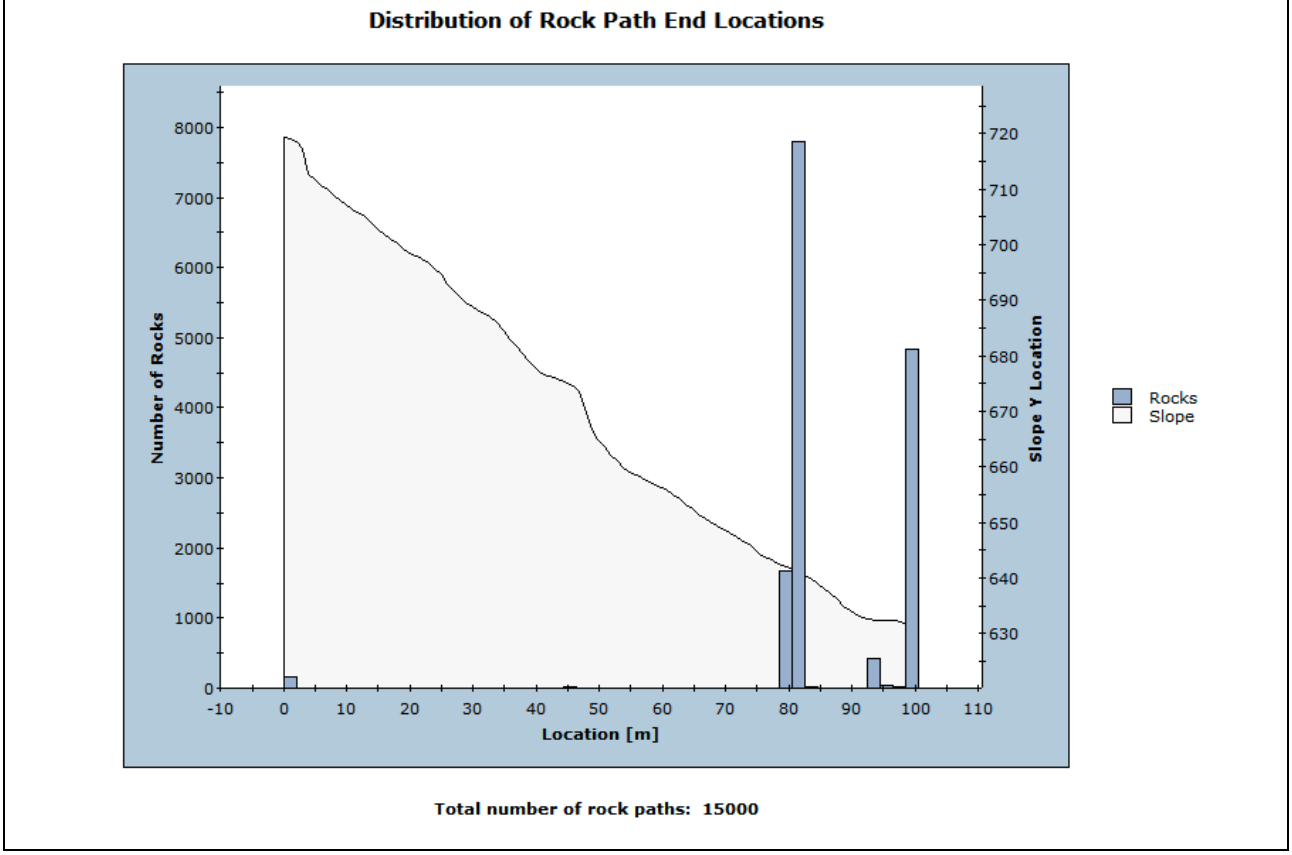
Velocità (95%): 12,80 m/s

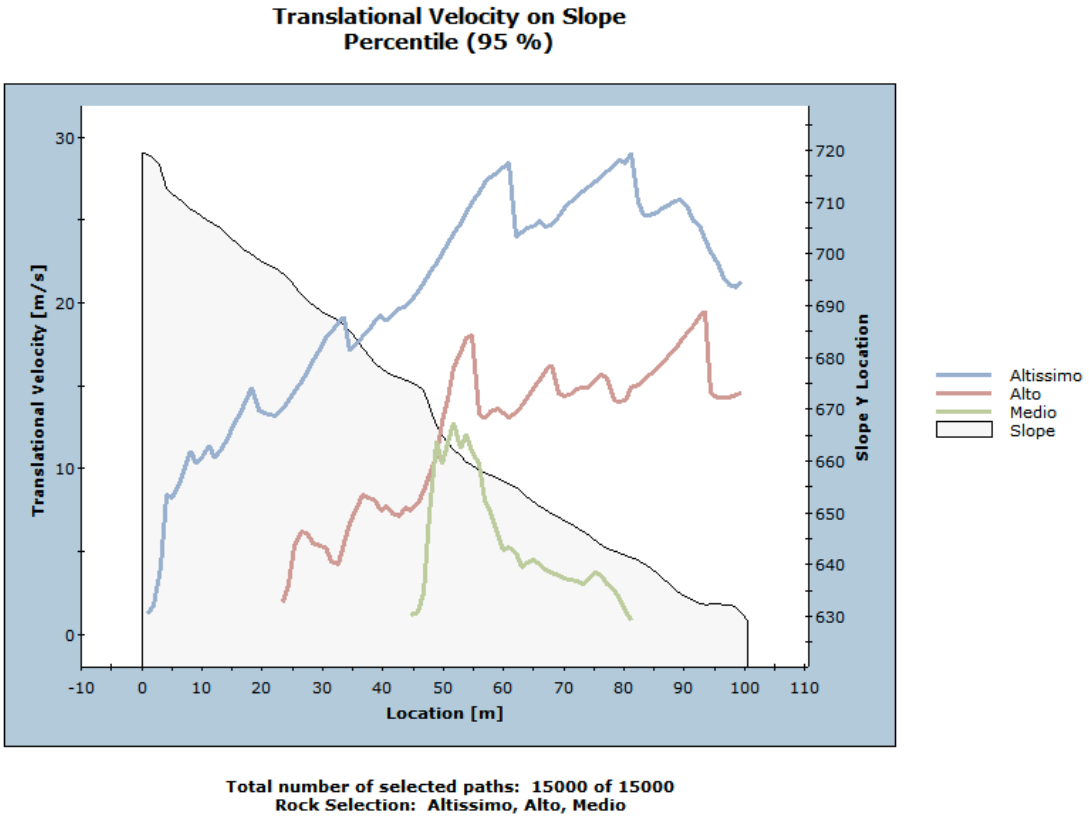
Altezza (95%): 0,91 m

7.4.6.2 Sezione 2

3 linee di distacco (15000 lanci)







Collettore borgo:

- **<u>Sorgente Altissima</u>:**

Numero blocchi: 4082 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Altissima»: 81,64 % e da tutte le sorgenti: 27,21 %)

Volume sorgente: 15,5 m^3

Velocità (95%): 27,00 m/s

Altezza (95%): 3,37 m

- **<u>Sorgente Alta</u>:**

Numero blocchi: 705 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Alta»: 14,10 % e da tutte le sorgenti: 4,70 %)

