



# **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali**

**Corso di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali**

**Valutazione dell'effetto protettivo del bosco sull'innescò e sull'intensità di frane superficiali a seguito della tempesta Vaia**

**Relatore:  
Prof. Emanuele Lingua**

**Correlatore:  
Dott. Lorenzo Faes**

**Laureando:  
Andrea Rizzi  
Matricola n. 2023507**

**Anno Accademico 2021/2022**





# **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali**

**Corso di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali**

**Valutazione dell'effetto protettivo del bosco sull'innesco e sull'intensità di frane superficiali a seguito della tempesta Vaia**

**Relatore:  
Prof. Emanuele Lingua**

**Correlatore:  
Dott. Lorenzo Faes**

**Laureando:  
Andrea Rizzi  
Matricola n. 2023507**

**Anno Accademico 2021/2022**





*Ad Enzo e Silvia,  
i miei genitori*

## Indice

1. Introduzione	Pag. 8
1.1. Le frane	Pag. 8
1.2. Funzione protettiva dei boschi nei confronti delle frane superficiali	Pag. 10
1.2.1. Rinforzo radicale	Pag. 11
1.2.2. Linee guida principali dei boschi di protezione da frane superficiali	Pag. 17
1.3. La tempesta Vaia	Pag. 20
1.4. Obiettivi	Pag. 23
2. Materiali e metodi	Pag. 24
2.1. Area di studio	Pag. 24
2.1.1. Inquadramento	Pag. 24
2.1.2. Vaia in Agordino	Pag. 26
2.2. Workflow	Pag. 29
2.3. Dati telerilevati utilizzati	Pag. 30
2.4. Mappatura e caratterizzazione delle frane	Pag. 31
2.4.1. Individuazione frane	Pag. 31
2.4.2. Calcolo dei parametri principali	Pag. 32
2.4.3. Profondità, area, volume	Pag. 33
2.4.4. Curvatura	Pag. 34
2.4.5. Definizione frane bosco/non bosco	Pag. 34
2.5. Frane in bosco	Pag. 35
2.6. Stima del rinforzo radicale	Pag. 36
2.6.1. Software FINT	Pag. 36
2.6.2. Modello SOSlope	Pag. 38
2.7. Rilievi frane di campo	Pag. 40
2.8. Analisi statistiche	Pag. 43
3. Risultati	Pag. 44
3.1. Frane totali	Pag. 44
3.1.1. Confronto tra bosco e non bosco	Pag. 54
3.2. Analisi delle frane innescate in bosco	Pag. 57
3.2.1. Categorie forestali	Pag. 57
3.2.2. Caratteristiche strutturali del popolamento	Pag. 59
3.2.3. Confronto con linee guida SFP	Pag. 63

3.3. Rinforzo radicale	Pag. 66
3.4. Rilievi in campo	Pag. 69
4. Discussioni	Pag. 72
5. Conclusioni	Pag. 77
6. Bibliografia	Pag. 79
Allegati 1- Scheda di campo	Pag. 88
Allegati 2- Schede riassuntive frane rilevate in campo	Pag. 90



## Riassunto

Le frane superficiali sono fenomeni che rientrano nei pericoli naturali gravitativi, possono arrecare danni ad infrastrutture e centri abitati o possono svolgere indirettamente un importante ruolo in termini di apporto dei sedimenti nel reticolo idrografico a scala di bacino. Il bosco può svolgere una funzione protettiva diretta, evitando l'innescò di questi fenomeni grazie al ruolo che ha sulla regimazione delle acque, oltre al più importante effetto dato dal rinforzo del suolo attraverso gli apparati radicali. Pochi studi però riportano valutazioni empiriche, basate su dataset reali di frane superficiali su ampia scala, degli effetti protettivi dati dalla presenza e dalla struttura del bosco su questi fenomeni.

Le intense precipitazioni caratterizzanti la prima fase della tempesta Vaia, che nell'ottobre 2018 ha severamente colpito il territorio dell'Agordino (nella provincia di Belluno), hanno causato notevoli danni, tra i quali l'innescò di numerose frane superficiali. Con il presente studio si vogliono innanzitutto individuare, realizzando un inventario, tali frane superficiali innescate durante Vaia al fine di valutarne le principali caratteristiche in termini geomorfologici e di intensità del fenomeno. In secondo luogo, si è cercato di valutare la possibile influenza data dalla presenza del bosco ed in particolare dalla sua struttura sulle condizioni di innescò, sulle caratteristiche e sull'intensità delle frane. È stato poi eseguito un confronto tra le caratteristiche strutturali dei popolamenti forestali, in cui si sono registrate le frane, ed i parametri di riferimento delle linee guida delle foreste di protezione. Infine, si è cercato di osservare come il rinforzo radicale possa avere influenza a scala locale sulla disposizione dell'innescò di frane superficiali e sull'intensità del fenomeno.

Nel complesso, sono state individuate 469 frane superficiali in un'area di 405.84 km<sup>2</sup>. Esse presentano valori mediani di area pari a 177 m<sup>2</sup>, volume di 163 m<sup>3</sup> e profondità medie di 0.96 m. Gli inneschi sono avvenuti soprattutto in terreni poco permeabili, con morfologie concave e pendenze con valore mediano di 34.69°, si considera inoltre interessante il fatto che le frane in bosco si presentino su pendenze maggiori rispetto a quelle fuori bosco. Dalle caratteristiche ottenute sui popolamenti forestali nei quali si sono innescate le frane in bosco, il valore mediano di copertura è risultato pari a 60.3%, della superficie del gap pari a 551.29 m<sup>2</sup>, 17.95 m per la lunghezza e 15.83 m per la larghezza del gap. È emerso che le linee guida SFP (Selvicoltura nelle Foreste di Protezione) sono valide soprattutto se si considera la combinazione di tutti i parametri; singolarmente, il parametro più importante appare essere quello relativo alla lunghezza del gap. L'importante ruolo protettivo è svolto principalmente dagli apparati radicali; ciò è stato confermato anche dall'utilizzo del modello SOSlope dal quale risulta che, a scala di plot, la maggior parte delle frane (42 su 53) si sono effettivamente innescate nelle superfici a più debole rinforzo radicale, con un comportamento simile a quello dei suoli nudi dove il cedimento del pendio è più probabile e si verifica prima.

L'analisi multivariata eseguita su dati rilevati in campo su un campione di 20 frane in bosco, ha inoltre messo in evidenza l'importante ruolo protettivo che svolgono i boschi, oltre nel prevenire l'innescò, anche nei confronti dell'intensità delle frane superficiali e come un popolamento con buona compartecipazione di piante di grandi dimensioni e struttura verticale multiplana possa essere quello più efficace in questi termini. Questo ultimo parametro è confermato anche dal fatto che la struttura orizzontale lacunosa ha determinato frane di minore intensità, si potrebbero quindi considerare più efficaci le foreste tendenzialmente disetaneiformi.

L'insorgenza di disturbi secondari, nei siti in cui si sono innescate le frane, e la conseguente finestra di suscettibilità indicano quanto sia importante pianificare una gestione efficace delle foreste di protezione verso le frane superficiali e altri pericoli naturali gravitativi (valanghe e caduta massi). Questo risulta fondamentale per garantire il mantenimento di tale funzione e salvaguardare quindi gli elementi vulnerabili a valle.

## Summary

Shallow landslides are events that are part of gravitative natural hazards, they can cause damage to infrastructures and inhabited centres, or they can indirectly play an important role in terms of sediment supply in the hydrographic reticulum on a basin scale. Forests can play a direct protective function, preventing the triggering of these events thanks to the role they play in water regulation, in addition to the more important effect of soil reinforcement through root systems. Few studies, however, report empirical evaluations, based on real datasets of large-scale surface landslides, of the protective effects given by the presence and structure of the forest on these events.

The intense rainfall characterizing the first phase of storm Vaia, which severely affected the Agordino territory (in the province of Belluno) in October 2018, caused considerable damage, including the triggering of numerous surface landslides. With the present study, we firstly wanted to identify, by making an inventory, these shallow landslides triggered during Vaia in order to assess their main characteristics in terms of geomorphology and intensity of the event. Secondly, an attempt was made to assess the possible influence of the presence of the forest and in particular its structure on the triggering conditions, characteristics, and intensity of the landslides. A comparison was then made between the structural characteristics of the forest stands, in which the landslides were recorded, and the reference parameters of the protection forest guidelines. In addition, an attempt was made to observe how root reinforcement can have an influence at a local scale on the location of surface landslide triggering and the intensity of the event.

Overall, 469 shallow landslides were identified in an area of 405.84 km<sup>2</sup>. They show median values of area of 177 m<sup>2</sup>, volume of 163 m<sup>3</sup>, and average depth of 0.96 m. Triggers occurred mainly in poorly permeable soils with concave morphologies and slopes with a median value of 34.69°; it is also considered interesting that landslides in the forest occur on greater slopes than those outside the forest. From the characteristics obtained on the forest stands where the in-forest landslides were triggered, the median value of coverage was 60.3%, of the gap area 551.29 m<sup>2</sup>, 17.95 m for the length and 15.83 m for the width of the gap. It turned out that the SFP (Silviculture in Protection Forests) guidelines are especially valid when considering the combination of all parameters; individually, the most important parameter appears to be the gap length. The important protective role is played above all by the root systems; this was also confirmed by the use of the SOSlope model from which results that, on a plot scale, most of the landslides (42 out of 53) were actually triggered in the areas with the lowest root reinforcement, with a performance similar to that of bare soils where slope failure is more probable and occurs earlier.

The multivariate analysis carried out on data collected in the field on a sample of 20 forest landslides, also highlighted the important protective role that forests play, not only in preventing triggering, but

also with respect to the intensity of surface landslides, and how a stand with a good amount of large plants and a multiplane vertical structure can be the most effective in these terms. This last parameter is also confirmed by the fact that the deficient horizontal structure led to landslides of lower intensity, thus forests tending to be uneven-aged could be considered more effective.

The occurrence of secondary disturbances, at the sites where the landslides were triggered, and the resulting susceptibility period indicate how important it is to plan effective management of protective forests against shallow landslides and other gravitative natural hazards (avalanches and rockfalls). This is essential to ensure the maintenance of this function and thus safeguard vulnerable elements downstream.



# 1. Introduzione

## 1.1. Le frane

Le frane sono movimenti controllati dalla gravità, superficiali o profondi, rapidi o lenti, di materiale costituente un rilievo o un pendio (roccia o terra). Questi movimenti possono causare ingenti danni quando impattano su elementi vulnerabili (come edifici, infrastrutture o corsi d'acqua) e, secondo i dati dell'ISPRA (2022), sono il pericolo naturale che causa il maggior numero di vittime (6549 censite in Italia) e danni a centri abitati ed infrastrutture dopo i terremoti. Ciò è appunto riscontrabile soprattutto sul territorio italiano, che ha visto dagli anni '60 ad oggi un notevole sviluppo delle aree urbanizzate ed una conseguente forte esposizione al rischio.

I movimenti franosi possono essere di diverso tipo (G.M.P.E., 2022; BGEO, 2022):

- Crollo: distacchi improvvisi di massi di grandi dimensioni lungo pareti ripide, con disgregazione alla base del versante e dispersione dei detriti anche a notevole distanza;
- Ribaltamento: variante della precedente nella quale la caduta dei massi avviene in avanti con una traiettoria curva;
- Scivolamento: strati di terreno che scivolano lungo superfici inclinate;
- Smottamento: ridotte dimensioni, interessano solo la copertura detritica superficiale incoerente, come le argille;
- Scoscendimento: discese di materiali rocciosi con movimenti rotazionali, lungo superfici di frattura concave verso l'alto;
- Colamento o colate: movimenti su superfici molto estese di masse imbibite d'acqua in seguito a forti piogge;
- Espansione: espansione laterale di un materiale coesivo posto al di sopra di uno strato più debole.

Le frane, in base alla profondità di suolo interessata, possono essere classificate in due ulteriori tipologie: superficiali quando interessano una profondità massima del terreno pari a 2 metri, altrimenti profonde (ad esempio Baumhauer, 2013). In questo studio verranno prese in considerazione solo le frane superficiali che, nonostante le dimensioni ridotte rispetto a quelle profonde, possono comportare rischi significativi per le infrastrutture umane (Sidle e Ochiai, 2006), impattando direttamente sugli edifici e sulle vie di comunicazione. Inoltre, l'asportazione di suolo nelle zone a monte dei bacini idrografici può portare ad un'elevata produzione di sedimenti a valle (Benda e Dunne, 1997). Il contenuto idrico nel suolo è una delle principali cause di innesco delle frane superficiali: la variazione delle pressioni dell'acqua dei pori e quindi l'indebolimento della resistenza al taglio del suolo, spesso legata ad eventi di precipitazione, portano agli inneschi di frane (Toll et al., 2011; Lehmann e Or

2012; Fredlund, 1979). Sia le precipitazioni di forte intensità e di breve durata, sia quelle cumulate di bassa intensità e di lunga durata possono determinare l'innescò di una frana superficiale (Rickli e Graf, 2009). Esistono numerosi inventari di frane realizzati al fine di monitorare questi fenomeni, fornire un quadro dettagliato sulla loro distribuzione spaziale e sulle loro caratteristiche qualitative e quantitative. Un loro aspetto negativo può però essere dato dal fatto che spesso vengono raccolti dati relativi solo ai fenomeni più importanti, che causano i danni maggiori. Per il territorio italiano si può fare riferimento al progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) che, fino ad oggi (per alcune regioni i dati sono però aggiornati al 2007), ha censito 620.808 frane su un'area pari al 7.9% del territorio nazionale. L'Inventario IFFI è dunque un importante strumento conoscitivo che viene utilizzato per valutare la pericolosità da frana e per redigere i Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) e i Piani di Emergenza di Protezione Civile, oltre alla progettazione preliminare degli interventi di difesa del suolo e delle reti infrastrutturali (IFFI, 2022). In generale dai principali inventari, riscontrabili anche in letteratura, risulta che le frane superficiali innescate dalle precipitazioni hanno solitamente profondità comprese tra 0.5 m e 1.5 m, aree di incisione tra 50 m<sup>2</sup> e 1000 m<sup>2</sup> e volumi che vanno da poche a diverse migliaia di metri cubi (Moser e Schoger, 1989; Malamud et al., 2004; Markart et al., 2007; Rickli e Graf, 2009). Le frane superficiali coinvolgono tendenzialmente terreni colluviali a bassa coesione e sono spesso associabili a tipologie di scivolamento, muovendosi lungo un piano di scorrimento parallelo alla superficie del pendio (Milledge et al., 2014). Un metodo molto utilizzato per individuare i fenomeni franosi consiste nell'analizzare visivamente delle serie di fotografie aeree, come eseguito da Guzzetti et al. (2009) in cui sono state interpretate cinque serie di ortofoto, coprenti un periodo che va dal 1941 al 1997, individuando le frane (tramite l'interpretazione di forme e colori) e distinguendo quelle inattive preesistenti da quelle innescate recentemente. Oltre all'individuazione, questo metodo permette anche di misurare le relative superfici delle frane e, indirettamente, il volume attraverso relazioni empiriche. Ad oggi, questo metodo risulta sempre più applicabile grazie ai software GIS (Sistemi Informativi Geografici) che permettono di ottenere molte informazioni da remoto, tramite l'analisi di dati telerilevati ad elevata risoluzione quali ortofoto e DTM (Digital Terrain Model). Questo metodo può però comportare problemi quando un'area si trova in ombra, per frane di piccole dimensioni e/o innescate non recentemente dove quindi si può essere sviluppata nuova vegetazione. Risulta quindi conveniente confrontare i dati con altri ottenuti in campo, per eseguire una verifica ed un'eventuale integrazione (Zieher et al., 2016).

L'effettivo innescò di frane superficiali dipende da diversi fattori: topografia locale, materiale costituente il pendio e proprietà fisiche, nonché dall'idrologia del pendio. La presenza di foreste ha un'influenza su questi ultimi due fattori.

## 1.2. Funzione protettiva dei boschi nei confronti delle frane superficiali

L'effetto stabilizzante dato dalla presenza di alberi sui pendii soggetti a frane superficiali è stato dimostrato da diversi autori (Haigh et al., 1995; Bathurst et al., 2007; Rickli e Graf, 2009; Bischetti et al., 2009; Garcia-Ruiz et al., 2010; Peduzzi, 2010; Kim et al., 2013; Okada e Kurokawa, 2015). Questo avviene grazie a meccanismi idrologici e meccanici rappresentati nella figura 1 (Greenway, 1987; Sidle e Ochiai, 2006), dove i primi sono effetti che determinano un minore contenuto idrico nel suolo. Questi sono dati, ad esempio, dall'intercettazione delle precipitazioni da parte delle chiome e dalla conseguente minore quantità di acqua che raggiunge il suolo, effetto che dura fin quando non si raggiunge un livello di saturazione della capacità di intercettazione. L'intercettazione delle precipitazioni annue può variare dal 6% al 45% (Carlyle-Moses e Gash, 2011) ed aumenta con chiome ampie e dense tipiche quindi in boschi maturi, con specie sciafile, sempreverdi e dipende anche dall'architettura delle chiome delle specie, ad esempio l'angolo che le branche principali formano con il fusto. Altri meccanismi idrologici sono dati dalle radici, tramite la suzione dell'acqua e dal loro contributo alla formazione dei pori del terreno che possono velocizzare il drenaggio dei pendii (Vergani e Graf, 2015) e, infine, dall'evapotraspirazione (in generale, i tassi di evapotraspirazione nelle regioni temperate sono 5- 10 volte più alti nelle foreste, rispetto al suolo nudo).

Tra i principali effetti meccanici connessi alla presenza di vegetazione arborea lungo il versante c'è il cosiddetto sovraccarico, ovvero il peso della vegetazione che aumenta le forze normali e tangenziali che agiscono sui pendii. In genere, l'influenza di questo fattore sulla stabilità è comunque trascurabile (Selby, 1993; Stokes et al., 2008) in quanto il sovraccarico dovuto al peso di una foresta matura di faggio, ad esempio, è difficilmente superiore a 2.5 kPa: l'equivalente di uno strato di terreno pietroso spesso 15 cm (O'Loughlin, 1974; Dhakal e Sidle, 2003). Le radici, i fusti e i rami degli alberi possono anche funzionare come pali di contrafforti ("pile behaviour") o pilastri di archi ("arching effect") che costituiscono una resistenza contro le forze di taglio agenti sui pendii (Vergani et al., 2017). Infine, l'effetto meccanico più importante è costituito dal rinforzo delle radici, che possono determinare un ancoraggio forte, in particolare nei terreni poco profondi delle aree montane dove possono penetrare nella roccia madre (Hasenmueller et al., 2017; Li et al., 2007). Questo comporta anche una facilitazione dei processi fisici di erosione delle rocce, quando le radici si sviluppano in fratture preesistenti o ne creano di nuove in combinazione con i processi chimici degli essudati radicali (Hasenmueller et al., 2017; Pawlik et al., 2016). Gli apparati radicali vanno anche a determinare un rinforzo del suolo, aumentando la resistenza al taglio dei terreni attraverso l'azione combinata di radici grandi e piccole (rinforzo radicale). Molti autori (ad esempio Wu et al., 1979; Greenway, 1987; Phillips e Watson, 1994; Sidle e Ochiai, 2006) concordano sul fatto che il rinforzo meccanico delle radici prevalga rispetto ai meccanismi idrologici nella stabilizzazione dei pendii.

Anche la struttura della foresta influenza fortemente la stabilità dei versanti: dai risultati ottenuti nello studio di Rickli et al. (2019b) e Moos et al. (2016), i minori effetti di protezione dall'innesco di frane superficiali si hanno per le foreste giovani, con copertura colma e presenza di lacune ampie, dato che il rinforzo radicale diminuisce all'aumentare della distanza dall'albero. Una composizione del bosco mista, invece, aumenterebbe resistenza e resilienza.