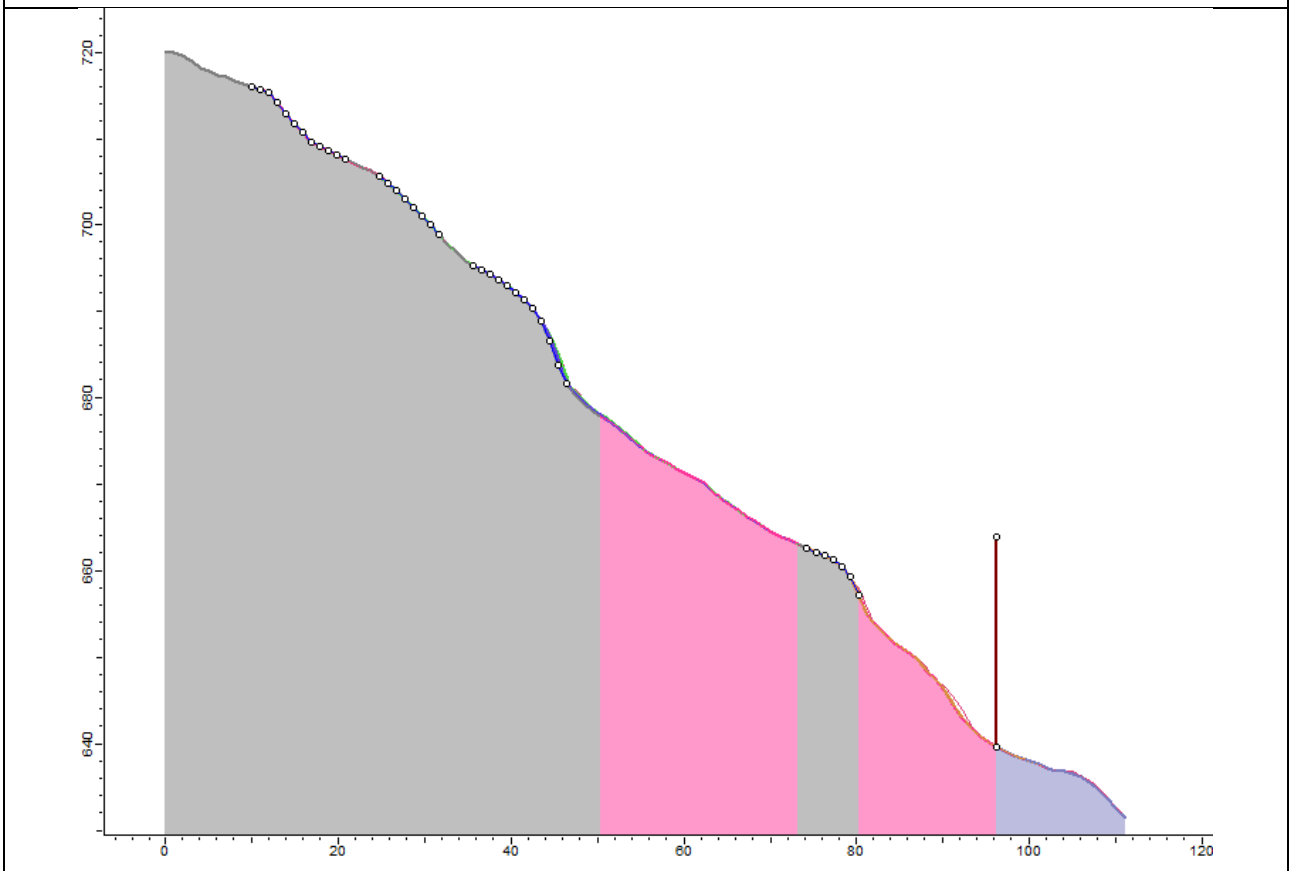
Volume sorgente: 15,5 m^3

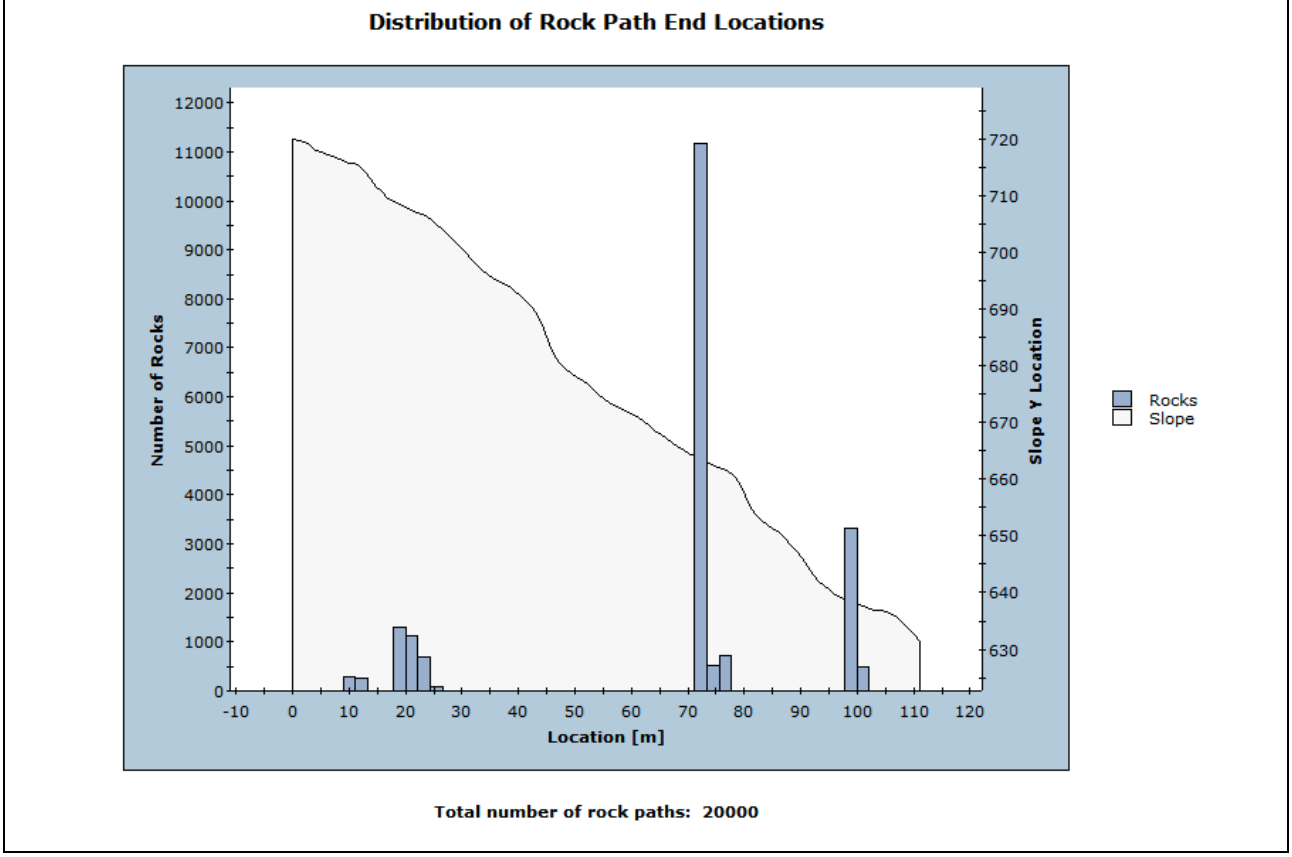
Velocità (95%): 17,21 m/s

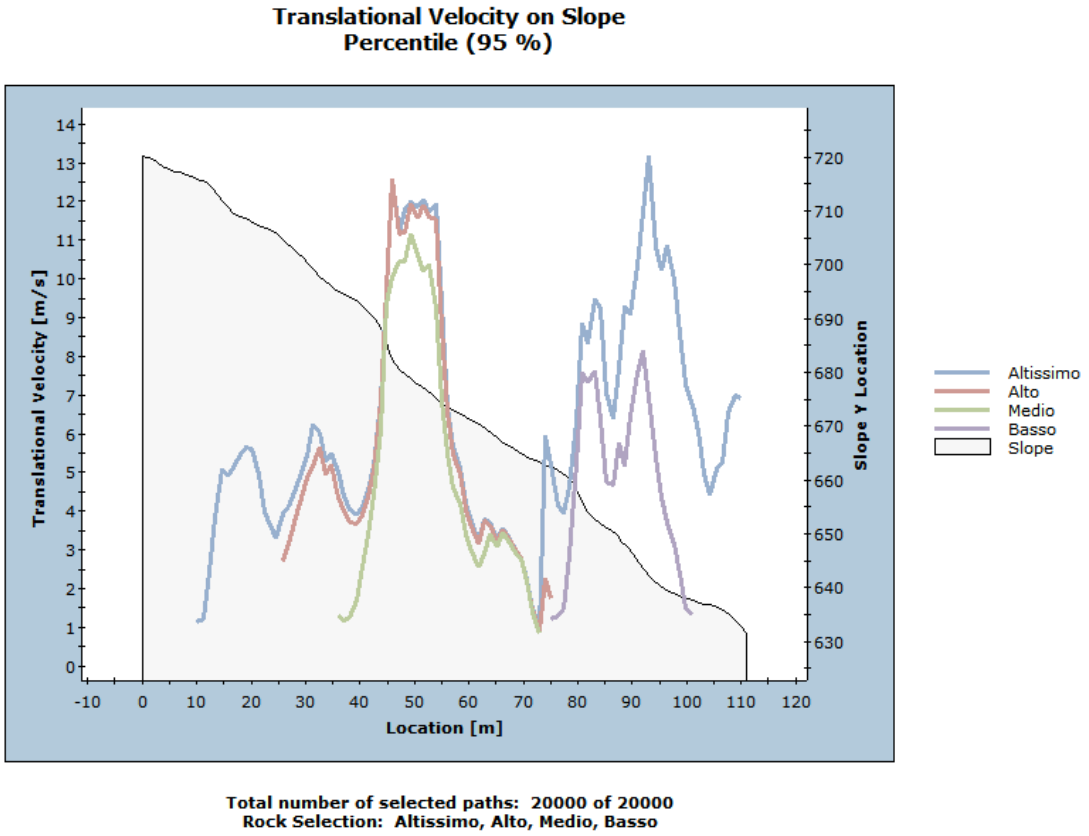
Altezza (95%): 1,82 m

7.4.6.3 Sezione 3

4 linee di distacco (20000 lanci)







Collettore borgo:

- **<u>Sorgente Altissima</u>:**

Numero blocchi: 1 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Altissima»: 0,02 % e da tutte le sorgenti: 0,005 %)

Volume sorgente: 15,5 m^3

Velocità (95%): 10,65 m/s

Altezza (95%): 0,04 m

- **<u>Sorgente Bassa</u>:**

Numero blocchi: 3764 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Bassa»: 75,28 % e da tutte le sorgenti: 18,82 %)