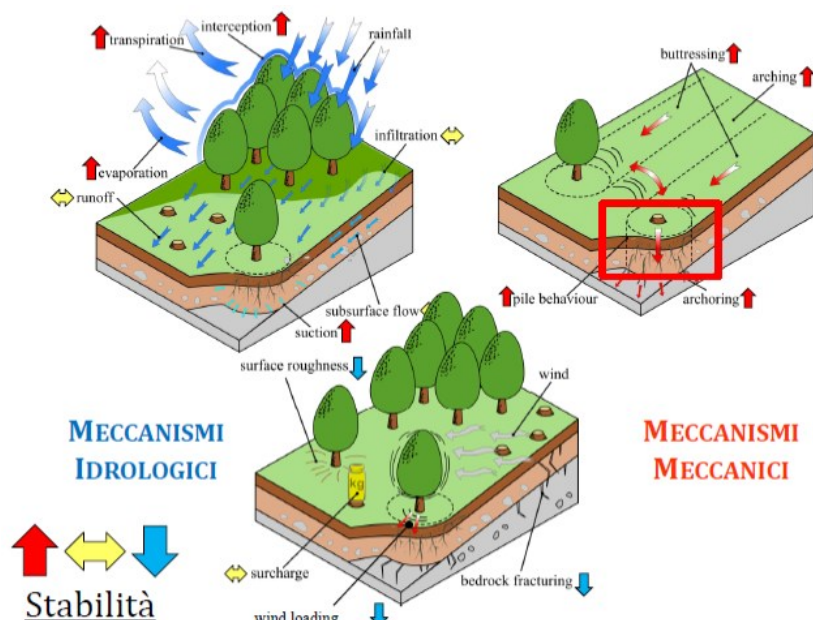


Figura 1: Meccanismi idrologici e meccanici dati dalla presenza delle foreste di protezione, da Cislaghi (2019)

### 1.2.1. Rinforzo radicale

Secondo Sidle (1992), il rinforzo radicale dato dagli alberi può fare la differenza tra stabilità e instabilità del versante durante le precipitazioni o lo scioglimento delle nevi, quando i suoli dei pendii si trovano in un debole stato di equilibrio. Il rinforzo da parte delle radici può agire sul piano di cedimento basale di una frana o sul cedimento laterale (ad esempio Waldron e Dakessian, 1981; Pollen et al., 2004). Il rinforzo determinato dagli apparati radicali cambia se consideriamo le radici basali od orizzontali: il rinforzo basale delle radici è il primo meccanismo ad essere descritto in letteratura (Wu et al., 1979; Waldron e Dakessian, 1981) e gioca un ruolo molto importante quando la superficie di taglio di una potenziale frana si trova all'interno della zona in cui sono presenti le radici. Durante il taglio le radici sono soggette a flessione, tensione o una combinazione di entrambe (Fan e Tsai, 2016) ed anche pochi ettopascal di rinforzo delle radici basali possono aumentare significativamente la stabilità dei pendii. Tuttavia, come hanno dimostrato diversi studi nella regione alpina, l'effetto di questo meccanismo è limitato al primo metro di profondità del suolo per la maggior parte delle specie arboree (Bischetti et al., 2009; Vergani et al., 2016; Dazio et al., 2018) ed il 90% delle radici è situato nei primi 50 cm di profondità del suolo (Schmidt et al., 2001; Roering et al., 2003; Bischetti et al., 2005). La distribuzione verticale delle radici è quindi considerata meno

importante per le frane superficiali in terreni profondi, poiché poche radici di solito attraversano il piano di taglio delle frane ed il loro contributo alla stabilità può quindi essere trascurato. Il rinforzo radicale laterale può essere distinto in compressione e tensione: nella parte superiore le radici sono caricate lateralmente in tensione, questo rinforzo laterale è particolarmente efficace negli ultimi 0.5 m del suolo e viene assorbito principalmente dalle radici grossolane (Giadrossich et al., 2019) ma l'importanza di questo meccanismo è limitata alle frane con un volume fino a 2000 m<sup>3</sup> (Schwarz et al., 2010). Le radici possono irrigidire il terreno e le forze destabilizzanti di taglio, trazione e compressione sono infatti distribuite più uniformemente in un pendio forestato che in un terreno senza radici. Affinché il meccanismo di irrigidimento del suolo abbia un'influenza significativa sulla stabilità dei pendii è necessario un sistema ben interconnesso di radici, se queste non sono sufficientemente collegate tra loro saranno isolate e difficilmente potranno trasmettere le forze lateralmente (Cohen e Schwarz, 2017). Il rinforzo laterale delle radici in compressione è di solito meno importante del rinforzo delle radici basali e del rinforzo delle radici laterali in tensione (circa dieci volte più piccolo; Schwarz et al., 2015). Ciononostante, può avere un significativo effetto stabilizzante specialmente su pendii brevi caratterizzati da circa 10-20 m di lunghezza (Cohen e Schwarz, 2017).

Il massimo rinforzo dell'apparato radicale sotto tensione e compressione non avviene contemporaneamente e l'effetto di stabilizzazione delle radici dipende dalla loro distribuzione spaziale: la presenza di una "zona debole" porta ad un comportamento simile a quello dei suoli nudi in quanto con un rinforzo radicale scarso o assente il cedimento del pendio è più probabile e si verifica prima (Cohen e Schwarz, 2017). Anche le posizioni degli alberi nella zona di tensione di una potenziale frana possono influenzare la stabilità del pendio, in generale l'effetto del rinforzo delle radici laterali in tensione contribuisce alla stabilità lungo la transizione tra zone stabili e instabili del pendio, dove può formarsi una fessura (figura 2).



Figura 2: Radici laterali in prossimità della scarpata di frana, in seguito all'innesco.



Durante il processo di innesco e scivolamento della frana vengono attivate, in diversi momenti, diverse forze di resistenza nelle radici. Nella prima fase prevale la resistenza al taglio delle radici lungo la superficie locale di taglio (il cosiddetto rinforzo radicale basale) e l'innesco è causato da una perdita locale di questa resistenza (figura 3, "case 1"). Nella seconda fase, la resistenza laterale alla trazione viene attivata nella fessura superiore della frana (rinforzo laterale delle radici in tensione, figura 3, "case 2"), contemporaneamente la massa di terreno destabilizzata provoca un aumento della compressione nella zona subito a valle (figura 3, "case 3"). Nella terza fase, non appena la maggior parte della resistenza laterale alla trazione è stata persa, agiscono principalmente le forze di compressione verso il basso (figura 3, "case 4"). Durante questa ultima fase, l'irrigidimento del corpo di scorrimento da parte delle radici può giocare ancora un ruolo importante, rispondendo a questo carico con una resistenza alla compressione (Schwarz et al., 2015).

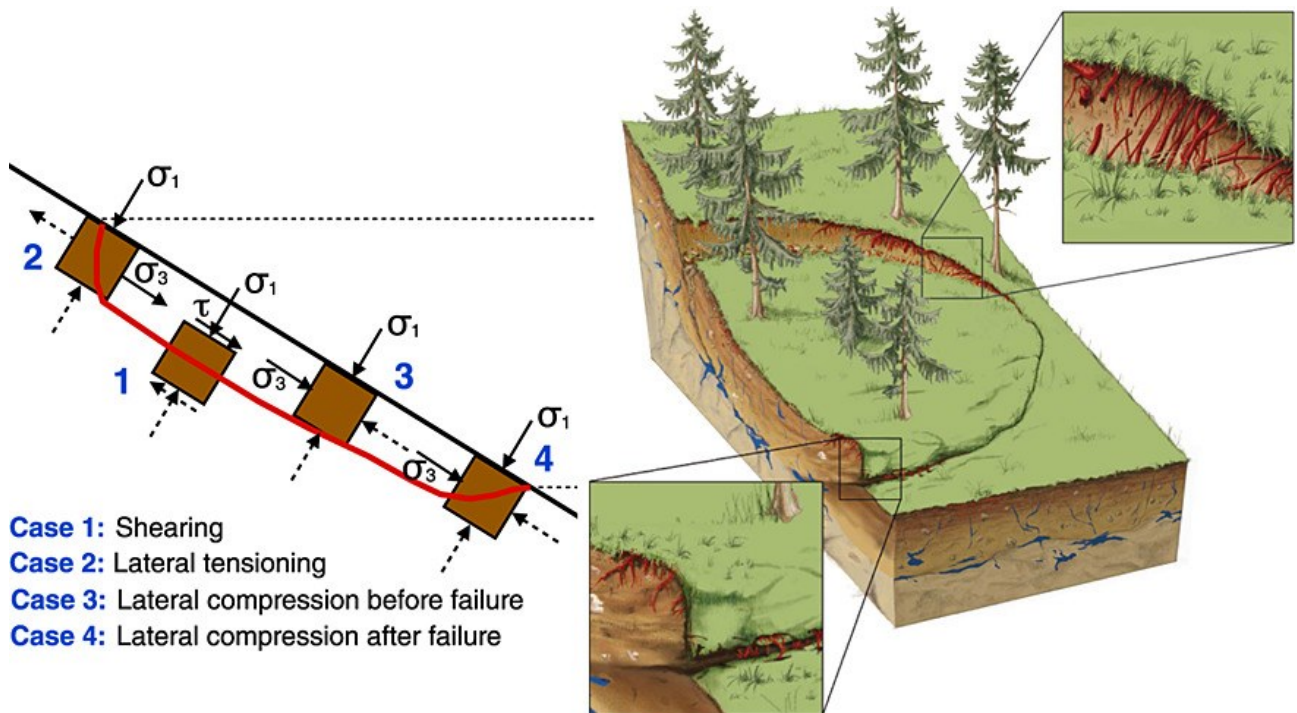


Figura 3: Attivazione del rinforzo radicale nella fessura di trazione e nella zona di compressione durante l'innesco di una frana superficiale. L'immagine a sinistra mostra gli elementi rappresentativi del volume del terreno sotto diverse configurazioni di stress in diversi punti della frana (da Schwarz et al., 2015).

La combinazione di terra e radici forma, dunque, una matrice di terreno rinforzata, in cui le sollecitazioni possono essere trasferite dal terreno alle radici aumentando la resistenza complessiva (Greenway, 1987). Pertanto, la forza del suolo radicato dipende dalla forza del suolo, dalla forza delle radici e dalla forza dei legami tra suolo e radici (Dakessian, 1981; Waldron, 1977; Ennos, 1990). L'effetto di rinforzo di una matrice da parte di fibre di materiale diverso si ottiene solo se i due materiali hanno diverse proprietà di resistenza alla trazione e alla compressione (Beaudoin, 1990). Nel caso della matrice rinforzata terreno-radici, la componente di solo terreno è forte in compressione,

ma debole in trazione, la componente di radici delle piante è invece debole in compressione ma forte in trazione.

L'effettivo grado di stabilizzazione dipende molto dalle caratteristiche della foresta, tra cui la distribuzione spaziale degli alberi e, soprattutto, delle loro radici (Schwarz et al., 2012b; Hwang et al., 2015). Il rinforzo radicale varia principalmente dalla specie, ad esempio alcuni studi nelle Alpi hanno mostrato che il rinforzo delle radici aumenta sulla scala del popolamento nell'ordine indicato: abete rosso (*Picea abies*) (Schwarz et al., 2012b; Vergani et al., 2016; Mattli, 2014), castagno (*Castanea sativa*) (Dazio et al., 2018), abete bianco (*Abies alba*) (Schwarz et al., 2012b) e infine faggio (*Fagus sylvatica*) (Schwarz et al., 2012b; Gehring et al., 2019). Infatti, secondo lo studio di Schwarz et al. (2012b), la specie che garantisce un minore rinforzo radicale sarebbe l'abete rosso, che è però caratterizzato da radici che possono raggiungere distanze laterali fino a circa 20 volte il DBH, al contrario degli abeti che hanno un apparato radicale meno diffuso ma per i quali anche le classi di DBH più piccole raggiungono valori elevati di rinforzo radicale (fino a 5 kPa). La specie con sistema radicale che risulta essere più efficace nel rinforzo è il faggio, la cui diffusione laterale è però anche in questo caso limitata (diffusione massima fino a 15 volte il DBH). Questi valori appena indicati sono considerati rappresentativi per il primo mezzo metro di profondità del suolo e sono rappresentati in figura 4.

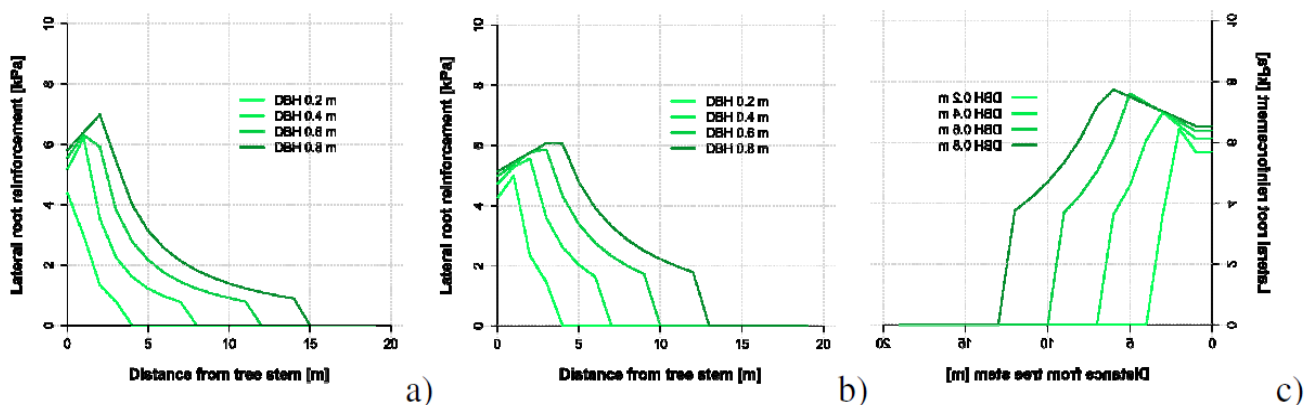


Figura 4: Distribuzione del massimo rinforzo radicale in funzione della distanza dal fusto dell'albero, calcolata per a) abete rosso, b) abete bianco e c) faggio (da Schwarz et al., 2012b).

Secondo Masi et al. (2021) l'entità del rinforzo delle radici è in funzione anche della loro densità, resistenza alla trazione, del rapporto lunghezza/diametro, dell'allineamento - angolarità/rettilinearità e dell'orientamento delle radici rispetto alla direzione delle deformazioni principali (ad esempio Genet et al., 2010; Bischetti et al., 2005).

Un altro fattore che influenza il rinforzo è la morfologia del terreno per cui profili concavi (per effetto del differente potenziale idrico), insieme a fattori ambientali quali la fertilità del suolo, comportano

una variazione nel contenuto di cellulosa (ed una minore resistenza) rispetto a quelli convessi, come descritto da Hales et al. (2009) e Masi et al. (2021).

La relazione tra il diametro delle radici e la resistenza alla trazione radicale viene solitamente descritta utilizzando una funzione power-law:

$$Tr = ad^b \quad (1)$$

dove  $Tr$  è il carico di rottura (MPa),  $d$  il diametro della radice (mm) e  $a$  e  $b$  parametri di regressione. È risultato che l'effetto di una radice grossa spesso domina un intero fascio. Per i castagni, per esempio, è stato dimostrato che l'effetto di 500 radici di 1 mm di diametro ciascuna è paragonabile a quello di una singola radice di 50 mm (Vergani et al., 2017). Anche secondo Cohen e Schwarz (2017) il rinforzo radicale su scala macroscopica è dominato dalle radici intermedie e grossolane, quando sono presenti. Per le specie considerate nel loro studio, radici tra i 5 e i 20 mm contribuiscono maggiormente all'effetto di rinforzo; tuttavia, è da riportare che le prove di laboratorio sulle proprietà meccaniche delle radici di diametro superiore a 10 mm e sulla loro distribuzione all'interno del suolo sono estremamente impegnative, come indicato da Bischetti et al. (2016). In linea generale le radici legnose di grandi dimensioni possono ancorare gli strati superficiali del suolo a substrati più stabili, mentre le radici piccole rafforzano i legami con le particelle del suolo, aumentando la coesione complessiva della matrice suolo-radici. A diametri più piccoli, le radici delle piante erbacee presentano la resistenza alla trazione più elevata e quelle degli arbusti la più bassa, le resistenze alla trazione delle specie erbacee e arboree tendono poi a convergere a diametri radicali superiori a 5 mm (Mao et al., 2012). Tuttavia, per diametri radicali superiori a 1 mm le radici delle graminacee sono più deboli per unità di superficie rispetto alle specie arboree e arbustive. Poiché il rinforzo radicale varia anche in funzione della densità delle radici nel suolo, le graminacee possono determinare un importante rinforzo negli strati più superficiali del terreno dove si concentrano migliaia di radici fini, fornendo un rinforzo significativo quando i potenziali piani di rottura sono poco profondi; al contrario delle radici legnose di alberi e arbusti che forniranno un rinforzo su una maggiore profondità del terreno attraverso una combinazione di radici fini e fibrose e radici legnose più grosse. I diversi diametri delle radici hanno quindi un'influenza diversa sul rafforzamento del suolo: durante il taglio del suolo le radici fini tendono a rompersi, rimanendo nella stessa posizione rispetto alle particelle del terreno, al contrario le radici più grosse possono “sfilarsi” senza rompersi (Ennos, 1990). È quindi evidente che una combinazione di radici fini e dense nello strato superiore (dove la resistenza alla tensione è importante) con radici grosse più profonde che attraversano le potenziali superfici di taglio sia la configurazione più efficiente per stabilizzare i pendii (Reubens, 2007). Un altro fattore che influisce sul rinforzo radicale è l'età delle piante: Dazio et al. (2018), studiando in particolare il castagno, hanno dimostrato che l'invecchiamento eccessivo ha un effetto negativo sul rinforzo



radicale mentre in popolamenti più giovani, mantenuti ad esempio tramite la ceduzione, può essere favorito il completo rinnovamento dell'apparato radicale con effetti positivi sulla stabilità dei versanti, potrebbe però presentarsi un periodo di vulnerabilità tra il taglio e il ripristino degli apparati radicali. Le caratteristiche forestali, oltre che dall'uomo, possono essere influenzate da disturbi naturali: sebbene una stabilità delle foreste possa essere raggiunta solo in periodi di tempo più lunghi, un'instabilità può essere causata rapidamente (ad esempio da un eccessivo prelievo di legname, vedi figura 5, o da un incendio boschivo: Sidle e Wu, 1999; Jakob, 2000). Molte analisi in campo, svolte su pendii boscosi di tutto il mondo, hanno osservato un aumento significativo (fino a 10 volte) dell'erosione di massa e degli smottamenti dai 3 ai 15 anni dopo l'esbosco del legname (Sidle e Ochiai, 2006). I risultati ottenuti da Bischetti et al. (2016) e Vergani et al. (2016) hanno mostrato che il decadimento delle radici, sia in termini di forza che di densità, riduce l'effetto di rinforzo di circa il 60% nei primi due anni dopo l'abbattimento, di un altro 20% nel terzo anno e scompare completamente entro il quinto anno. Queste riduzioni di rinforzo osservate possono determinare conseguenze rilevanti per la stabilità dei pendii. Ziemer (1981) ha riportato che il recupero del 50% del rinforzo radicale viene raggiunto entro 15-25 anni dopo il taglio, nell'ambito di un popolamento di pino lodgepole (*Pinus contorta*), mentre Gehring et al. (2019) hanno riscontrato che la minore protezione contro le frane superficiali, dovuta alla perdita del rinforzo radicale nei popolamenti di faggio a seguito di incendi, può estendersi per oltre 35 anni in caso di incendi di media o alta severità. Inoltre, gli incendi boschivi possono consumare la sostanza organica superficiale e creare di conseguenza uno strato idrofobo che favorisce il flusso superficiale di acqua e che aumenta l'effetto erosivo di quest'ultima. Liu et al. (2021), hanno dimostrato che il recupero del rinforzo radicale nei primi quattro anni post-disturbo in popolamenti forestali ad alta quota (cioè a 1800 m s.l.m.) è lento o quasi assente, suggerendo che i popolamenti di abete rosso a questa altitudine necessitano di particolare attenzione per lo studio delle dinamiche di rinforzo radicale a lungo termine. Da questi risultati ne consegue che, sebbene l'approccio selvicolturale orientato all'apertura di fessure sia in linea di principio più conservativo rispetto alle grandi buche, il ritmo della rigenerazione naturale potrebbe essere più lento del processo di decadimento delle radici, per cui potrebbe verificarsi un'instabilità soprattutto quando le pendenze locali superano i 25° e i terreni sono frequentemente saturi d'acqua (Bischetti et al., 2016). Secondo il recente studio di Flepp et al. (2021), il decadimento di rinforzo radicale si ha in 5-15 anni e la finestra temporale post disturbo di suscettibilità per l'innescò di frane potrebbe protrarsi effettivamente per 50-100 anni, in base alla stabilità del sito ed alle caratteristiche della foresta prima del disturbo. Per cui popolamenti più maturi presenteranno radici di maggiori dimensioni che richiederanno più tempo per essere sostituite (Liu et al., 2021).

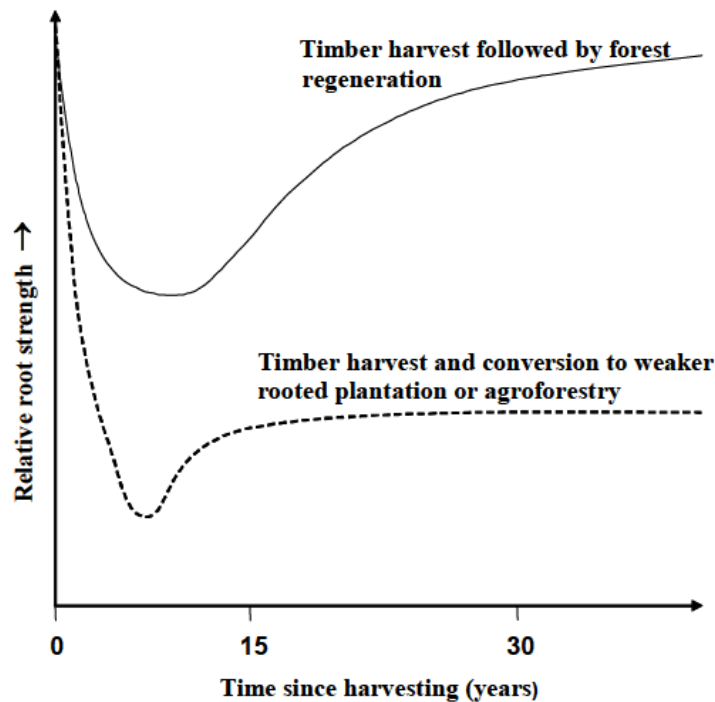


Figura 5: Ipotetico decadimento e successivo recupero del rinforzo radicale, a seguito di un taglio selvicolturale (da Sidle, 2005).

### 1.2.2. Linee guida principali dei boschi di protezione da frane superficiali

La funzione di protezione offerta dai popolamenti forestali nei confronti dei pericoli naturali gravitativi si può distinguere tra quella diretta e quella indiretta (Lingua et al., 2017). Quella indiretta, o generale, riguarda la regimazione delle acque e il ruolo di protezione nei confronti dell'erosione, viene svolta da tutte le foreste ma in diverse misure a seconda, ad esempio, della pendenza e del tipo di suolo ed è solitamente apprezzabile a scala di bacino idrografico. La protezione diretta, invece, viene svolta quando sono presenti elementi esposti a valle come persone o infrastrutture, potenzialmente vulnerabili per impatti provocati da pericoli naturali (Brang et al., 2001; Perzl, 2014). Questa seconda tipologia di protezione può essere totale in alcune foreste o nulla in altre e può essere distinta tra quella attiva che consiste nell'impedire l'innescò di un fenomeno, come può essere nel caso di questo studio una frana superficiale (funzione principale e di maggiore efficacia), e quella passiva quando invece ne limita la diffusione (i.e. caduta massi) (Perzl et al., 2021). L'importanza delle foreste di protezione è stata messa in risalto da molti studi recenti ed esistono progetti che hanno l'obiettivo di delimitarle e determinare una loro corretta gestione. Un esempio può essere il progetto SilvaProtect-CH, lanciato nel 2004 dall'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), il cui risultato è stato quello di ottenere la delimitazione delle foreste di protezione svizzere da parte delle autorità cantonali. La superficie totale delle foreste di protezione è quindi risultata pari a 585.000 ha, che corrispondono al 49% della superficie forestale della Svizzera e di queste, Secondo Losey e Wehrli (2013), circa il

27% svolge una funzione protettiva contro le frane superficiali, mentre i restanti 2/3 proteggono principalmente dalla caduta di massi, dai processi torrentizi e dalle valanghe.

Tabella 1: Area e frequenza percentuale delle classi di pendenza coperte da foreste di protezione contro le frane superficiali secondo i dati del SilvaProtect-CH (da Dorren e Schwarz, 2016).

Slope gradient class	Frequency (%)	Area (ha)
0–10°	0	0
>10–20°	10	15,795
>20–25°	18	28,431
>25–30°	26	41,067
>30–35°	17	26,852
>35–40°	13	20,534
>40–45°	10	15,795
>45–55°	5	7898
>55°	1	1580
Total	100	157,950

Secondo questi dati riguardanti il territorio svizzero, le foreste di protezione dalle frane superficiali coprono principalmente pendii con pendenze comprese tra 20° e 40°. Questi risultati hanno permesso di fornire delle utili indicazioni per quanto riguarda il range prevalente di pendenza dei versanti nel quale si localizzano i boschi di protezione, anche per altri paesi in ambito alpino. Sui pendii meno ripidi le frane superficiali si innescano raramente e sui pendii con maggiori pendenze, in genere, manca uno spessore sufficiente del suolo per l’innescamento di frane superficiali (Dorren e Schwarz, 2016). Diverse linee guida europee hanno proposto le soglie e gli indicatori per la gestione delle foreste di protezione, che consistono sostanzialmente in obiettivi selvicolturali e valori critici a scala di popolazione e di pendio (Perzl et al., 2021).

In alcuni paesi sono stati prodotti dei documenti che fungono essenzialmente da linee guida per la gestione delle foreste di protezione. Per il territorio alpino sono stati realizzati grazie al progetto “Gestion durable des forêts de montagnes à fonction de protection - Gestione sostenibile delle foreste di montagna a funzione protettiva”, svolto tra il 2003 e il 2006, che ha coinvolto le regioni alpine di Francia (in particolare i Dipartimenti francesi della Savoia e dell’Alta Savoia), Italia (i territori della Valle d’Aosta e delle province di Torino e Cuneo) e Svizzera (i Cantoni svizzeri del Vallese, di Vaud e di Friburgo) e sono quindi state prodotte delle linee guida per ciascun paese grazie anche al lavoro di partner istituzionali territoriali, enti di ricerca e formazione insieme a selvicoltori, docenti e ricercatori (Berretti et al., 2006). Per il territorio francese è stato realizzato un documento di

riferimento per le principali formazioni forestali, denominato “Guide des sylvicultures de montagne – GSM” (Gauquelin e Courbaud, 2006; Ladier et al., 2012), per la Svizzera invece la seconda versione del manuale svizzero sulla selvicoltura di montagna, denominato “Gestion durable des forêts de protection – NaiS” (Frehner et al., 2005). Per le Alpi italiane la Regione Autonoma Valle d’Aosta e la Regione Piemonte, nel 2006 hanno pubblicato il manuale denominato “SELVICOLTURA NELLE FORESTE DI PROTEZIONE, Esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e in Valle d’Aosta” (SFP), allo scopo di “aumentare la consapevolezza dell’importanza della funzione protettiva svolta dalle foreste e di fornire uno strumento utile e un supporto concreto al personale tecnico che opera nelle foreste di protezione, al fine di una più corretta individuazione e gestione delle stesse” (Berretti et al., 2006). Da questo manuale si possono ricavare le esigenze di stabilità contro lave torrentizie e scivolamenti superficiali (tabella 2), espresse come parametri caratterizzanti la foresta, che verranno confrontati con i parametri calcolati in questo studio, intorno ai punti di innesco delle frane innescate in bosco.

Tabella 2: Esigenze di stabilità contro lave torrentizie e scivolamenti superficiali, espresse come parametri caratterizzanti il bosco (da Berretti et al., 2006).

**Lave torrentizie e scivolamenti superficiali in bosco: esigenze di stabilità**

Zone	Parametri		Esigenze minime	Esigenze ideali	
Zona di scivolamento	<b>Composizione</b>		compatibilmente con la categoria forestale, su suoli compatti e pesanti favorire le specie pioniere a radicazione profonda; tra le latifoglie: frassino, olmo, pioppo tremolo, ontani; tra le conifere: abete bianco, pino silvestre; nelle foreste di transizione occorre tendere verso la mescolanza di specie adatte alla stazione più mesofila		
	Densità	<b>N° piante/ha</b>	indifferente purché sia rispettata la % di copertura		
		<b>% di copertura</b>	≥ 40%	≥ 60%	
	Struttura	<b>Numero strati</b>	popolamento pluristratificato		
		<b>Aperture</b> (lungo la linea di pendenza)	< 20 m e superficie < 600 m <sup>2</sup> , in presenza di rinnovazione affermata < 25 m e superficie < 1.200 m <sup>2</sup> *	< 15 m e superficie < 400 m <sup>2</sup> , in presenza di rinnovazione affermata < 20 m e superficie < 800 m <sup>2</sup> *	
Elementi di stabilità	<b>Ancoraggio</b>	- assenza di alberi di diametro grande (> 47,5 cm) o potenzialmente instabili per azione del vento, - > 80% di alberi con buona radicazione evidente	- assenza di alberi di diametro grande (> 47,5 cm) o potenzialmente instabili per azione del vento, - > 90% di alberi con buona radicazione evidente		
Zona di infiltrazione	Densità	<b>% di copertura</b>	≥ 30%	≥ 50%	

Note: Rinnovazione affermata: presenza di nuclei e gruppi in funzione della mescolanza attesa. Nel piano subalpino sono tollerate superfici più grandi, ma non lungo la massima pendenza (larghezza massima 20 m).

Sempre allo scopo di ricavare degli obiettivi selvicolturali uniformi per le foreste di protezione e per risolvere le aree problematiche del programma austriaco di miglioramento delle foreste protettive, è stato sviluppato l'ISDW (Initiative Schutz Durch Wald, vedi Perzl, 2008) dal BMLFUW, in collaborazione con i servizi forestali provinciali, il servizio di ingegneria forestale per il controllo dei torrenti e delle valanghe (WLV) e l'ufficio federale e centro di ricerca per le foreste (BFW). I parametri ottenuti dai diversi paesi, e riportati nei rispettivi manuali, sono stati confrontati da Perzl et al. (2021) e riportati nella tabella 3.

Tabella 3: Obiettivi definiti dai manuali NaiS, SFP, GSM e ISDW in termini di dimensioni dei gap e caratteristiche della copertura boschiva per le foreste di protezione da frane superficiali (da Perzl et al., 2021).

Indicators and miss rates	Canopy opening (gap)					Canopy cover [%]				
	No regeneration			regeneration		NaiS minimal	SFP minimal	GSM-N	GSM-S	ISDW
	NaiS minimal	SFP minimal	ISDW	NaiS minimal	SFP minimal					
Gap area [m <sup>2</sup> ]	≤600	<600	—	≤1200	<1200	—	—	—	—	—
FNR Gap area [%]	25	25	—	34	34	—	—	—	—	—
Gap dimension link rule	—	AND	—	AND <sup>†</sup>	AND	—	—	—	—	—
Gap length [m]	—	<20	—	—	<25	—	—	—	—	—
FNR Gap length [%]	—	18	—	—	68	—	—	—	—	—
Gap width [m]	—	—	≤25	≤20 <sup>†</sup>	—	—	—	—	—	—
FNR Gap width [%]	—	—	47	39	—	—	—	—	—	—
Trees h >10 m	—	—	—	—	—	≥40	≥40	—	—	—
All trees	—	—	—	—	—	—	—	>70	>70	>65
Large-sized trees	—	—	—	—	—	—	0	—	—	<25
FNR gap or cover [%]	25	19	47	34	31	42	—	38	—	42
FNR large-sized [%]	—	—	—	—	—	—	66	—	—	98
FNR combined [%]	—	—	—	—	—	45	21	38	38	39

*h, stand height; FNR, false negative rate in percent of the sample, "combined" refers to the final assessment by the combination of all targets (canopy cover, gap size, canopy cover of large trees).<sup>†</sup>The combination rule is not clearly documented.*

### 1.3. La tempesta Vaia

Come scritto in precedenza, i fattori scatenanti nel caso delle frane superficiali sono sia le precipitazioni ad elevata intensità di breve durata sia quelle che provocano importanti quantitativi di pioggia cumulata. Recentemente il nord-est Italia è stato colpito da un evento di precipitazioni estremo chiamato tempesta Vaia (27 – 30 ottobre 2018), il quale in diverse zone è stato caratterizzato da una severità che si verifica con TR (tempo di ritorno) superiore ai 100 anni in termini di precipitazioni (figura 6), deflussi e fasce convettive (Pellegrini et al., 2021; Borga, 2021). L'evento è chiamato erroneamente con l'appellativo di "tempesta" (grado 10 nella scala di Beaufort) ma, considerando le elevate velocità che i venti hanno raggiunto (superiori ai 117 km/h), sarebbe più corretto descriverlo come "uragano" avente grado 12 (Centrometeo, 2022). La tempesta Vaia ha generato violentissime raffiche di vento, mareggiate e alluvioni soprattutto sulle Alpi Orientali dove sono stati misurati anche più di 600 mm di precipitazione in 72 ore. Come descritto da Valt et al. (2019) la depressione atmosferica "Vaia" si è sviluppata sabato 27 ottobre 2018, in un contesto meteorologico che si estendeva dal Baltico al Mediterraneo occidentale, stazionando sui mari tra il

Golfo del Leone, le Baleari e la Sardegna fino al mattino del 29 quando, dalla Valle del Rodano, è avvenuta l'irruzione massiccia di aria. L'evento perturbato è iniziato, quindi, sabato 27 ottobre con correnti di libeccio (S- SW) e precipitazioni intense sulle Alpi e sull'Appennino settentrionale. L'influenza orografica, durante la tempesta, è stata notevole: il flusso meridionale ha generato forti piogge da sbarramento e sollevamento orografico lungo tutta la fascia prealpina fino al confine con l'Austria nelle Alpi orientali. Nelle Dolomiti, durante le 2 giornate sono state misurate precipitazioni di 168+284 mm a Soffranco, dove è stato registrato il picco di precipitazioni cumulate in 72 ore con valore pari a 715 mm (Pellegrini et al., 2021), 65+271 mm ad Agordo, 109+207 mm a Col dei Pra, 66+193 mm a Cencenighe, 60+209 mm a Feltre e quasi 300 mm a Sappada (UD) (ARPAV, 2022). Lungo la cresta di confine con il territorio austriaco le precipitazioni sono state meno intense ma hanno comunque raggiunto valori significativi, come ad esempio a Vipiteno (BZ) con 159 mm in 2 giorni e ad Anterselva di Sopra (BZ) con 123 mm (Provincia Autonoma di Bolzano Alto Adige, 2022). La stima di questi dati è risultata problematica in quanto la presenza di neve e l'importante evento convettivo, con forti venti, hanno disturbato le stime radar e le stime delle precipitazioni da pluviografo (Borga, 2021). Conseguentemente queste precipitazioni hanno provocato un primo importante ingrossamento dei fiumi Serio, Sarca, Adige, Brenta e Piave (Cat Berro et al., 2018) e, dopo una temporanea riduzione nell'intensità dei fenomeni, lunedì 29 ottobre si è sviluppato, a partire da Ovest, un rinforzo dello scirocco e lo sviluppo di violente celle temporalesche autorigeneranti tra la Sardegna, il Mar Tirreno e il Mar Ligure all'approfondirsi della depressione atmosferica "Vaia" poco ad ovest della Corsica (Cat Berro et al., 2018). Come sostenuto da Borga (2021), nelle zone più colpite l'evento è stato caratterizzato da uno iato molto importante (di durata fino a 12 ore) e questo, nonostante le intense piogge, ha fortunatamente limitato i danni causati da piene importanti, "spezzando" le precipitazioni in due fasi distinte e generando piene facilmente predicibili (cosa rara nelle piene improvvise). Nonostante ciò, sono comunque stati provocati danni a causa delle portate eccezionali raggiunte dai corsi d'acqua, come il fiume Piave che ha superato i massimi storici, questo ha comportato su tutto il territorio esondazioni di torrenti, allagamenti, danni intensi ed estesi ad opere di difesa idraulica longitudinali e trasversali, erosione delle sponde, sovralluvionamento, ostruzione degli alvei, innalzamento del livello dei bacini lacuali, attivazione di movimenti franosi di sponda e di versante e riattivazione ed intensificazione di movimenti gravitativi già in atto (ARPAV, 2022). Oltre alle piogge, le fortissime raffiche di vento, sopra i 200 km/h, hanno determinato il danneggiamento di molte superfici forestali, in particolare peccete, piceo-abieteti e piceo-abieto-faggeti. Secondo i primi risultati, ottenuti da Chirici et al. (2019), la copertura forestale interessata da schianti è stata stimata a circa 42'500 ettari, per un totale di più di 8.5 milioni di metri cubi di legname, un dato che, come già previsto da Chirici, si è rivelato maggiore (figura 7). Secondo Giannetti et al.



(2021) infatti, risultati attendibili si possono ottenere non prima di 7-12 mesi dalla tempesta e l'area forestale colpita sarebbe di 39'951 ha  $\pm$  450 ha e volumi superiori ai 10 milioni di m<sup>3</sup>. Le Regioni maggiormente colpite dai danni alle foreste sono il Trentino-Alto Adige e il Veneto, seguiti da Lombardia, Friuli-Venezia Giulia e, in piccola parte, da Piemonte e Valle D'Aosta.

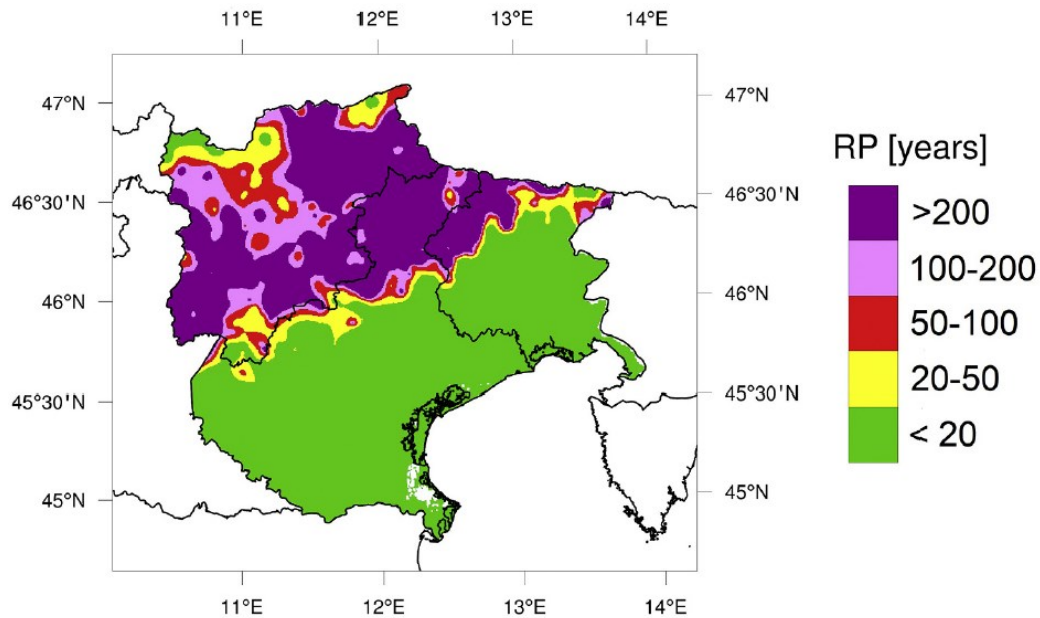


Figura 6: Tempo di ritorno (TR o RP) per le precipitazioni accumulate in 72 ore da osservazioni (da Giovannini et al., 2021).