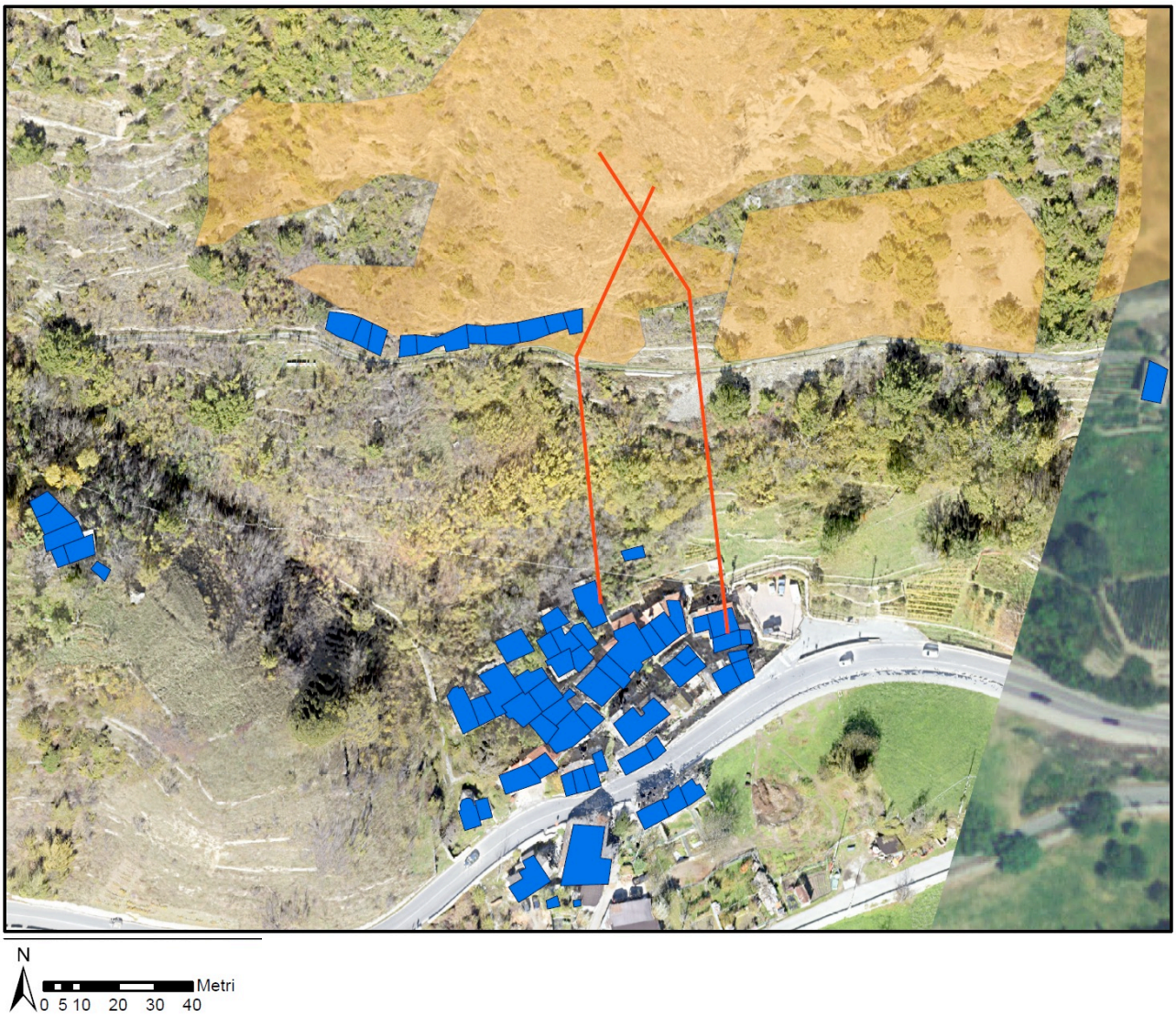
Volume sorgente: 15,5 m^3

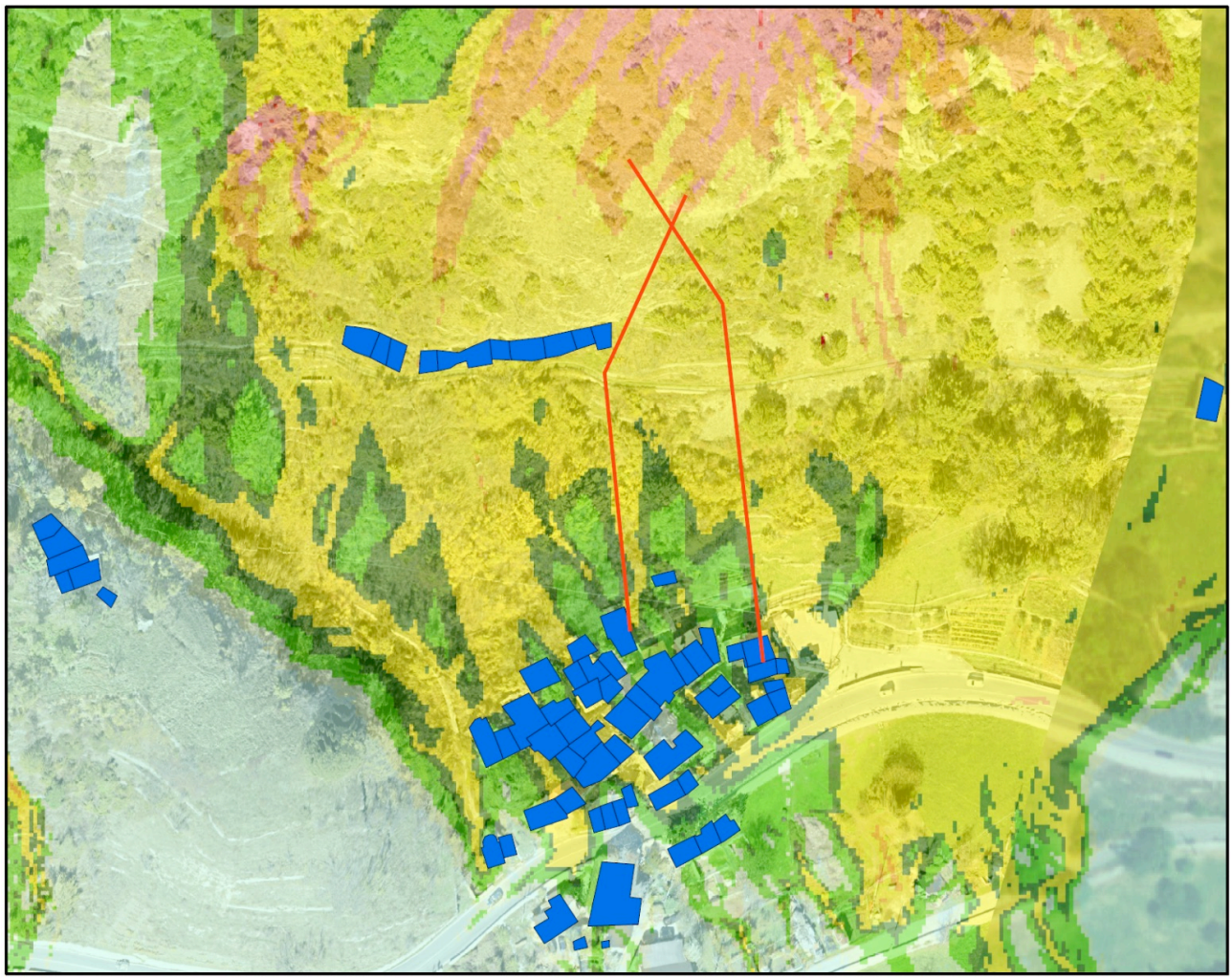
Velocità (95%): 4,20 m/s

Altezza (95%): 0,10 m

7.4.7 Località Gros-Breil

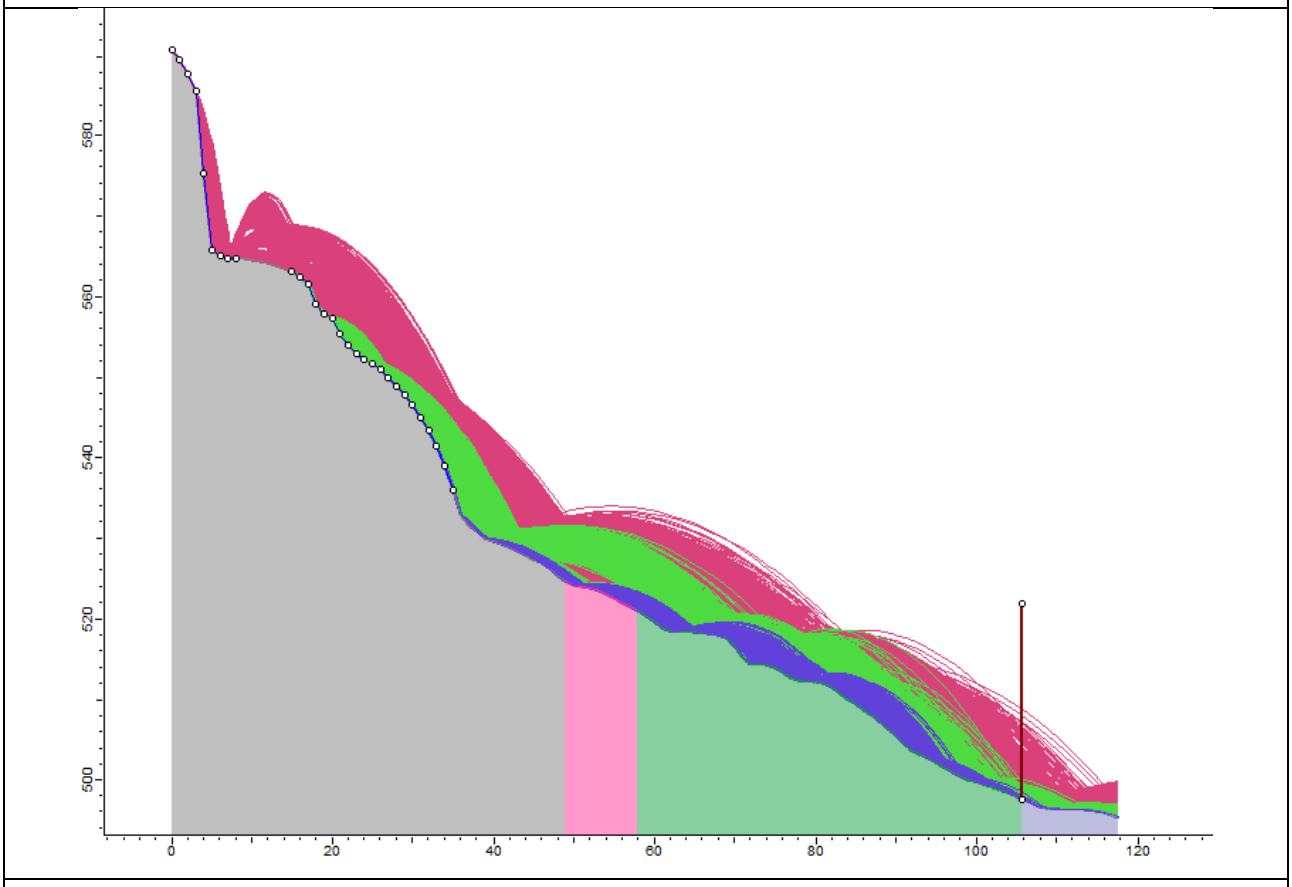
Si riportano nel seguito i risultati relativi alla loc. Gros-Breil. In tale borgata sono state individuate due sezioni rappresentative per le quali si registra l'arrivo di blocchi in prossimità dell'abitato nelle analisi di propagazione effettuate.