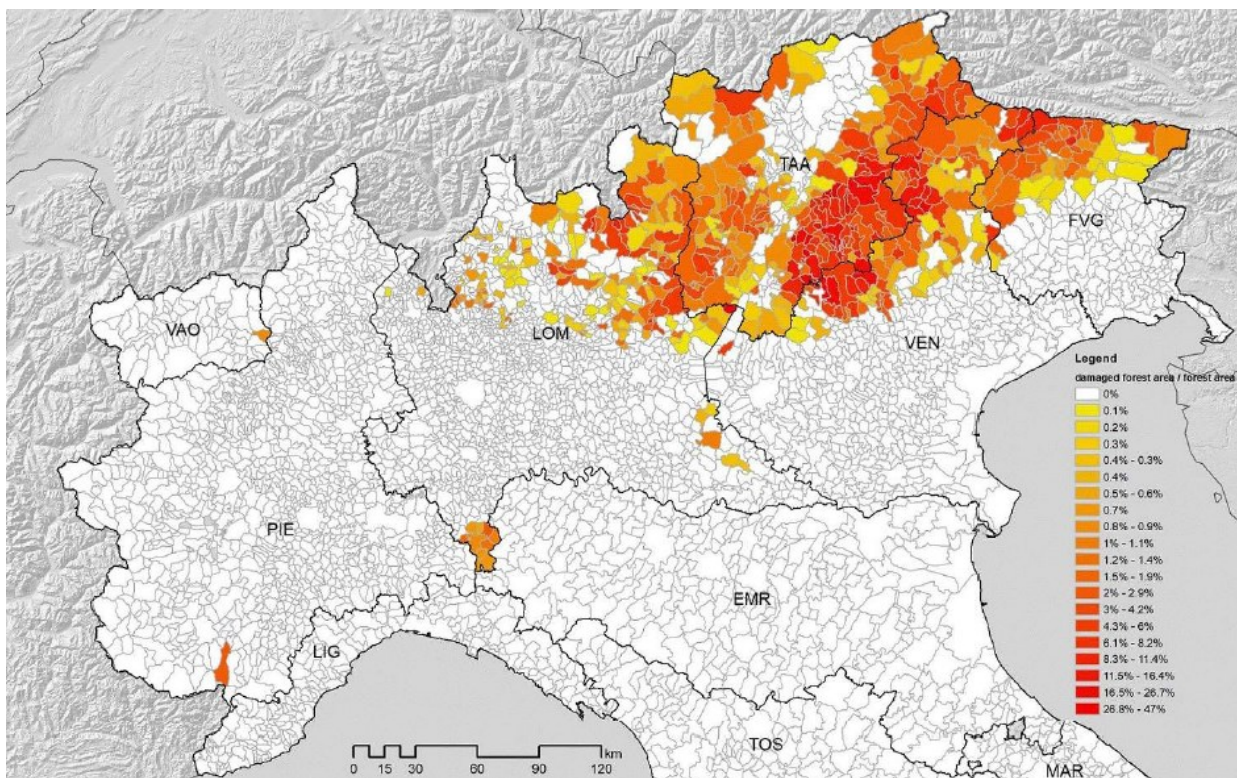


Figura 7: Percentuale di superficie forestale schiantata dalla tempesta Vaia per Comune Amministrativo (da Chirici et al., 2019).

## 1.4. Obiettivi

Questo studio si pone diversi obiettivi e quesiti ai quali rispondere, tra questi quello principale consiste nell'andare a valutare la funzione di protezione dei popolamenti forestali, su un dataset di frane innescate durante un evento estremo. Per raggiungere tale obiettivo si andrà per prima cosa a predisporre, grazie a Sistemi Informativi Geografici (GIS), un inventario di frane superficiali innescate durante la tempesta Vaia, che nell'ottobre 2018 ha colpito gran parte dell'Agordino nella provincia di Belluno, al fine di fornire un quadro dettagliato sulla loro distribuzione spaziale e sulle loro caratteristiche quali-quantitative. Le frane considerate possono essere suddivise tra quelle innescate in bosco, se presente copertura forestale, o quelle innescate su superfici non boscate. Una volta eseguita questa distinzione, si vuole quindi valutare la possibile influenza che la presenza di foreste ha avuto sulle condizioni di innesco e sulla magnitudo dei movimenti franosi individuati, espressa in termini di area di incisione, volume di materiale movimentato e profondità. In particolar modo, per le frane in bosco, ci si concentrerà sulle caratteristiche del popolamento e sulle informazioni riguardanti la sua struttura, in termini di copertura percentuale e dimensioni dei gap. Questa analisi viene svolta al fine di individuare i parametri maggiormente efficaci per la gestione selvicolturale dei boschi di protezione. Le linee guida SFP, redatte dalla Regione Piemonte e Valle D'Aosta, forniscono indicazioni gestionali sulle caratteristiche strutturali che le foreste all'interno del territorio alpino italiano dovrebbero presentare per ottenere un'efficace funzione protettiva verso le frane superficiali. Si è quindi ritenuto interessante, per questo lavoro, confrontare i dati ottenuti sulle strutture delle foreste in cui si sono innescate le frane con i parametri indicati dalle linee guida SFP, per determinare se questi coincidessero o meno. Il meccanismo principale attraverso il quale le foreste svolgono un ruolo protettivo nei confronti degli inneschi di frane superficiali è il rinforzo radicale. Per verificare dunque se i punti di innesco sono situati dove questo risulta inferiore, verrà utilizzato il modello SOSlope per comprendere come, a scala locale, il rinforzo radicale laterale a tensione possa influenzare la disposizione dell'innesco e la magnitudo delle frane superficiali. Oltre alle caratteristiche strutturali e al rinforzo radicale, si vuole anche considerare l'influenza delle caratteristiche dendrometriche dei popolamenti sull'intensità dei movimenti franosi, a questo scopo sono stati eseguiti dei rilievi in campo, tramite i quali sarà anche possibile constatare lo stato delle frane a distanza di più di tre anni dal loro innesco.



## **2. Materiali e metodi**

In questo studio si è innanzitutto ricavato un inventario tramite l'individuazione e la delimitazione delle frane innescate durante la tempesta Vaia, all'interno dell'area di interesse, dopodiché il lavoro è stato suddiviso in 4 parti: una prima, in cui si sono analizzate le frane totali ricavando i parametri descrittivi, topografici, dimensionali e andando a distinguere tra quelle innescate in bosco e quelle non in bosco. Le altre fasi sono state effettuate focalizzando l'attenzione sulle sole frane in bosco e, nello specifico, nella seconda fase sono stati misurati i parametri relativi al popolamento (copertura e gap) che sono poi stati confrontati con quelli indicati nelle linee guida dei boschi di protezione SFP; nella terza fase, è stato valutato il rinforzo radicale all'interno di plot 50x50 metri intorno ai punti di innesco di 53 frane e lungo le loro scarpate. In ultimo, nella quarta fase, sono stati eseguiti dei rilevamenti in campo per misurare i parametri dendrometrici e quelli relativi al popolamento, per confrontarli poi con quelli ottenuti nella seconda fase e valutare la possibile influenza di tali parametri sull'intensità delle frane superficiali. Per eseguire tali analisi sono stati applicati diversi software GIS (Geographic Information System), in particolare QGIS (v.3.22.5) e arcgisPro (v.3.0.2.). Per l'analisi del rinforzo radicale è stato utilizzato invece il software FINT (Ecorisq- v.1.5) insieme al modello SOSlope (Ecorisq- v.1.5). Per le analisi statistiche ed elaborazione grafici, invece, fogli di calcolo Excel (v.18.0), Statgraphics (v.19.4.02) ed R (v.1.4.1106)

### **2.1. Area di studio**

#### **2.1.1. Inquadramento**

Come trattato nel capitolo 1.3., nell'ottobre del 2018 la tempesta Vaia ha colpito duramente il nord-est Italia e uno dei territori che ha subito più danni è stato quello dell'Agordino, ovvero un'area della Provincia di Belluno che comprende 16 comuni. L'Agordino è costituito dalla Valle del Cordevole (torrente che nasce sul Passo Pordoi a quota 2237 metri e che si immette nel Piave a Pagogna) con le valli laterali dei suoi affluenti (Gaiardo, 1997). Ciò che più caratterizza questo territorio è la presenza di numerosi gruppi montuosi, molti dei quali sono tra i più importanti e noti delle Dolomiti come la Marmolada, le cime d'Auta, il monte Civetta con la Moiazza, il Pelmo e l'Agner. In questo studio è stata considerata l'area compresa nel volo Lidar post evento Vaia (cap. 2.3) raffigurata in figura 8, che si estende per 405.84 km<sup>2</sup> e che comprende i seguenti comuni: Livinallongo del Col di Lana, Rocca Pietore, Colle Santa Lucia, Alleghe, San Tomaso Agordino, Vallada Agordina, Canale d'Agordo, Cencenighe Agordino e Taibon Agordino. Vista l'ampiezza dell'area, è presente una

grande varietà di caratteristiche geomorfologiche, forestali, litologiche e climatiche. Queste caratteristiche verranno individuate, come descritto in seguito, a livello di singola frana.

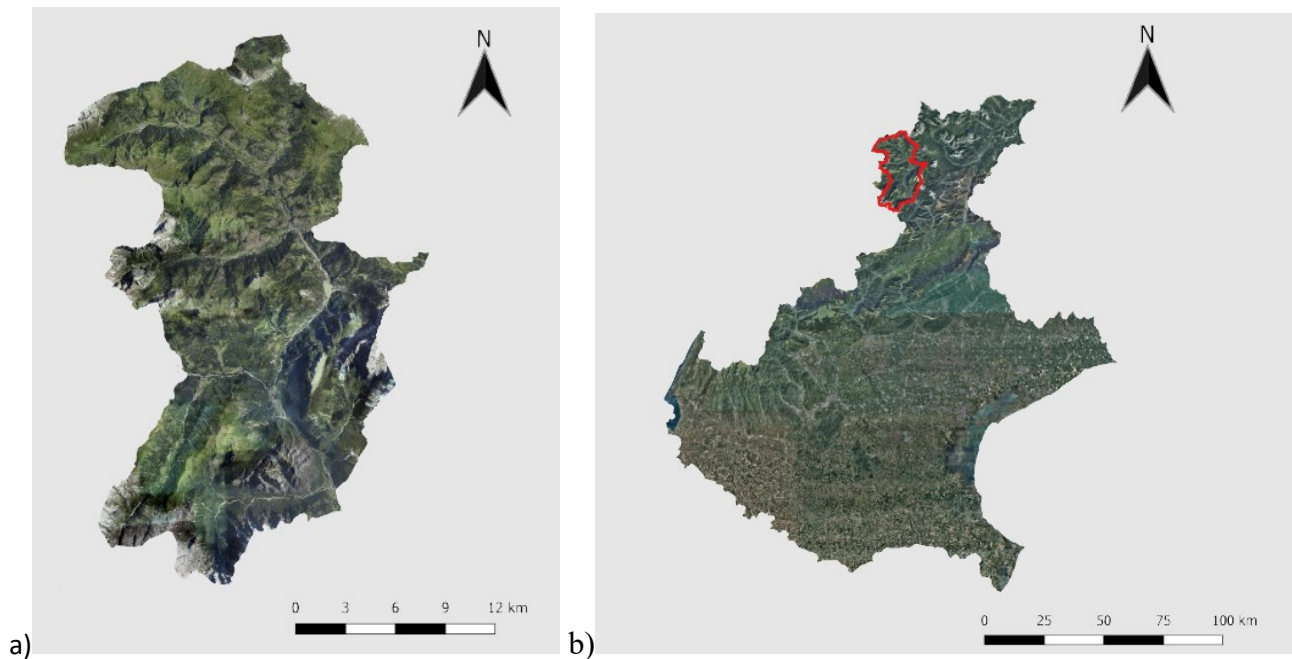


Figura 8: Area considerata in questo studio (a) e sua posizione all'interno del territorio della Regione Veneto (b).

I principali tipi forestali nell'area, ottenute dal Geoportale della Regione Veneto (<https://idt2.regione.veneto.it/>), sono peccete e lariceti (rispettivamente il 41% e 37% delle foreste totali). Sono poi presenti per lo più piceo-faggete, alnete, faggete e acero-frassineti, come rappresentato nella seguente figura.

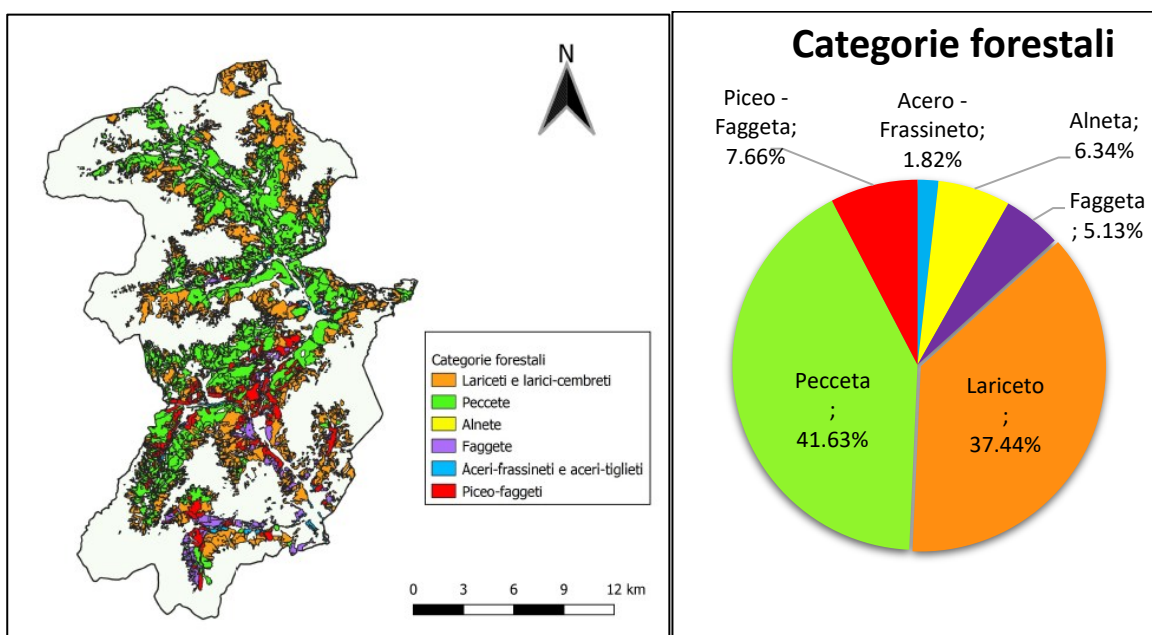


Figura 9: Principali categorie forestali presenti nell'area interessata.

La litologia, all'interno dell'area, è composta per lo più da calcari e calcari dolomitici e successivamente da vulcaniti.

### **2.1.2. Vaia in Agordino**

Il territorio dell'Agordino è stato tra i più colpiti dalla tempesta Vaia, infatti, già secondo la relazione dell'evento pubblicata dall'ARPAV l'11/01/2019 l'area sarebbe stata pesantemente interessata da schianti da vento ad elevata severità su vaste superfici e diffusi fenomeni franosi, in particolare: scivolamenti superficiali, colate e frane di tipo complesso. Tra le principali località interessate dai fenomeni di dissesto censiti durante il periodo emergenziale e ritenuti più rilevanti, numerose appartengono all'area considerata in questo studio:

- Comune di Rocca Pietore: l'intero territorio comunale risulta impattato con l'evidenza delle aree a rilevante dissesto come Sottoguda, Sorarù, Valbona, Palue, Val Livinel, Col di Rocca, Le Grazie, Ru de Pianaz;
- Comune di Vallada Agordina: in particolare nella parte alta del bacino e a monte degli abitati di Todesch e Andrich;
- Comune di Canale d'Agordo: parecchie aree in Val di Gares, che è stata interessata da sovralluvionamento del torrente Liera e numerose colate detritiche dei rii laterali, tra questi Gares, Palafachina, Pissolot, Nongaval, Noghere;
- Comune di Canale d'Agordo: frane in località Pisoliva e Fregona, dissesti lungo il torrente Biois;
- Comune di Taibon Agordino: sovralluvionamento dei torrenti Bordina e Tegnas, colate detritiche e cadute massi lungo la strada della valle di San Lucano che porta a Col di Prà;
- Comune di Cencenighe Agordino: dissesti che hanno comportato disagi ad abitazioni e frane di sponda sul torrente Cordevole con quella rilevante in località Campo;
- Comuni di Alleghe, Colle Santa Lucia, Livinallongo del Col di Lana e San Tomaso Agordino che sono stati interessati da numerosi e diffusi eventi franosi.

La relazione dell'ARPAV riporta inoltre che sul versante idraulico sono avvenuti numerosi fenomeni che hanno conseguentemente causato ingenti danni: esondazioni di torrenti, allagamenti, danni intensi ed estesi ad opere di difesa idraulica longitudinali e trasversali, erosione delle sponde, sovralluvionamento, ostruzione degli alvei, innalzamento del livello dei bacini lacuali, attivazione di movimenti franosi di sponda e di versante, riattivazione ed intensificazione di movimenti gravitativi già in atto, trasporto di materiale alluvionale con cespugli e alberi nei torrenti. Sono state coinvolte abitazioni prossime ai corsi d'acqua, con conseguente evacuazione dei relativi residenti (alcune decine di persone), oltre a strutture produttive, infrastrutture viarie principali e locali e infrastrutture

di rete (ARPAV, 2019). La stazione all'interno dell'area che ha misurato il valore massimo di precipitazioni durante l'intero evento è quella di Biois a Cencenighe CAE con 548.2 mm (terzo tra i valori delle stazioni di tutta la regione), distribuiti in 66.8 mm il 27/10, 192.6 mm il 28/10, 251.6 mm il 29/10 e 37.2 mm il 30/10.

Come già trattato, queste precipitazioni hanno provocato su tutta l'area considerata, tra i numerosi danni, frane diffuse per le quali secondo i dati predisposti nell'ambito del progetto Vaialand 2018 (<https://storymaps.arcgis.com/stories/805a52d1c18a4b4a8e44a30c153d5f39>) sono state rilevate 195 segnalazioni (figure 10 e 11).

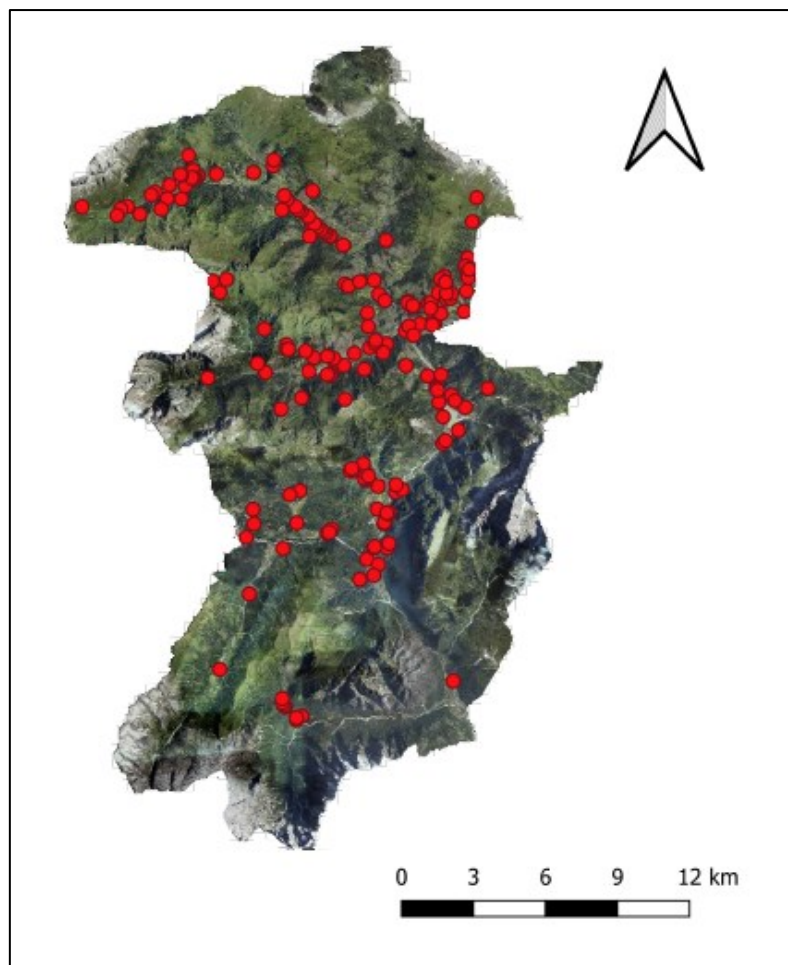


Figura 10: Segnalazioni di frane innescate nell'area considerata, rappresentate dai punti rossi.

Il 29/10 le raffiche di vento, misurate dalla stazione Monti Alti Ornella hanno raggiunto i 139 km/h, provocando elevate percentuali di superficie forestale distrutta, come si può osservare dalla figura 12.



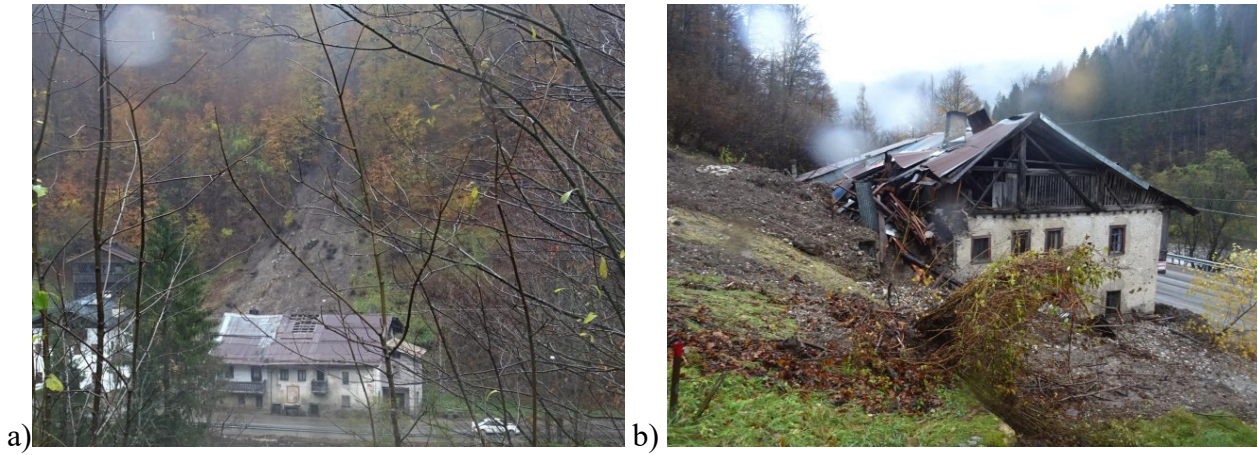


Figura 11: Frana innescata durante la tempesta Vaia (a) e relativi danni provocati (b) (da VaiaLand, 2018).



Figura 12: Versante fortemente colpito da schianti durante la tempesta Vaia (da Regione Veneto, 2022).

## 2.2. Workflow

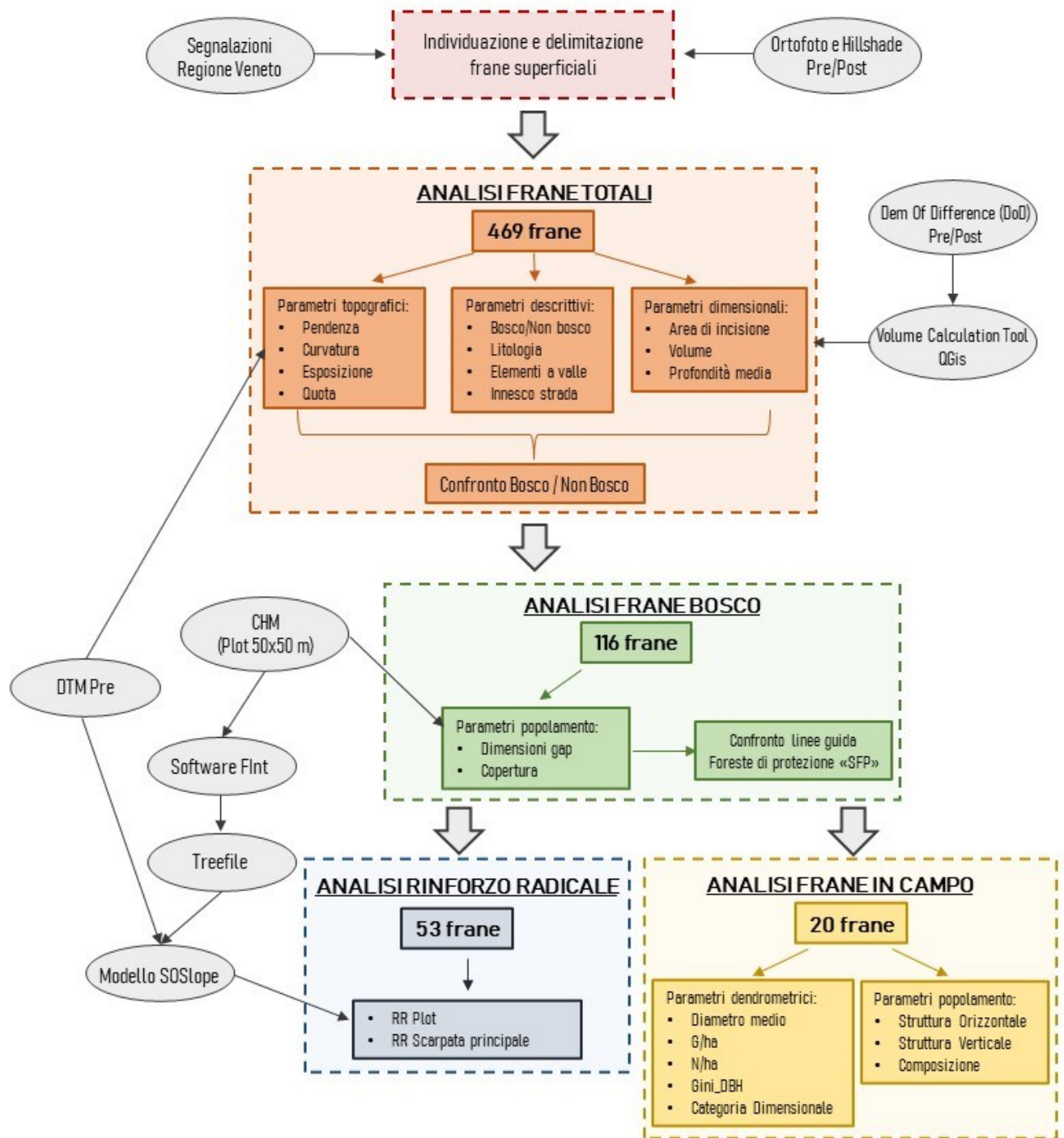


Figura 13: Workflow con le analisi effettuate in questo studio.

### 2.3. Dati telerilevati utilizzati

In questo studio, per l'individuazione delle frane, la loro delimitazione e la misurazione delle loro caratteristiche, sono stati utilizzati GIS insieme ai layer riportati nella tabella 4.

Tabella 4: Remote sensing data utilizzati per questo studio.

Layer	Sorgente	Risoluzione	Data
Ortofoto pre Vaia (1)	Geoportale Regione Veneto	0.2 m	2015
Ortofoto pre Vaia (2)	Geoportale Regione Veneto	0.2 m	2018
Ortofoto post Vaia	Volo Lidar - AVEPA	0.2 m	2019
DTM e CHM pre Vaia (1)	Volo Lidar MATTM – contratto 140 e 145	1 m (~1.5 pt/m <sup>2</sup> )	2010
DTM e CHM pre Vaia (2)	Volo Lidar Regione Veneto	1 m (~12 pt/m <sup>2</sup> )	2015
DTM e CHM post Vaia	Volo Lidar - AVEPA	0.5 m (~25 pt/m <sup>2</sup> )	2019

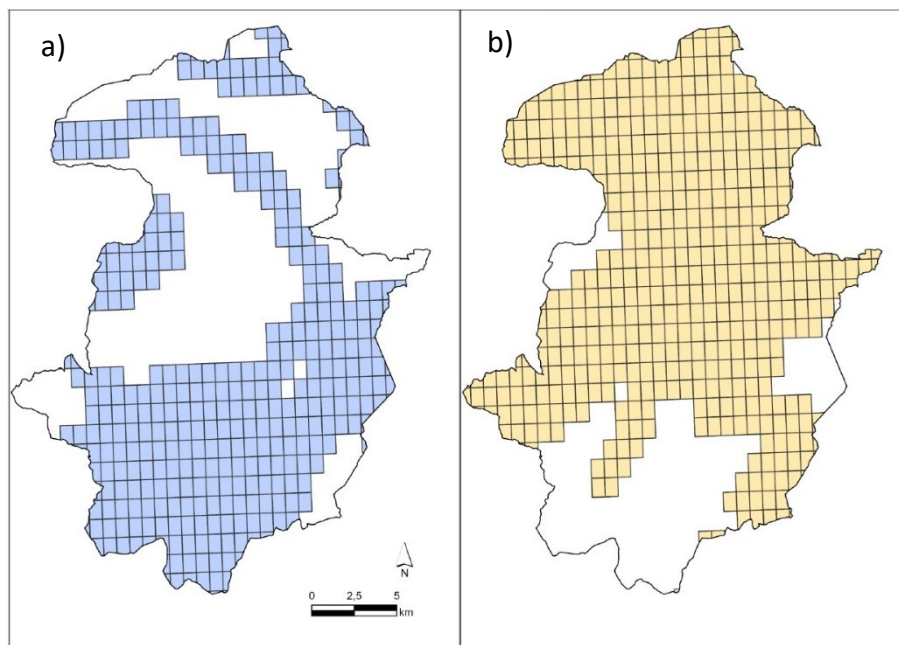


Figura 14: Copertura volo Lidar pre Vaia a) 2010 (MATTM) e b) 2015 (Regione Veneto).



## 2.4. Mappatura e caratterizzazione delle frane

### 2.4.1. Individuazione frane

In questa fase si sono utilizzate le ortofoto per studiare l'area considerata ed individuare le frane presenti, in modo analogo a quello proposto da Zieher et al. (2016). Come prima cosa è stata ottenuta l'ortofoto dell'area considerata post-evento e quella pre-evento (2018) insieme ai DTM (Digital Terrain Model) pre e post Vaia, da questi ultimi sono stati ricavati tramite QGIS i layers hillshade (ossia rappresentanti l'ombreggiatura). Tutti questi layers sono stati fondamentali per studiare l'area (suddivisa tramite un grigliato ed analizzando zone di circa 60 ha una alla volta, così da avere un ordine da seguire evitando di tralasciare delle aree), individuando per prima cosa le differenze tra ortofoto pre e post evento (in particolare a livello cromatico, come in figura 15), aiutandosi eventualmente con i layers hillshade per le zone con una minore visibilità nella foto aerea (figura 16). Questi ultimi layers si sono dimostrati molto utili, soprattutto per individuare le aree di incisione in zone con presenza di copertura forestale e per aree risultanti ombreggiate nell'ortofoto dove non era possibile osservare ed analizzare il terreno. In alcuni casi è stato anche utile eseguire un confronto con l'ortofoto del 2015, che è stata scattata con differenti condizioni di luce e che permette quindi una migliore visibilità in alcune zone. Anche le segnalazioni fornite da VaiaLand e redatte dalla Regione Veneto, sono state utili per una primaria individuazione delle principali frane che hanno interessato infrastrutture e che fossero in prossimità di centri abitati, ma che non comprendevano però quelle innescate in zone più remote rispetto ad essi, le quali non hanno determinato danni diretti.

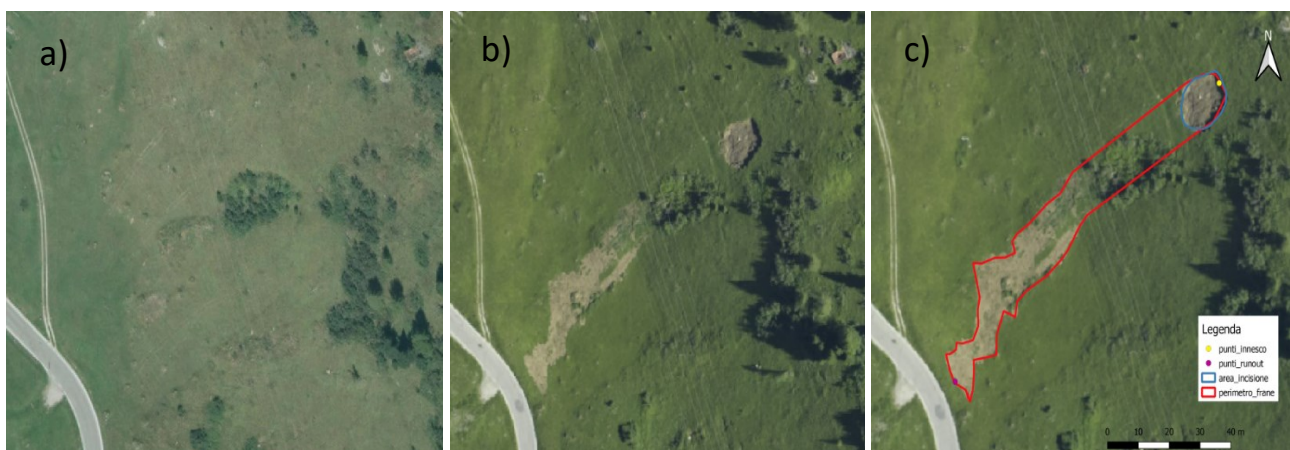


Figura 15: Individuazione e delimitazione della frana (c) tramite il confronto delle ortofoto a) pre e b) post evento.



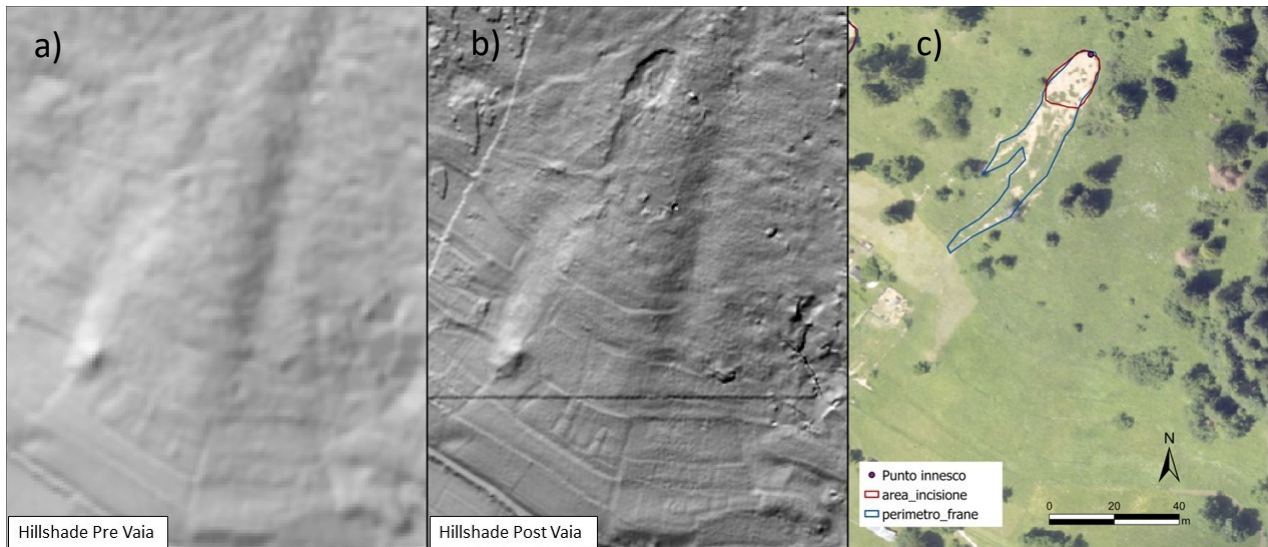


Figura 16: Individuazione dell'area di incisione (c) della frana tramite il confronto tra layer hillshade pre (a) e post (b) evento.

Per ogni frana, tramite QGIS ed ARCGIS, sono stati creati layers vettoriali rappresentanti i punti di innesco (punto centrale della scarpata di frana), di “runout”, ossia il punto più lontano dall'innesco nell'area di deposito, i poligoni rappresentanti l'area di incisione (area in cui si è innescato il fenomeno e dove si è distaccato il materiale, definibile in letteratura come “scar area”) ed il perimetro della frana (area totale interessata dall'incisione e dal trasporto di materiale).

## 2.4.2. Calcolo dei parametri principali

In questa fase sono stati calcolati, sfruttando i software GIS a partire da ortofoto e DTM, i parametri principali ovvero quelli topografici e descrittivi degli eventi franosi. Sono dunque state definite le quote delle diverse frane, più precisamente quelle relative ai punti di innesco, con il software QGIS tramite lo strumento “campiona valori raster”. Per ottenere le pendenze ed esposizioni, invece, sono stati realizzati dei buffer (tramite l'omonimo strumento) di forma circolare aventi 3 metri di raggio intorno ai punti di innesco. Con lo strumento “statistiche zonali”, inserendo come input i raster (esposizione e pendenze, ricavati sempre tramite QGIS a partire dal DTM) ed i poligoni relativi ai buffer, sono stati calcolati i valori mediani presi in considerazione. Osservando singolarmente tutte le frane, sfruttando l'ortofoto ed il layer hillshade post Vaia, si è determinato se queste si fossero innescate in prossimità di strade (di tutte le tipologie) e se avessero interessato elementi a valle (situati entro il punto di runout) quali, ad esempio, reticolo idrografico o manufatti antropici vari. Per determinare la litologia, si è sfruttato il layer messo a disposizione dal Geoportale della Regione Veneto (scala 1: 250.000) e, per esprimere i risultati in termini di densità oltre che di frequenza, sono state calcolate le aree relative ai diversi gruppi litologici, al netto di superfici sulle quali non possono

innescarsi frane. Il calcolo delle superfici nette è stato infatti effettuato sottraendo alla superficie totale considerata, sulla base della “Land Cover Map 2018” della Regione Veneto, le superfici rocciose e i corpi idrici. Inoltre, si è optato per effettuare un ulteriore filtraggio delle superfici in base anche alla pendenza (Bebi et al., 2019, Rickli et al., 2019), considerando le superfici comprese tra 15° e 60° di inclinazione.

### 2.4.3. Profondità, Area, Volume

Per ogni frana superficiale sono state valutate tre variabili ascrivibili a parametri caratterizzanti l'intensità del fenomeno: profondità (m), area (m<sup>2</sup>) e volume (m<sup>3</sup>). Per la stima di questi tre parametri ci si è basati sul calcolo del DoD (Dem of Difference) relativo alla differenza fra i DTM post e pre-evento come effettuato da Zieher et al., (2016). Tale raster permette infatti di valutare le aree in cui vi è stata erosione o le zone in cui il sedimento si è depositato (Figura 17). Poiché i DTM pre e post presentano una risoluzione originale differente (rispettivamente 1 m e 0.5 m) è stata precedentemente effettuata un'operazione di ricampionamento del DTM post attraverso un'interpolazione bilineare tramite ArcGis. Il parametro relativo all'area di incisione è stato in realtà precedentemente ottenuto attraverso la fase di mappatura delle frane (cap. 2.4.1) ma è stato poi utilizzato il DoD per correggere o ridefinire gli effettivi perimetri delle aree di incisione. La profondità media è stata invece conseguentemente calcolata per ogni frana attraverso lo strumento di “Statistiche Zonali” applicato al DoD all'interno dell'area di incisione. In ultimo, al fine di ottenere una stima del volume mobilitato per ogni frana, è stato utilizzato il plugin di QGis “Volume Calculation Tool” a partire dal DoD ritagliato per le aree di incisione.