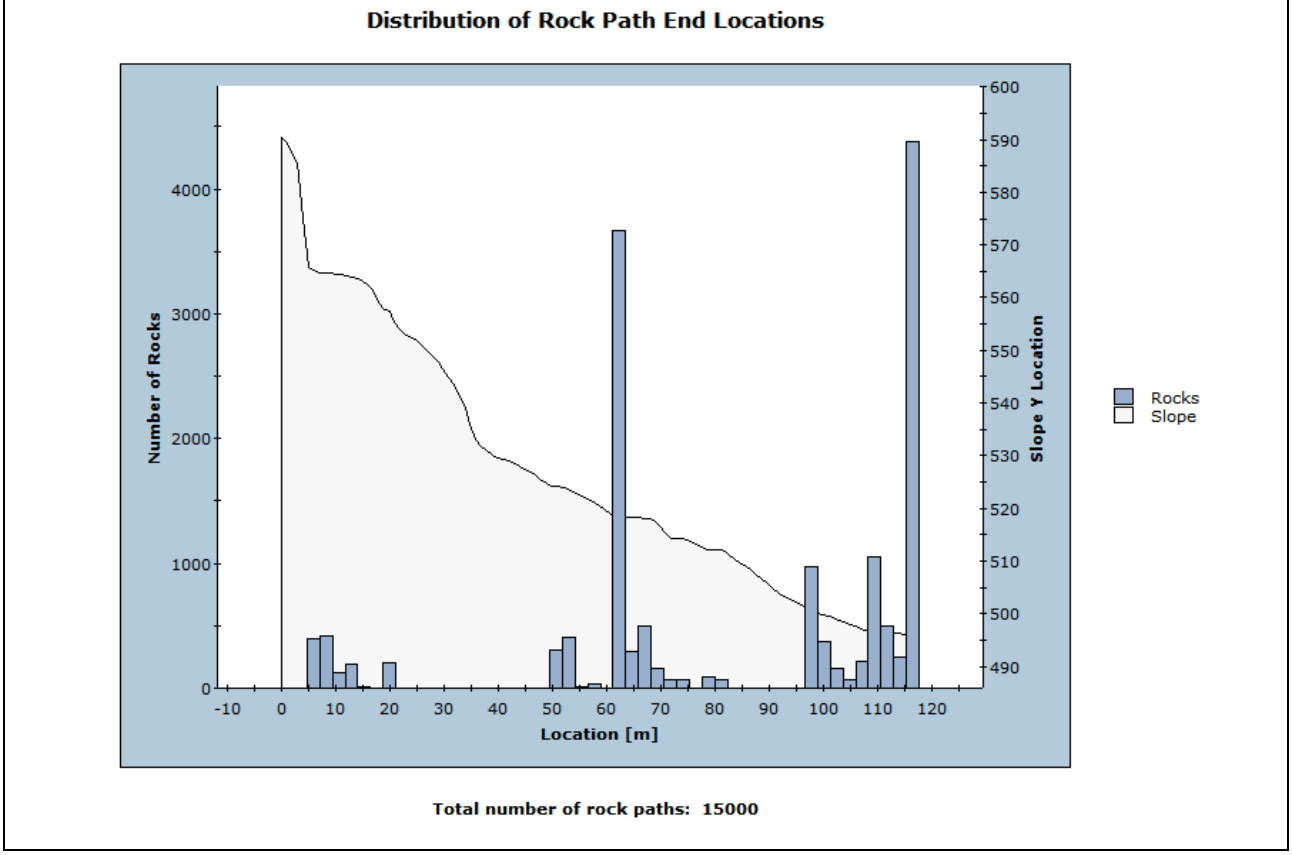


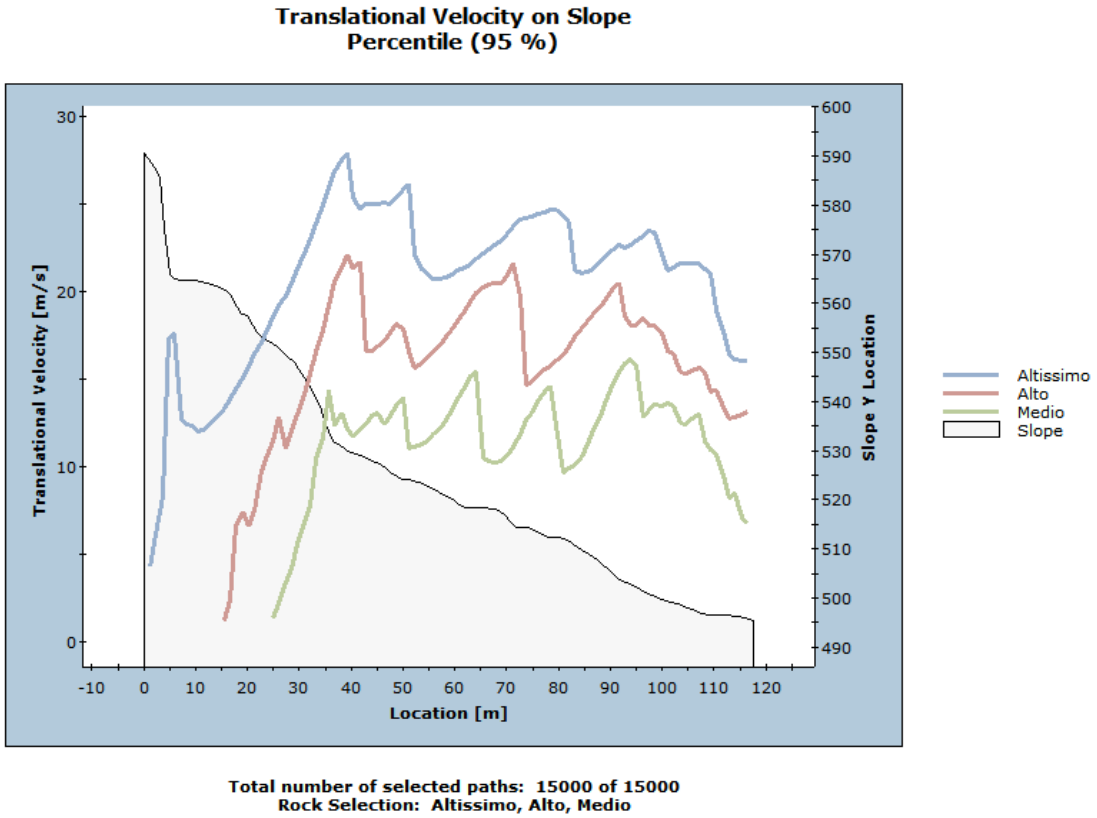

N
Metri
0 5 10 20 30 40

7.4.7.1 Sezione 1

3 linee di distacco (15000 lanci)







Collettore borgo:

- **<u>Sorgente Altissima</u>:**

Numero blocchi: 2998 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Altissima»: 59,96 % e da tutte le sorgenti: 19,99 %)

Volume sorgente: 6,5 m^3

Velocità (95%): 22,10 m/s

Altezza (95%): 4,31 m

- **<u>Sorgente Alta</u>:**

Numero blocchi: 1348 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Alta»: 26,96 % e da tutte le sorgenti: 8,99 %)

Volume sorgente: 6,5 m^3

Velocità (95%): 16,00 m/s

Altezza (95%): 1,29 m

- **<u>Sorgente Media</u>:**

Numero blocchi: 106 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Media»: 2,12 % e da tutte le sorgenti: 0,71 %)

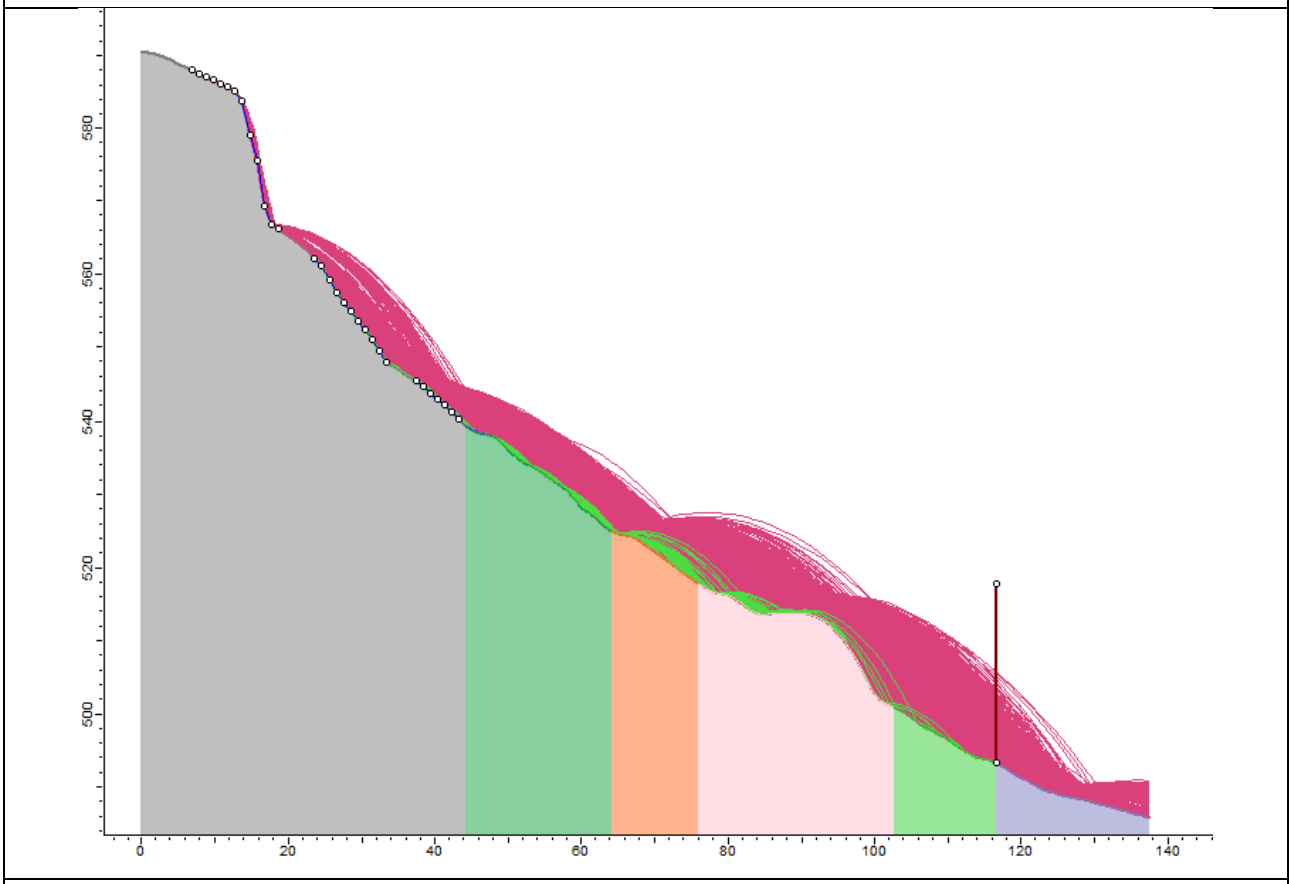
Volume sorgente: 6,5 m^3

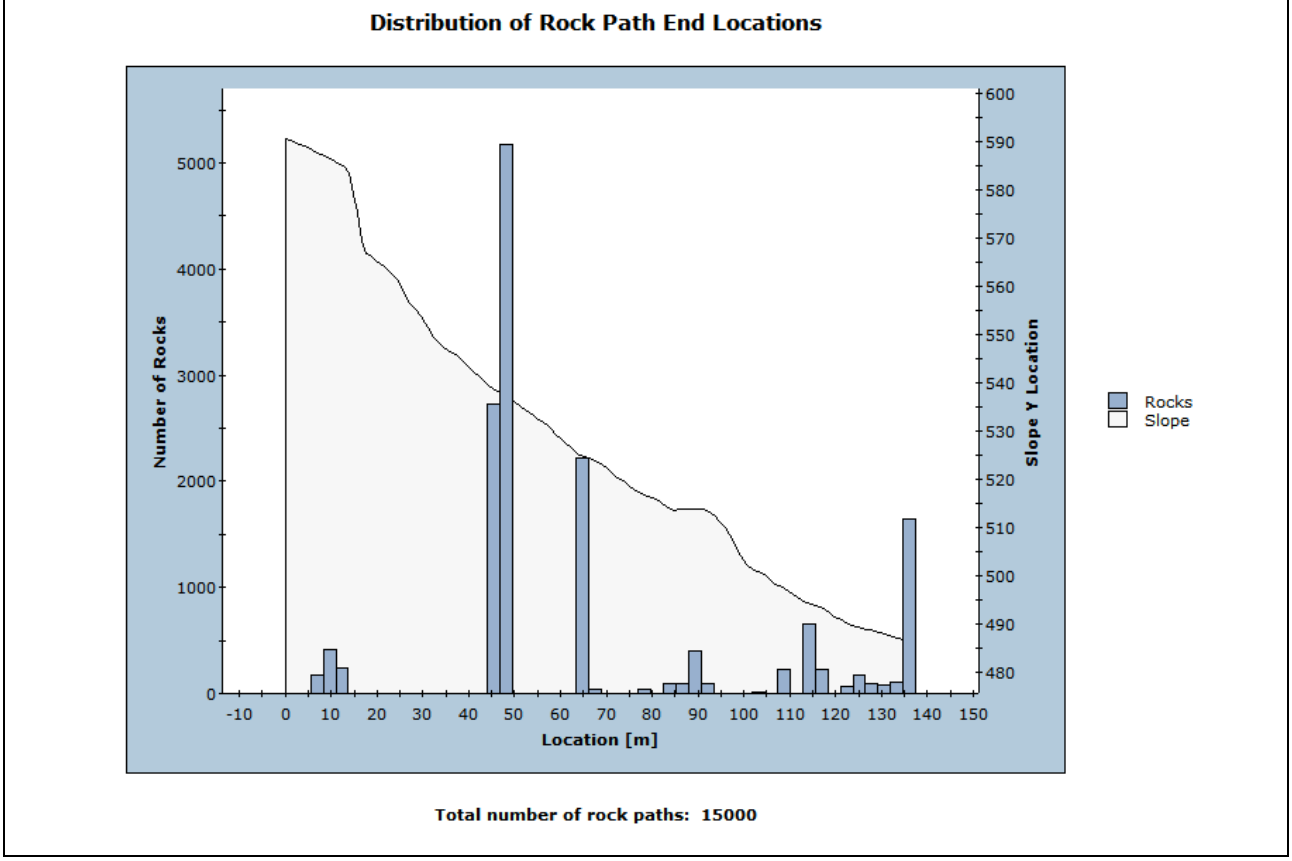
Velocità (95%): 13,06 m/s

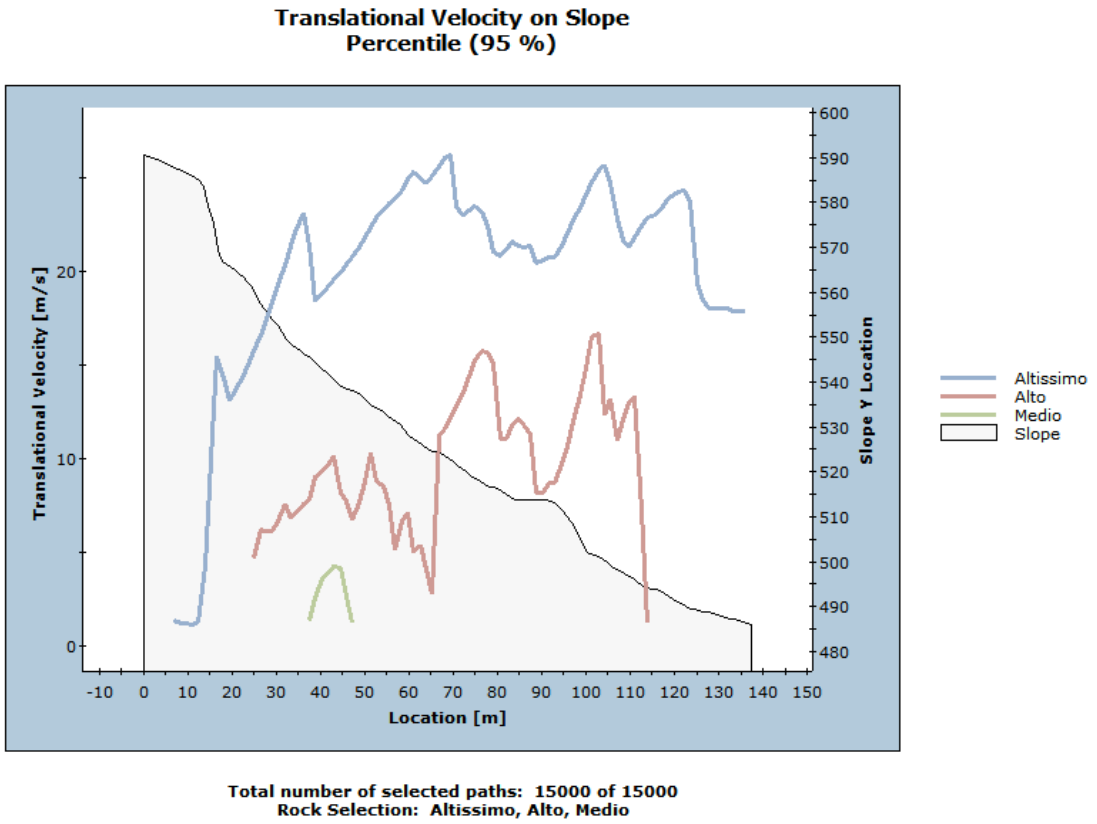
Altezza (95%): 0,55 m

7.4.7.2 Sezione 2

3 linee di distacco (15000 lanci)







Collettore borgo:

- **<u>Sorgente Altissima</u>:**

Numero blocchi: 2167 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Altissima»: 43,34 % e da tutte le sorgenti: 14,45 %)

Volume sorgente: 6,5 m^3

Velocità (95%): 23,39 m/s

Altezza (95%): 6,12 m

- **<u>Sorgente Alta</u>:**

Numero blocchi: 1 (probabilità di raggiungimento per blocchi provenienti dalla sola sorgente «Alta»: 0,02 % e da tutte le sorgenti: 0,006 %)

Volume sorgente: 6,5 m^3

Velocità (95%): 3,62 m/s

Altezza (95%): 0,19 m

8 CONCLUSIONI

Il presente lavoro è finalizzato alla codifica di metodologie organiche per lo studio di pericolosità e di rischio per fenomeno di caduta massi su un'area comprendente porzioni di versanti anche insistenti su più comuni su cui sono presenti differenti tipologie di elementi potenzialmente a rischio. Su aree così estese, data la presenza di potenziali sorgenti di crollo differenti per tipologia di roccia, volumetria e propensione al distacco, unitamente alla diversa natura degli elementi a rischio occorre infatti strutturare le analisi di pericolosità e rischio in modo da produrre risultati quantitativi quanto più omogenei e confrontabili.