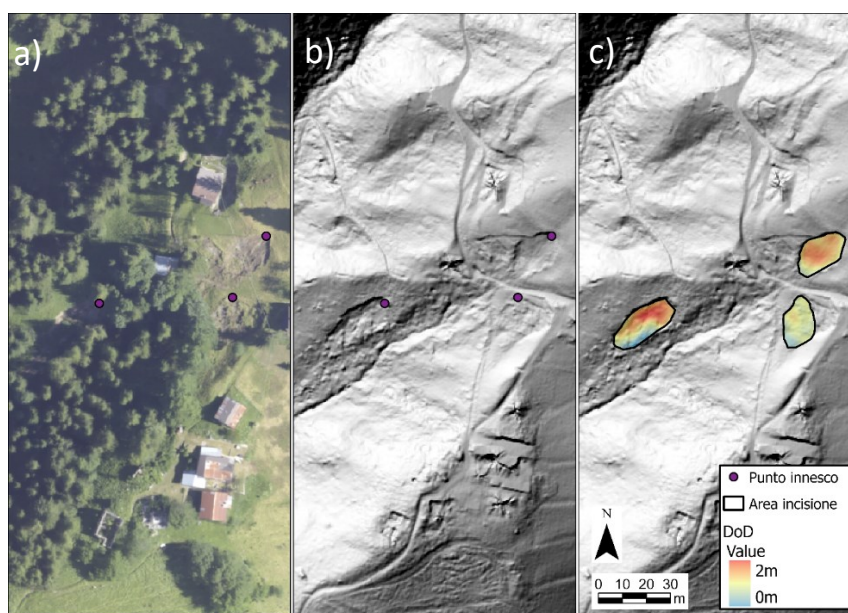


Figura 17: Individuazione dell'area della frana ombreggiata nell'ortofoto a) grazie all'utilizzo dell'hillshade b) e stima della profondità delle frane tramite DoD c).

## 2.4.4. Curvatura

Anche sulla base dell'esperienza di altri autori nell'ambito del rilevamento di frane superficiali (Rickli e Bucher, 2003; Rickli et al., 2008), si è scelto di includere tra le informazioni di interesse da valutare anche quella relativa alla curvatura del terreno. Tale parametro può essere considerato come un indicatore morfologico per il comportamento idrologico del pendio. Morfologie concave, infatti, tendono ad accumulare deflusso mentre morfologie convesse tendono a far decelerare il flusso d'acqua. Il raster della curvatura è stato ottenuto a partire dal DTM pre attraverso ArcGis. Nello specifico, sono stati stimati due tipi di curvature: planare, trasversale al pendio (valori negativi indicano morfologie concave mentre valori positivi indicano morfologie convesse), e di profilo, longitudinale al pendio (valori positivi indicano morfologie concave mentre valori negativi indicano morfologie convesse). Per entrambi i casi, valori che tendono a zero indicano morfologie lineari. Ad ogni frana è stata quindi in primis associata una morfologia di curvatura planare e di profilo. La combinazione delle due ha infine permesso di determinare un'unica morfologia di curvatura (figura 18).










curvature		profile in the line of slope		
		concave	flat	convex
transverse profile	convex	1 	2 	3 
	flat	4 	5 	6 
	concave	7 	8 	9 

Figura 18: Classificazione delle 9 diverse morfologie di curvatura, date dalla combinazione di quella planare e di profilo.

## 2.4.5. Definizione frane bosco/non bosco

Per ogni frana è stato inoltre definito se esse ricadessero in superfici boscate o meno. Secondo la normativa regionale veneta (Dgr n. 1319 del 23 luglio 2013) sono riconosciute a bosco quelle superfici aventi superficie minima di 2000 m<sup>2</sup>, larghezza media superiore ai 20 m e copertura non inferiore al 20%. Poiché la Carta Forestale disponibile sul Geoportale della Regione Veneto non risulta essere aggiornata per le suddette finalità di utilizzo e si basa sui parametri di definizione di bosco antecedenti a quelli attuali, si è reso necessario creare un layer apposito delimitante le superfici a bosco. Per creare il layer bosco si è quindi utilizzato il CHM pre Vaia; attraverso una finestra mobile da 20x20 m si è valutata la copertura considerando come bosco i pixel con valore superiore ai 5 m. In seguito alla poligonizzazione del raster classificato, si è proceduto attraverso un'operazione di

“filtraggio” eliminando i poligoni a bosco e gli inclusi non boscati di superficie inferiore a 2000 m<sup>2</sup>. Si è dunque registrato se le frane ricadessero o meno all’interno del layer creato.

## 2.5. Frane in bosco

In modo analogo a quello adottato per la litologia, si è proceduto ad individuare le diverse categorie di foreste, caratterizzanti le superfici forestali nelle quali sono avvenute le frane superficiali. Il layer delle categorie è stato ottenuto dal Geoportale della Regione Veneto ed è stata calcolata, anche in questo caso, la superficie netta dei singoli tipi forestali. Per ogni frana è stata tracciata una retta di direzione passante per il punto di innesco e, intorno a questa linea, è stato realizzato un buffer orientato in direzione della propagazione principale della frana, di dimensioni 50x50 metri (strumento “buffer” di QGIS) con il punto di innesco situato al suo centro. Si è optato per considerare una superficie complessiva di 2500 m<sup>2</sup> poiché essa rappresenta circa la superficie minima di riferimento delle unità forestali (solitamente 2000 m<sup>2</sup>) e, di conseguenza, unità minima omogenea anche dal punto di vista gestionale. Sempre valutando una frana per volta, si è scelto se considerare il layer CHM (Canopy Height Model) pre o post Vaia in quanto nella seconda fase della tempesta, caratterizzata da forti venti, sono avvenuti numerosi schianti che hanno provocato una modifica della copertura e, quindi delle caratteristiche strutturali del popolamento rispetto alle condizioni in cui si è effettivamente innescato il fenomeno. In tal caso, è stato opportuno considerare il CHM pre-evento. Per questo passaggio si è prestata attenzione a non considerare quelle frane in cui, all’interno del buffer 50x50, sono avvenuti schianti o tagli selvicolturali in un periodo di tempo compreso tra i due voli Lidar. I CHM, in base alla scelta fatta nel precedente passaggio, sono quindi stati ritagliati con i buffer 50x50 ed è stata stimata la copertura forestale riclassificando il raster dando valore 1 nei pixel in cui l’altezza è maggiore di 5 metri e 0 negli altri (strumento “riclassifica raster” di QGIS). Per determinare la copertura percentuale nei buffer intorno alle singole frane si è calcolato il rapporto percentuale tra il numero di pixel (ricavato con lo strumento “statistiche zonali” di QGIS) con valore 1 ed il numero di pixel totali presenti nel buffer. Per quanto riguarda i gap (aree prive di copertura forestale), invece, i pixel con valore 0 sono stati riconvertiti in poligoni successivamente “puliti” da eventuali piccoli gap (inferiori ai 10 metri quadrati), come rappresentato in figura 19. Dato che molti risultavano uniti tra loro, si è preferito misurare “manualmente” su QGIS (strumento “misura area”) l’area di quelli più importanti presenti all’interno dei singoli plot (buffer 50x50), insieme alla loro lunghezza (parallela alla direzione della frana, con lo strumento “misura linea”) e larghezza. I dati così ottenuti sono stati confrontati con i parametri del manuale “SELVICOLTURA NELLE FORESTE DI PROTEZIONE Esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e in Valle d’Aosta” del 2006 (SFP), descritto nel capitolo 1.2.2. Secondo tali linee guida, la copertura dovrebbe essere

maggiore del 40% (quella ideale maggiore del 60%), con aperture di lunghezza inferiore a 20 metri (condizioni ideali 15m) e superficie minore di 600 m<sup>2</sup> (condizioni ideali 400 m<sup>2</sup>).

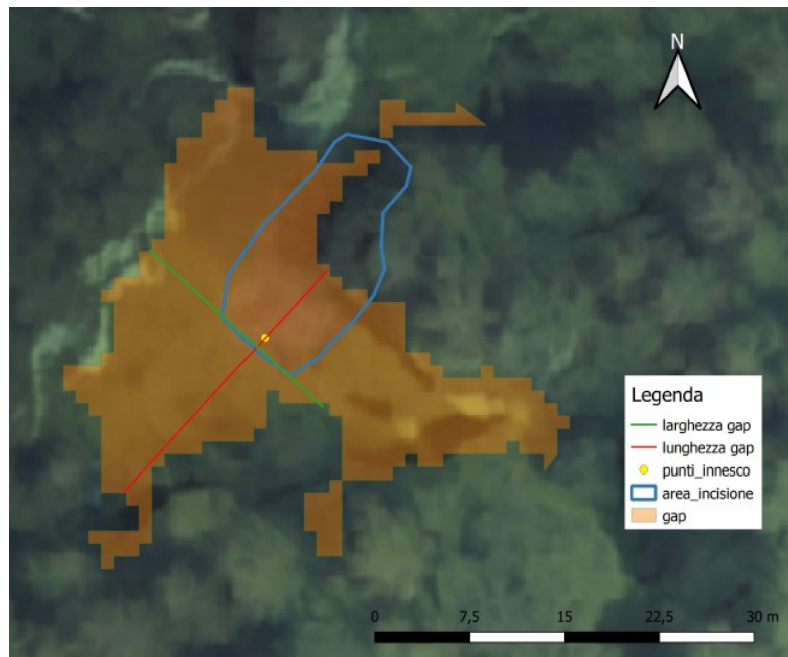


Figura 19: Superficie del gap ricavata con QGIS e misura della larghezza e lunghezza.

## 2.6. Stima del rinforzo radicale

Sono state individuate 53 frane sulle quali valutare il rinforzo radicale laterale. Queste sono naturalmente state selezionate tra quelle in bosco, in particolare afferenti alle categorie forestali relative a peccete, faggete e piceo-faggete. Si è rivelata necessaria questa selezione in funzione delle categorie forestali, in quanto il modello utilizzato SOSlope (Cohen e Schwarz, 2017) permette la modellazione del rinforzo radicale solamente per due specie prevalentemente presenti nell'area di studio: abete rosso e faggio.

### 2.6.1. Software FINT

Il software FINT è stato fondamentale per ottenere come output il "treefile" della posizione degli alberi e dei rispettivi diametri, necessario successivamente al calcolo del rinforzo radicale, in quanto viene richiesto come input da SOSlope (come descritto nel capitolo 2.6.2.). Come definito da Dorren (2017), FINT (Find Individual Trees, figura 20) è uno strumento che calcola la posizione di alberi dominanti e co-dominanti a partire da modelli di superficie ad alta risoluzione. Il software, in particolare, richiede come dato di input il layer CHM (Canopy Height Model), che è stato precedentemente ritagliato tramite QGIS sui buffer 50x50 per le singole frane. Viene inoltre richiesto di inserire la funzione ipsometrica inversa per il calcolo del DBH (diametro a petto d'uomo) della

specie di riferimento (abete rosso o faggio), nel presente caso l'equazione è stata inserita manualmente e ricavata distintamente per faggio e abete rosso (specie scelta in base a quella più presente nel buffer, osservata tramite ortofoto nel caso delle piceo-faggete). Le curve ipsometriche inverse, relative alle due specie, sono state ottenute sulla base di un dataset di rilievi dendrometrici passati nell'area dell'Agordino. La scelta della funzione di regressione ottimale è stata effettuata tramite Statgraphics, inoltre, è stato scelto di selezionare un'altezza minima degli alberi pari a 8 metri poiché individui più piccoli presentano un effetto minimo di rinforzo radicale e possono quindi essere trascurati. Si è poi scelto di utilizzare un valore di 20% di varianza randomica dei valori di DBH.

DBH per abete rosso:

$$DBH = \exp(1.20274 + 0.463041 * \text{sqrt}(H)) \quad (2)$$

DBH per faggio:

$$DBH = (1.36153 + 0.186121 * H) ^2 \quad (3)$$

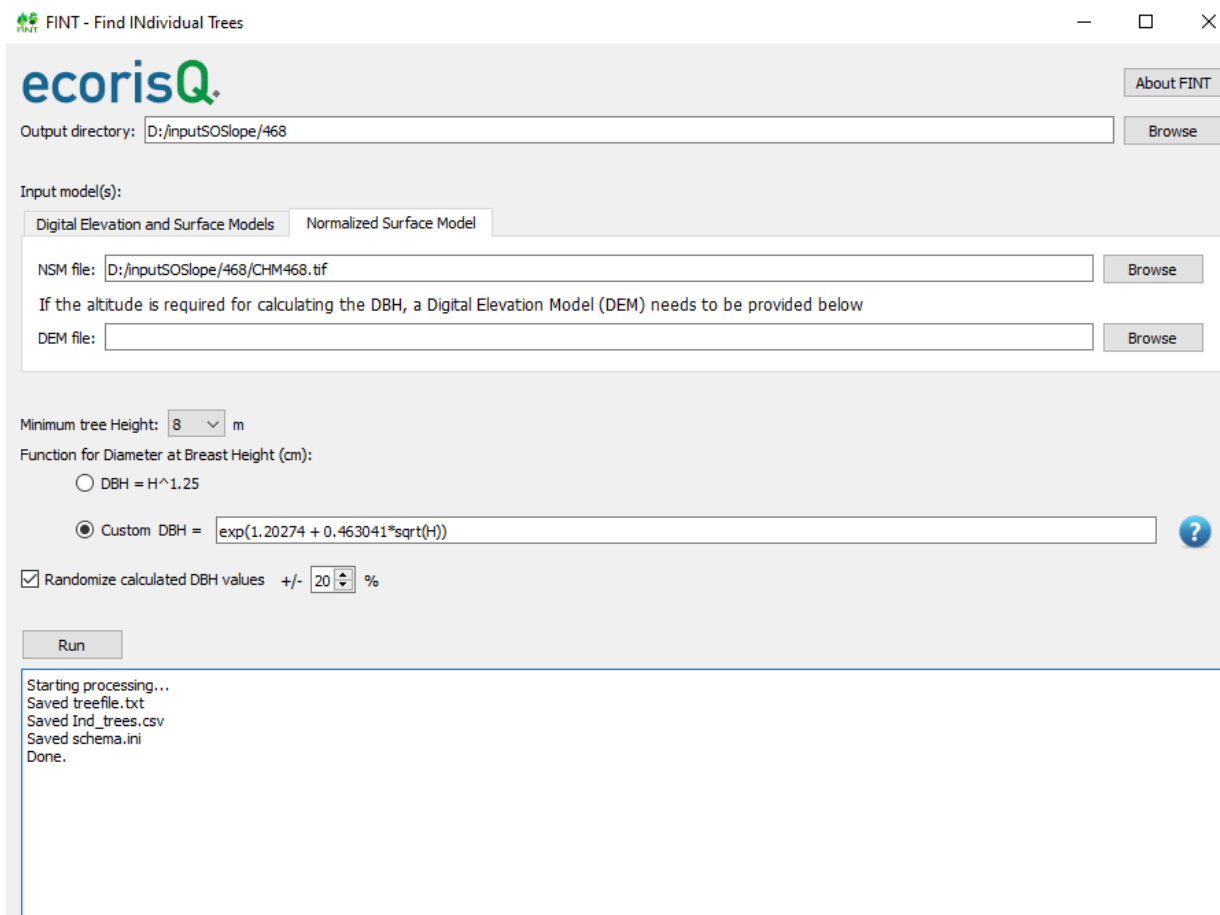


Figura 20: Interfaccia del software FINT con inserimento della funzione per il calcolo del DBH dell'abete rosso.



## 2.6.2 Modello SOSlope

Per ottenere la distribuzione dei valori di rinforzo radicale, dato dalle diverse strutture forestali e specie arboree nei plot 50x50 e lungo le scarpate di frana, è stato utilizzato il modello SOSlope, il quale è un modello idromeccanico di stabilità dei pendii, sviluppato a partire dal 2009 e proposto nel 2017 (Cohen e Schwarz, 2017), che calcola il fattore di sicurezza rappresentato da blocchi collegati tra loro attraverso legami, ovvero forze meccaniche che agiscono a causa della matrice di radici e terreno (Cohen et al., 2009; Schwarz et al., 2012a).

La distribuzione delle forze e la deformazione dell'area di frana sono simulate tenendo conto di vari fattori come la topografia, le proprietà del suolo, le condizioni della foresta e gli scenari idrologici (Cohen e Schwarz, 2017). Il rinforzo delle radici sotto carichi di trazione e compressione è calcolato con il RBMw (Root Bundle Model) (Schwarz et al., 2013; Schwarz et al., 2015) ed il modello è dunque in grado di valutare la stabilità del pendio ed il contributo del rinforzo radicale. Questo avviene tramite il rapporto tra forze resistive e attive: l'effetto del rinforzo radicale basale viene considerato come una forza resistiva, mentre quello laterale come una forza attiva (Murgia et al., 2022). Inizialmente, le forze di legame tra i blocchi sono impostate a zero, all'aumentare delle precipitazioni sul pendio aumenterà di conseguenza la massa e diminuirà la resistenza al taglio del terreno. Ad ogni passo temporale, il fattore di sicurezza viene ricalcolato per ogni blocco utilizzando un bilancio delle forze e se risulta inferiore ad uno, per uno o più blocchi, questi vengono conseguentemente spostati nella direzione della forza locale di una quantità predefinita (di solito 0.1 mm) ed il fattore di sicurezza viene ricalcolato per tutti i blocchi. Infatti, a causa del movimento relativo tra quelli che si sono spostati e quelli che sono rimasti fermi, le forze di legame meccanico non sono più nulle ed il bilanciamento delle forze cambia, innescando quindi una redistribuzione istantanea delle forze nell'intero pendio. Questa operazione viene ripetuta finché tutti i blocchi non sono stabili (fattore di sicurezza maggiore o uguale a 1), il sistema raggiunge un nuovo equilibrio, oppure se alcuni blocchi hanno ceduto (lo spostamento è maggiore di un valore prestabilito, di solito qualche metro) innescando una frana. Le variazioni della densità delle radici con la profondità (ad esempio, Bischetti et al., 2005) e la competizione per le risorse tra i singoli alberi non vengono prese in considerazione da questo modello e, per semplicità, SOSlope assume che tutti gli alberi appartengano alla stessa specie, ipotizzando una relazione allometrica lineare tra le dimensioni del tronco e la densità delle radici, un decadimento a legge di potenza della densità delle radici con la distanza dal tronco e una diminuzione logaritmica della densità delle radici con l'aumento del loro diametro.

Il modello può essere utilizzato per determinare questioni fondamentali, poste anche tra gli obiettivi di questa tesi, quali il ruolo della struttura della foresta (ad esempio dimensioni degli alberi e distanza

tra di essi), della distribuzione delle radici e delle loro proprietà meccaniche sui meccanismi di innesco delle frane superficiali e per valutare quindi la stabilità dei versanti (Dorren e Schwarz, 2016). A scala di bacino idrografico l'uso del modello SOSlope può essere utile per studiare gli effetti della vegetazione sui processi di stabilità dei pendii a breve e a lungo termine: a lungo termine, la resistenza delle radici può variare di diversi ordini di grandezza (Vergani et al., 2016) e la stima della stabilità dei pendii è necessaria per la riduzione del rischio ed il controllo del bilancio sedimentario. Nel breve periodo, invece, le stime dei fattori di sicurezza per i pendii radicati forniscono dati importanti per la valutazione del rischio in bacini montani boscati.

Il modello richiede diversi dati di input che consistono in due raster ASCII (formato ESRI), i quali definiscono la topografia (DEM) e l'area contribuyente. Per ognuna delle 53 frane questi input sono stati ottenuti tramite il software QGIS (ovvero due differenti raster ritagliati sul buffer 50x50 realizzato in precedenza): il DTM precedente l'evento Vaia e l'area contribuyente, inoltre è stato utilizzato il file della posizione degli alberi (ottenuto tramite FINT). Dovendo considerare una frana alla volta, si è anche proceduto al tracciamento della sua scarpata, con un layer vettoriale (tipo di geometria polilinea), osservando l'ortophoto e l'hillshade nell'area di incisione. Si sono quindi inseriti, una frana per volta, i dati di input specificando anche la specie forestale maggiormente presente all'interno del buffer (figura 21).