In merito allo studio della pericolosità, operando ad una "media scala", riveste particolare importanza l'analisi di propagazione del fenomeno in termini di probabilità di occorrenza spaziale. Pertanto si è ritenuto opportuno adottare un modello di calcolo ibrido tridimensionale utilizzando come volumetria di distacco un valore cautelativo che permette di identificare la gran maggioranza delle possibili traiettorie di crollo. Le analisi permettono di individuare gli elementi potenzialmente a rischio, che sono stati a loro volta suddivisi sulla base della loro esposizione: elementi con esposizione non unitaria (mobili) ed elementi con esposizione unitaria (statici).
I primi racchiudono le infrastrutture di transito e il rischio su questi è valutato per mezzo di un approccio basato sugli alberi degli eventi (diagrammi ad albero). Il rischio, quantificato come la probabilità annua di incidente con almeno una vittima, è valutato per differenti livelli di traffico. Le borgate sono considerate quali elementi statici, per le quali sono effettuate analisi traiettografiche bidimensionali mirate a quantificare i parametri cinematici di eventuali blocchi, anche in funzione del volume.

Le metodologie sviluppate sono state poi applicate ad uno specifico caso studio situato nei comuni di Chambave, Saint-Denis e Châtillon la cui estensione è di circa 180 ettari.
Le potenziali sorgenti di crollo sono state individuate a partire dagli studi topografici condotti da IMAGEO e da uno studio dell'area e dalle osservazioni in sito realizzate nel corso di numerosi sopralluoghi. Data l'estensione dell'area, la presenza di una vegetazione assai consistente e l'acclività del versante, non si esclude che puntuali sorgenti crollo non siano state individuate. Queste tuttavia possono essere ricondotte a piccole e limitate porzioni di pareti aggettanti, perlopiù insistenti sulla rete sentieristica, per le quali la traiettoria di crollo è facilmente individuabile comportando velocità limitate.

I risultati e le elaborazioni fornite premettono quindi di fornire un quadro sufficiente omogeneo e una quantificazione delle criticità dovute al fenomeno di caduta massi che sussistono sull'area in esame, configurandosi come un prodotto di ausilio alla Pubblica Amministrazione nell'ottica di gestione del rischio.

9 BIBLIOGRAFIA

Ansari M.K., Ahmad M., Singh T.N. (2014) Rockfall risk assessment for pilgrims along the circumambulatory pathway, Saptashrungi Gad Temple, Vani, Nashik Maharashtra, India. Geomatics, Natural Hazards and Risk 5(1): 81-92.

Bunce C.M., Cruden D.M., Morgenstern N.R. (1997) Assessment of the hazard from rock fall on a highway. Canadian Geotechnical Journal 34: 344-356.

Corominas J., Copons R., Moya J., Vilaplana J.M., Altimir J., Amigò J. (2005) Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. Landslides 2: 343-357.

Corominas J., Moya J. (2008) A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. Engineering Geology 102(3-4): 193-213.

Corominas J., van Westen C., Frattini P., Cascini L., Malet J. P., Fotopoulou S., Pitilakis K. (2014) Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 73(2): 209-263.

De Biagi V. (2017) Brief communication: Accuracy of the fallen blocks volume-frequency law. Natural Hazards and Earth System Sciences 17: 1487-1492.

De Biagi V., Napoli M.L., Barbero M, Peila D. (2017) Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size. Natural Hazards and Earth System Sciences 17: 103-113.

Dorren L.K.A. (2015) Rockyfor3D (v5.2) Revealed - Transparent description of the complete 3D rockfall model. EcorisQ paper (www.ecorisq.org): 32 pp.

Fell R. (1994) Landslide risk assessment and acceptable risk. Canadian Geotechnical Journal 31(2): 261-272.

Ferlisi S., Cascini L., Corominas J., Matano F. (2012) Rockfall risk assessment to persons travelling in vehicles along a road: the case study of the Amalfi coastal road (Southern Italy). Natural Hazards 62: 691-721.

Ferrari F., Giacomini A., Thoeni K. (2016) Qualitative rockfall hazard assessment: a comprehensive review of current practices. Rock Mechanics and Rock Engineering 49: 2865-2922.

Guzzetti F., Reichenbach P., Ghigi S. (2004) Rockfall Hazard and Risk Assessment along a Transportation Corridor in the Nera Valley, Central Italy. Environmental Management 34: 191–208.

Macciotta R., Martin C.D., Morgenstern N.R., Cruden D.M. (2016). Quantitative risk assessment of slope hazards along a section of railway in the Canadian Cordillera—a methodology considering the uncertainty in the results. Landslides 13: 115-127.

Macciotta R., Martin C. D., Cruden D.M., Hendry M., Edwards T. (2017). Rock fall hazard control along a section of railway based on quantified risk. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards 11: 272-284.

Marchelli M., De Biagi V., Peila D. (2020) An event-tree based approach for the quantitative risk assessment for pedestrian along hiking trails subjected to rockfall. Interpraevent2020, 11-14 maggio, Bergen (NO).

Mignelli C., Lo Russo S., Peila D. (2012) ROckfall risk MAnagement assessment: the RO. MA. Approach. Natural Hazards 62: 1109-1123.

Mineo S., Pappalardo G., D'Urso A., Calcaterra D. (2017) Event tree analysis for rockfall risk assessment along a strategic mountainous transportation route. Environmental Earth Sciences 76: 620.

Peila D. and Guardini C. (2008) Use of the event tree to assess the risk reduction obtained from rockfall protection devices. Natural Hazards and Earth System Sciences 8: 1441-1450.

Pine R.J., Roberds W.J. (2005) A Risk-based Approach for the Design of Rock Slopes Subject to Multiple Failure Modes Illustrated by a Case Study in Hong Kong. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 42: 261–275.

UNI 11211-4:2018 Opere di difesa dalla caduta massi - Parte 4: Progetto definitivo ed esecutivo (in vigore dal 18/10/2018).

Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Jaboyedoff M. (2011) Rockfall characterisation and structural protection - A review. Natural Hazards and Earth System Sciences 11:2617-2651.

10 ALLEGATI

Allegato 1. Elaborato grafico "Tavola 1 – Volumi di innesco" datato febbraio 2020.

Allegato 2. Elaborato grafico "Tavola 2 – Probabilità di occorrenza spaziale" datato febbraio 2020.

Allegato 3. Elaborato grafico "Tavola 3 – Elementi a rischio" datato febbraio 2020.

Allegato 4. Elaborato grafico "Tavola 4 – Probabilità di occorrenza spaziale su strade, piste e sentieri" datato febbraio 2020.

Allegato 5. Elaborato grafico "Tavole 5A,B – Rischio sulle strade" datato febbraio 2020.

Allegato 6. Elaborato grafico "Tavole 6A,B,C,D – Rischio sui sentieri" datato febbraio 2020.

Allegato 7. Elaborato grafico "Tavola 7 – Rischio sulle piste" datato febbraio 2020.

Allegato 8. Rischio per le maestranze impegnate nella manutenzione del ru Chandianaz.