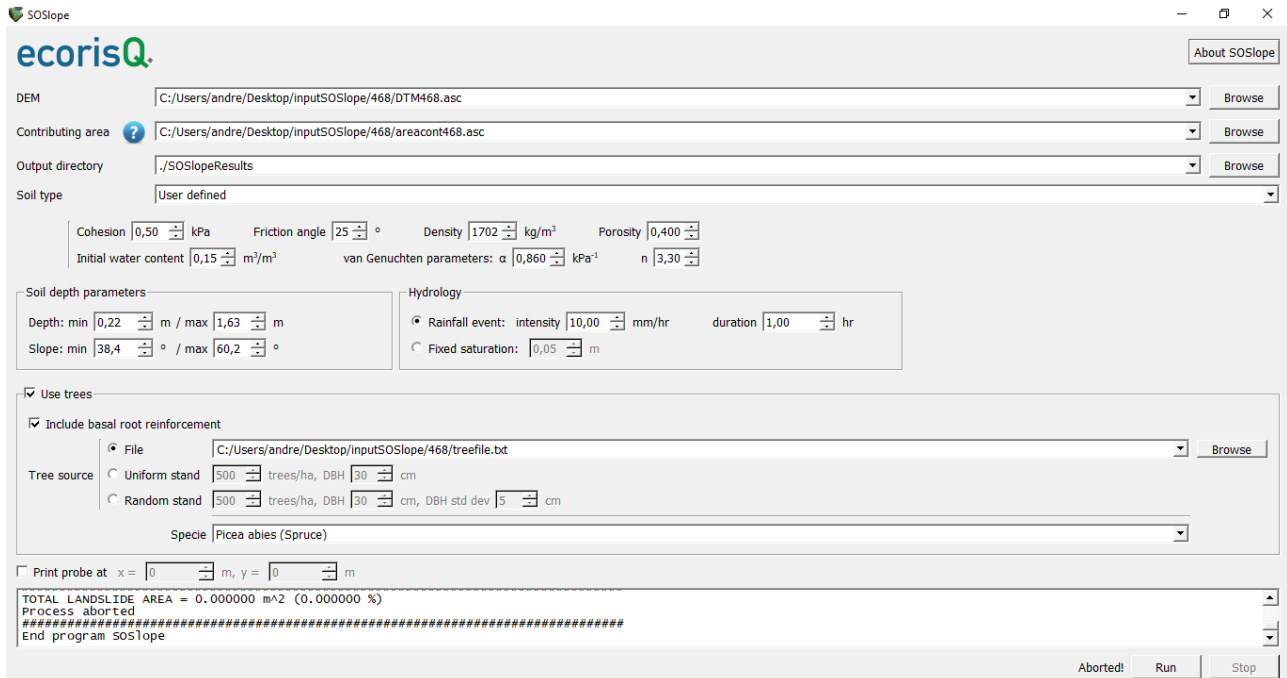


Figura 21: interfaccia del software SOSlope con i parametri utilizzati.

Dei diversi output generati dal modello, si è preso in considerazione il parametro “Max\_root\_tension\_potential” relativo ad ogni frana, corrispondente al valore di rinforzo radicale a tensione (figura 22b). Il raster ottenuto è stato poi convertito in punti tramite lo strumento “Da pixel



raster a punti”. Per quanto riguarda le scarpate di frana, precedentemente tracciate, sono state anch’esse trasformate in punti in corrispondenza dei pixel del raster, tramite lo strumento “Generare punti (centroidi di pixel) lungo la linea”. Si sono dunque ricavati i valori di rinforzo radicale con lo strumento “Raster valori campione” ed i file così ottenuti, relativi a plot e scarpate, sono stati esportati come file Excel.

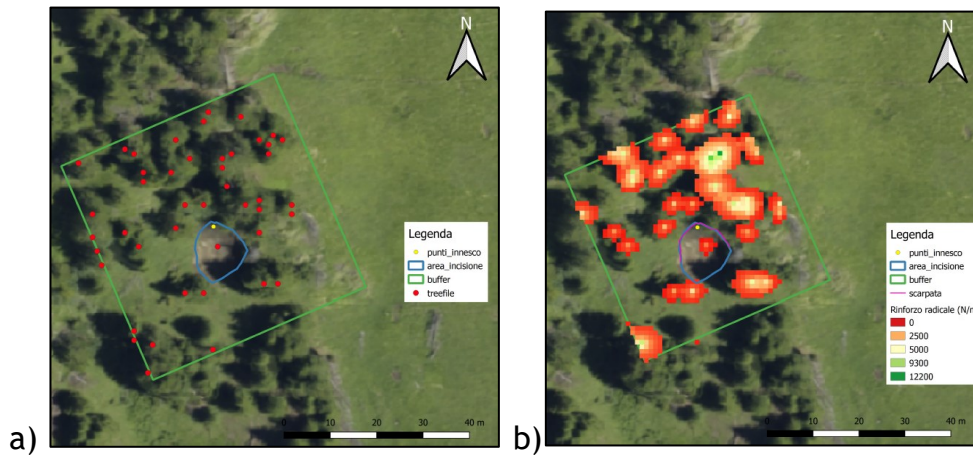


Figura 22: rappresentazione degli output della posizione degli alberi ottenuto con FINT (a) e del rinforzo radicale con SOSlope (b) all’interno dei buffer.

## 2.7. Rilievi frane di campo

Si è scelto di effettuare anche dei rilievi in campo, in un campione ridotto di frane in bosco, al fine di ottenere i parametri dendrometrici e di popolamento e determinare come questi possano influenzare gli inneschi e la magnitudo delle frane. I rilievi sono stati eseguiti tra luglio e agosto 2022, a più di tre anni e mezzo di distanza dall’innesco dei fenomeni. Le frane sulle quali sono stati eseguiti i rilievi sono state scelte tra quelle in bosco, che non avessero alterato la struttura del popolamento pre-evento e il più possibile accessibili (figura 23).

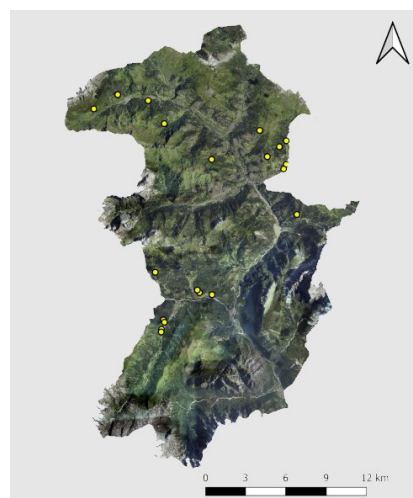


Figura 23: Distribuzione delle 20 frane scelte (punti gialli) sull’area considerata.

Prendendo come riferimento i precedenti studi di Moos et al. (2016) e Rickli et al. (2002) ed i parametri da loro considerati, si è realizzata una scheda di campo, riportata in allegato, nella quale sono state numerate le frane con un numero progressivo da 1 a 20 e che è stata fondamentale per la raccolta dei seguenti dati stimati:

- Tipologia: traslativa se il profilo del terreno risultava paragonabile ad un piano inclinato, altrimenti rotazionale;
- Condizione attuale: inalterata o sistemata, presenza di rinnovazione erbacea e segni di erosione;
- Curvatura del terreno;
- Presenza di disturbi: schianti da vento o neve, bostrico, caduta massi o altro;
- Copertura percentuale;
- Struttura verticale: monoplana, multiplana o biplana;
- Struttura orizzontale (da Provincia Autonoma di Trento, 2008):
  - Regolare: alberi distribuiti regolarmente, senza particolari tendenze;
  - Lacunosa: intercalazione casuale di tratti non coperti da bosco con tratti a copertura colma o scarsa, cosicché la copertura d'insieme non è regolare;
  - A gruppi: alberi che si aggregano a gruppi, al loro interno con copertura più o meno colma, mentre tra aggregati si notano aree prive di copertura.
- Fase di sviluppo (solo per monoplane): spessina, perticaia, adulto, maturo;
- Composizione: percentuale delle diverse specie presenti;
- Tessitura (solo per multiplane): grossolana o fine;
- Presenza di rinnovazione: assente/scarsa o buona/abbondante (figura 24);
- Eventuali annotazioni.



Figura 24: presenza di rinnovazione abbondante, sviluppata all'interno dell'area di incisione di una frana.

Queste osservazioni sono state eseguite su un plot di 50x50 metri intorno al punto di innesco (come quello eseguito su GIS), misurato tramite telemetro TruPulse (TruPulse® 360°R – Laser Technology, figura 25a). Sempre tramite lo stesso strumento, si è misurata la distanza verticale per determinare la profondità media (figura 25b) ed è anche stato utilizzato per individuare le 5 piante più vicine al punto di innesco (situate a monte). Infine, sempre tramite TruPulse, è stato realizzato un altro plot di dimensioni 25x25 metri (segnato con l’ausilio di paline, vedi figura 26) a monte del punto di innesco ed orientato in direzione della frana. All’interno di tale area è stato eseguito un cavallettamento totale (soglia di cavallettamento pari a 7.5 cm) ottenendo i DBH (diametri a petto d’uomo) misurati con un cavalletto dendrometrico.



Figura 25: Misurazione in campo della profondità della frana tramite TruPulse.

Dai diametri ottenuti, le piante sono state suddivise in 3 categorie dimensionali, in maniera analoga a quella adottata dall’ “Inventario Dendrometrico del Trentino”: la categoria di piante piccole (PP) aventi diametro inferiore o uguale a 27.5 cm, le medie (PM) con diametro tra 27.5 e 47.5 cm (compreso) e le grandi (PG) con diametro maggiore di 47.5 cm. Per ciascuna delle 20 frane è stata determinata la categoria rappresentativa del plot 25x25, considerando quella con maggiore valore dato dal rapporto percentuale tra la sommatoria delle aree basimetriche delle piante delle singole categorie ( $G_x$ ) e l’area basimetrica totale all’interno del plot ( $G$ ):

$$\%Px = \frac{G_x}{G} * 100 \quad (4)$$

Sempre a partire dai diametri, sono stati calcolati il diametro medio (equazione 5) ed il GINI index DBH (equazione 6) che misura la disuguaglianza della distribuzione ed è un numero compreso tra 0 e 1 per il quale a valori bassi corrisponde una distribuzione più omogenea.

$$Dm = \sqrt{\frac{4G}{\pi N}} \quad (5)$$

Dove  $G$  è l’area basimetrica totale e  $N$  il numero di piante.



$$GINI_{DBH} = \frac{\sum_j^n (2j - 1 - n)x_j}{\sum_j^n x_j (n - 1)} \quad (6)$$

Dove  $j$  è il numero d'ordine crescente di  $x$ ,  $x$  il diametro (DBH) in centimetri e  $n$  il numero di piante totali rilevate.

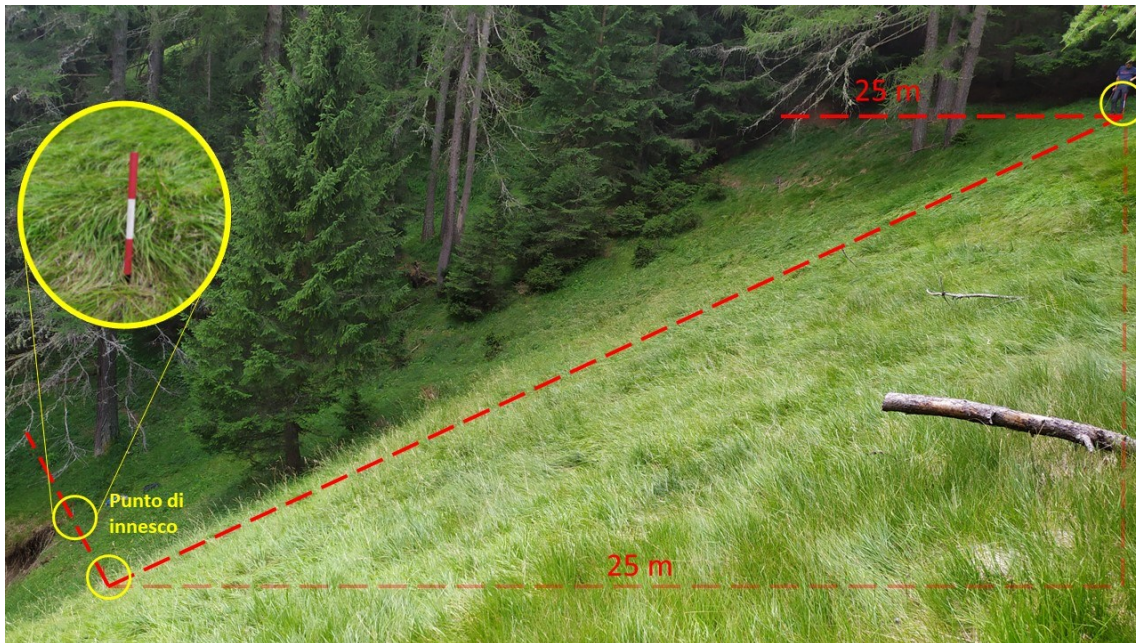


Figura 26: delimitazione in campo dei plot 25x25 tramite utilizzo di paline.

## 2.8. Analisi statistiche

Per le analisi statistiche sono stati utilizzati i software Excel e Statgraphics ai fini di ottenere i grafici relativi ai risultati ottenuti e per determinare la presenza o meno di significatività nella differenza tra le frane presentanti diverse caratteristiche. In particolare, tramite Statgraphics è stato eseguito il Test W di Mann-Whitney (Wilcoxon) per confrontare in due campioni le loro mediane e verificare l'ipotesi nulla che queste siano uguali. Il test è costruito combinando i due campioni, ordinando i dati dal più piccolo al più grande e confrontando i ranghi medi dei due campioni nei dati combinati. Il test di Kruskal-Wallis, invece, verifica l'ipotesi nulla che le mediane relative a più di due campioni siano uguali. In questo caso i dati di tutte le colonne vengono prima combinati e distribuiti in ranghi dal più piccolo al più grande, il rango medio viene poi calcolato per i dati di ciascuna colonna. Se il P-value risultante dai test è minore di 0.05, allora c'è una differenza statisticamente significativa tra le mediane con un livello di confidenza del 95.0%.

Per lo studio delle frane in campo si è optato invece per un'analisi multivariata. Nello specifico, è stata effettuata un'Analisi delle Componenti Principali (PCA), in cui le variabili quantitative sono state considerate come variabili attive per la costruzione delle componenti, mentre le variabili categoriche sono state inserite come variabili supplementari (Feuillet et al., 2012; Pages, 2015).

### 3. Risultati

#### 3.1. Frane totali

All'interno della zona di interesse il numero totale di frane innescate durante la tempesta Vaia, con area maggiore di 30 m<sup>2</sup> e volume maggiore di 10 m<sup>3</sup>, risulta essere di 469. Esse sono distribuite spazialmente come rappresentato dalla figura 27.

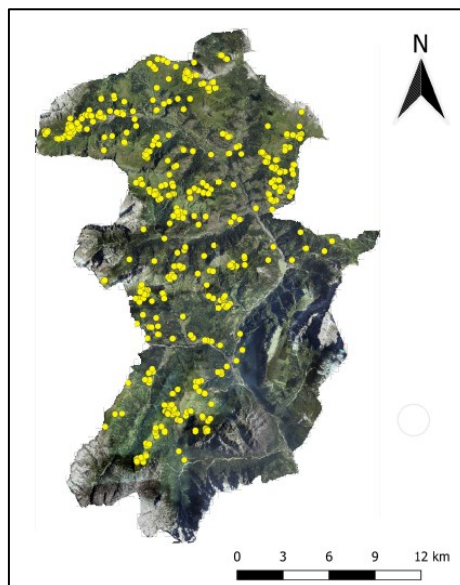


Figura 27: Distribuzione delle frane (punti gialli) nella zona considerata.

- **Quota**

Dal DTM è emerso che i punti di innesco delle frane totali si trovano per lo più tra i 1700 e i 2300 metri sul livello del mare (figura 28).

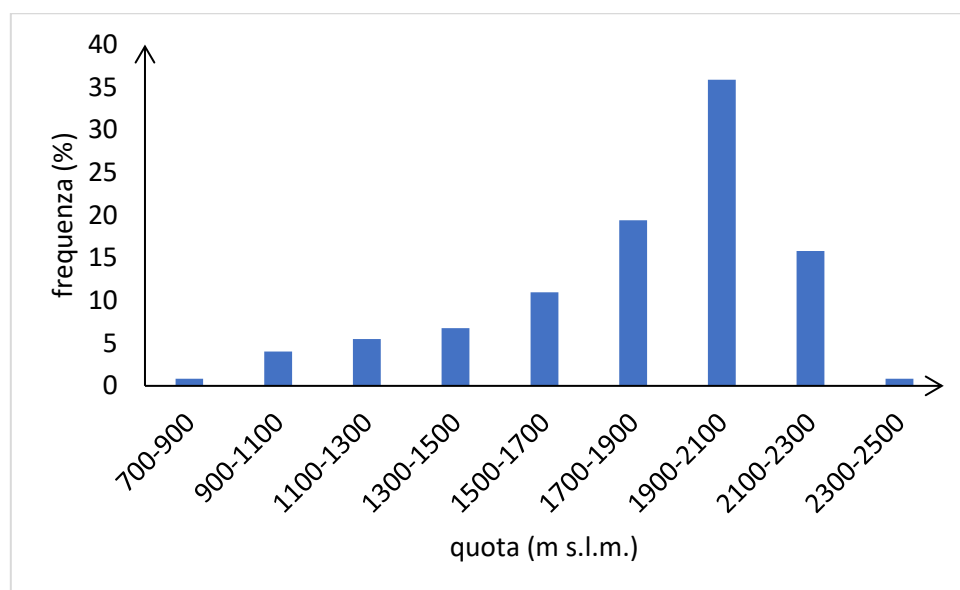


Figura 28: Distribuzione delle quote alle quali sono situati i punti di innesco.

- **Litologia**

Analizzando la densità delle litologie dei versanti in cui si sono innescate le frane, intesa come numero di frane su chilometro quadrato caratterizzato da una determinata litologia, si può osservare che queste siano soprattutto vulcaniti e arenarie (figura 29). Dalla frequenza percentuale, invece, emerge la presenza di numerose frane con calcari e calcari dolomitici (figura 30).

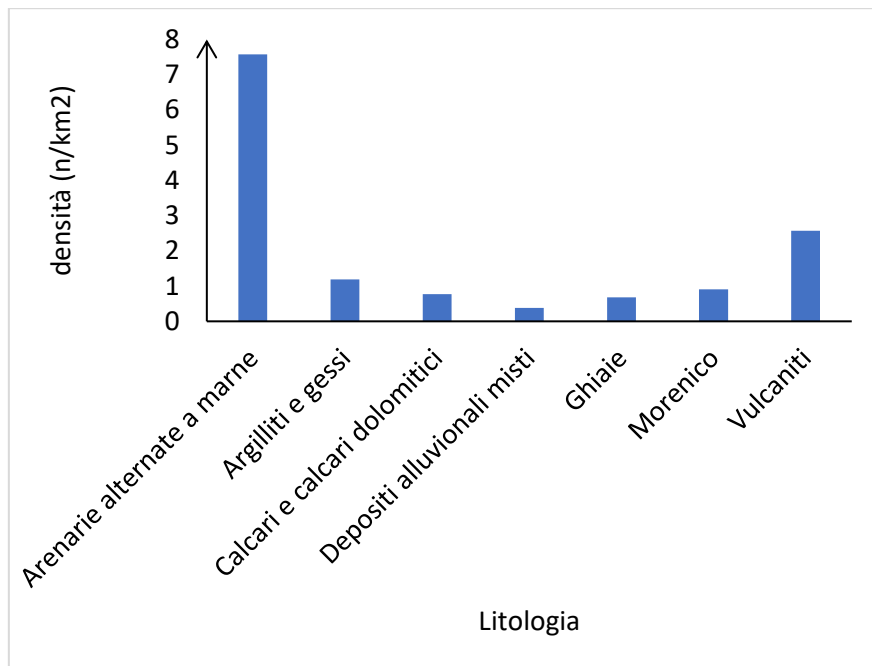


Figura 29: Densità delle diverse litologie dove si sono innescate le frane.

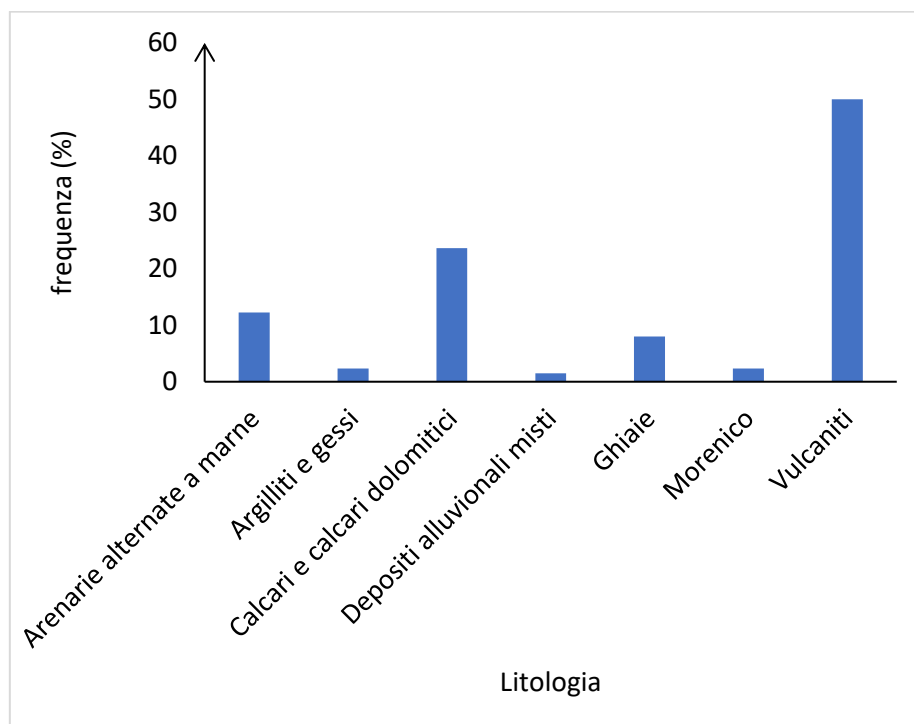


Figura 30: Frequenza percentuale delle diverse litologie dove si sono innescate le frane.

- **Elementi interessati a valle**

Nel 60% dei casi le frane non hanno interessato e causato danni ad elementi esposti a valle, nel restante 40% invece, l'elemento colpito è stato principalmente il reticolo idrografico (figura 31).

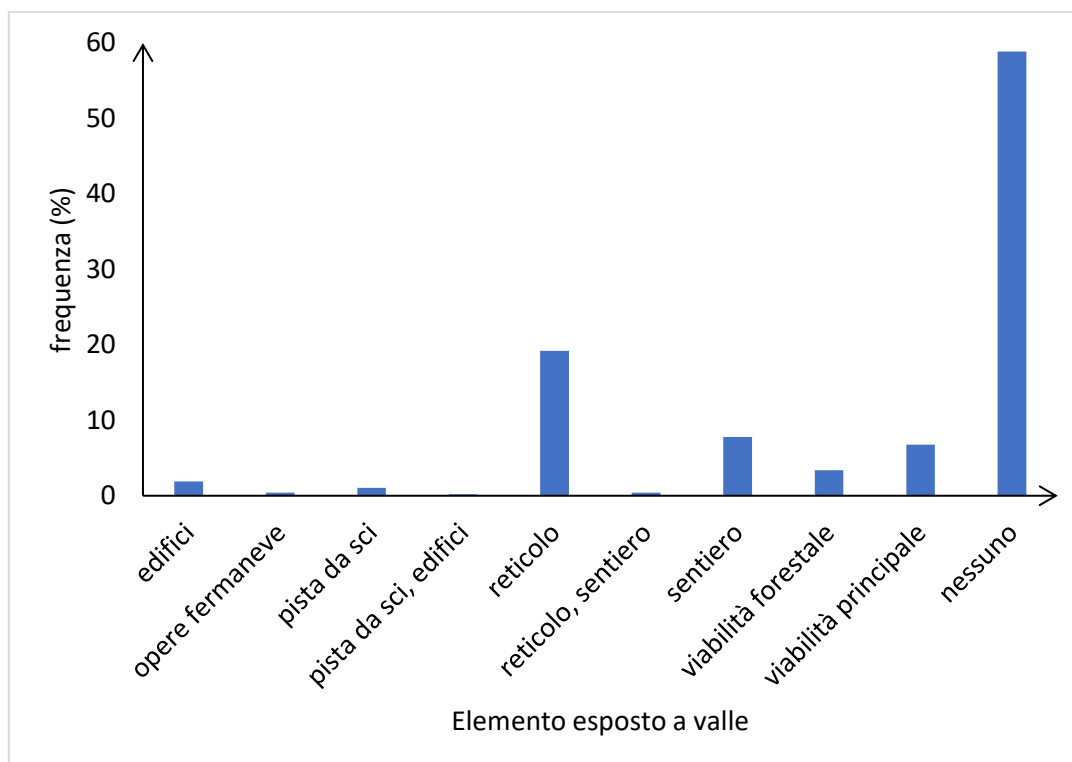


Figura 31: Frequenza percentuale degli elementi interessati dal trasporto di materiale causato dalle frane.

- **Influenza delle strade**

Osservando le frane risulta che di queste solo l'8% si sono innescate in prossimità delle strade (figura 32).

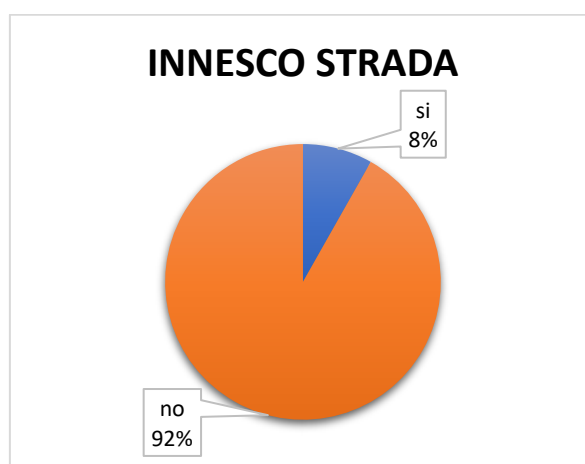


Figura 32: Percentuale delle frane innescate in prossimità delle strade, rispetto al totale.

- **Esposizione**

L'esposizione dei pendii in cui si sono innescate le frane è prevalentemente sud-est (figura 33).

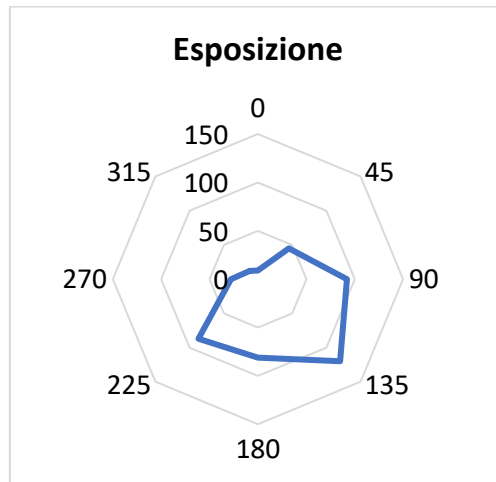


Figura 33: Esposizioni dei pendii in cui si sono innescate le frane.

- **Area di incisione**

Analizzando le ortofoto e gli hillshade, le frane innescate hanno per la maggior parte aree di incisione sotto i 400/500 metri quadrati, e la mediana è pari a 177 m<sup>2</sup> come riportato nelle figure 34 e 35.

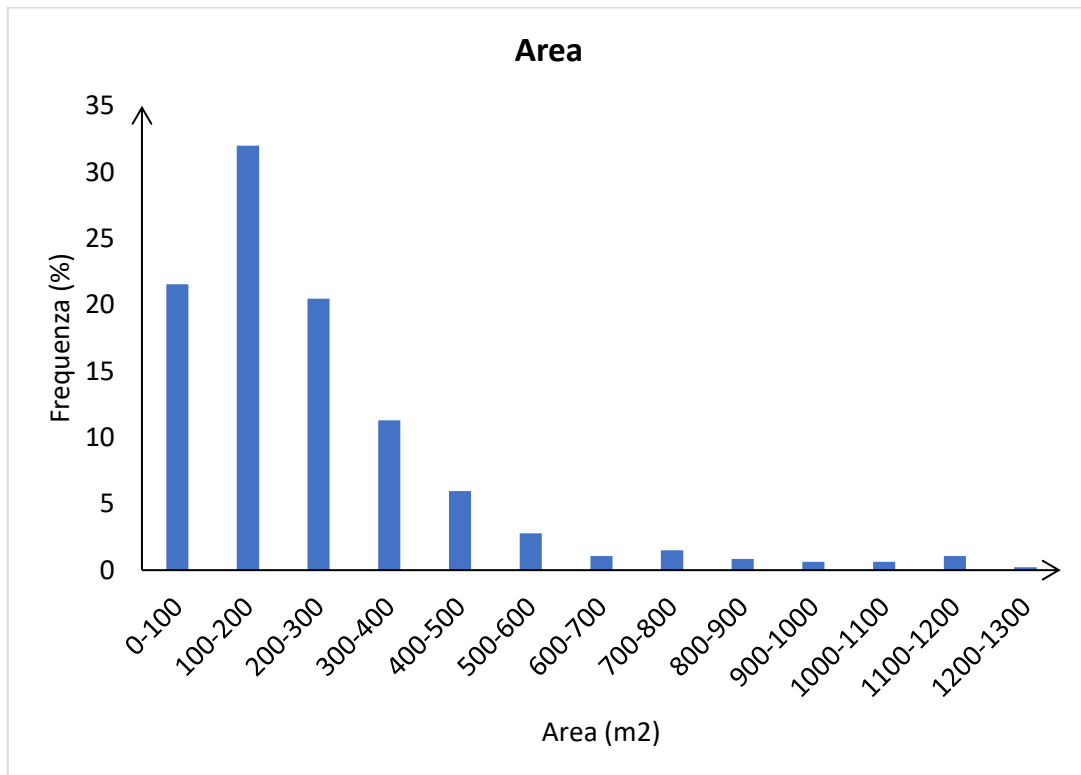


Figura 34: Distribuzione di frequenza delle aree di incisione delle frane.



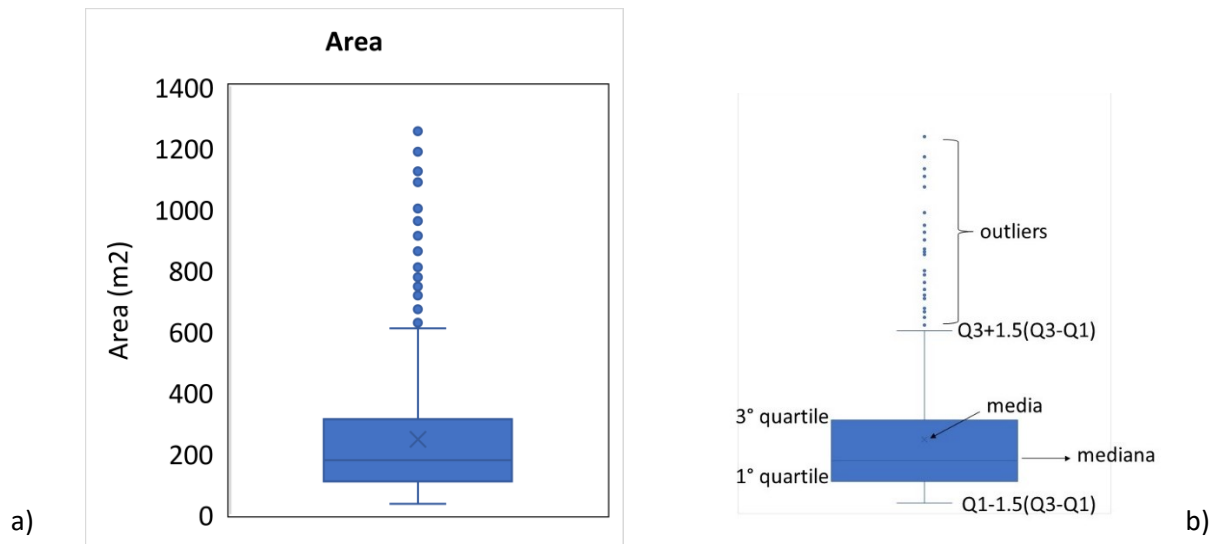


Figura 35: a) box plot delle aree di incisione delle frane totali e b) parametri indicati nel box plot.

- **Volumi**

La distribuzione dei volumi di terreno movimentato dalle frane segue l'andamento di quello delle aree di incisione, essendo due parametri correlati tra di loro, e la mediana è pari a 163.29 m<sup>3</sup> (figure 36 e 37). Data la presenza di numerosi outliers si è analizzato anche il box plot che considera range di volumi tra i 10 e i 500 m<sup>3</sup>, per il quale il valore della mediana scende a 138.55 m<sup>3</sup> (figura 38).

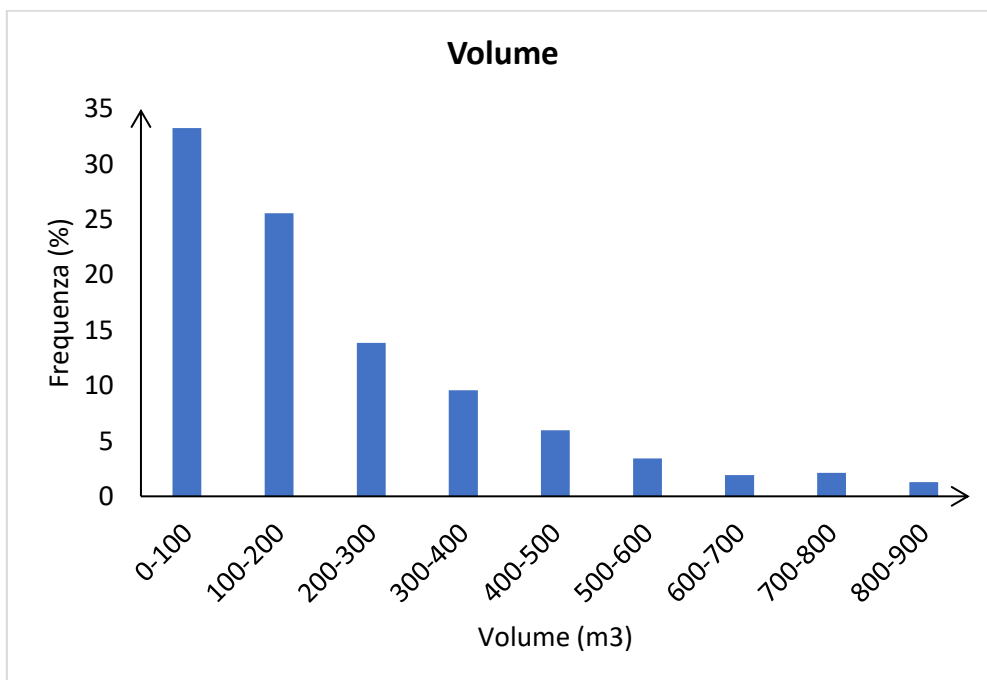


Figura 36: Distribuzione di frequenza dei volumi delle frane totali.

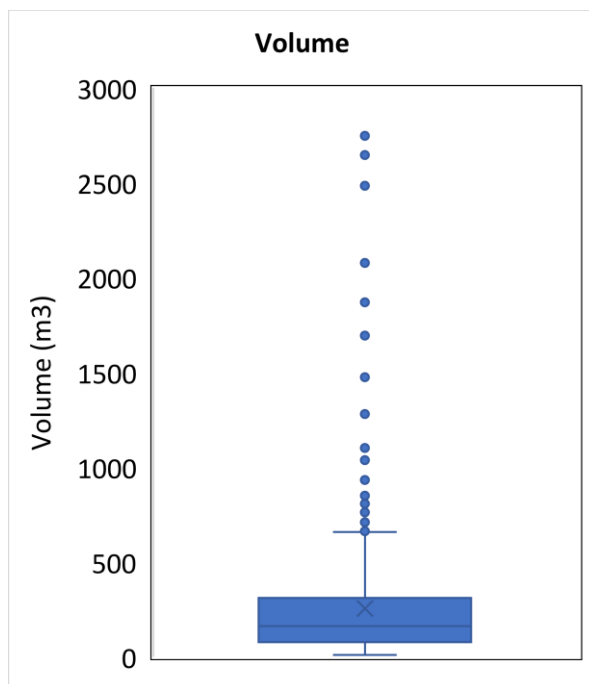


Figura 37: Box plot dei volumi delle frane totali.

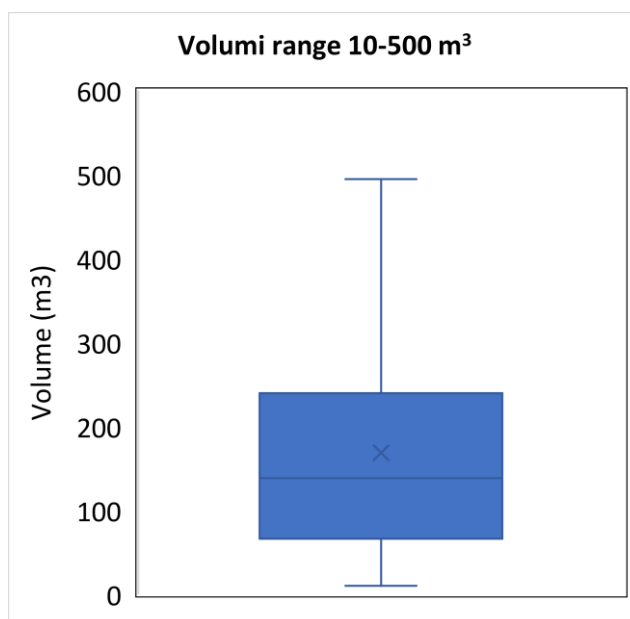


Figura 38: Box plot dei volumi compresi in un range tra i 10 e i 500 m³.

- **Profondità media**

La profondità media ricavata dal DoD, dato che si stanno considerando frane superficiali, è in genere inferiore ai 2 metri (figura 39).

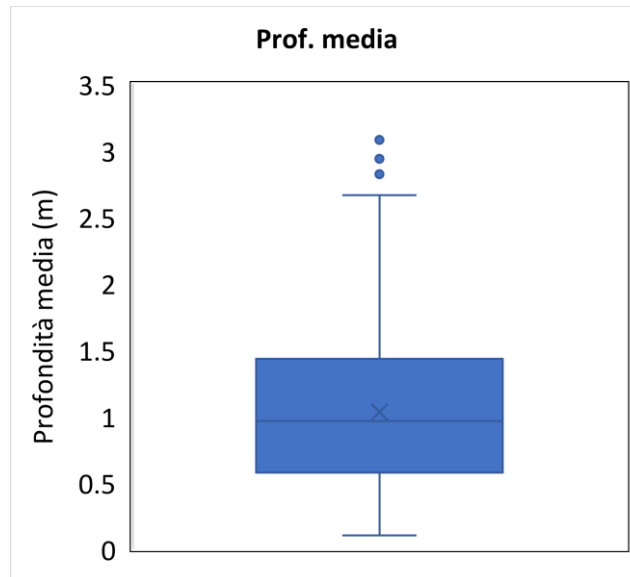


Figura 39: Box plot delle profondità medie delle frane totali.

- **Pendenza d'innescò**

Le pendenze intorno ai punti d'innescò delle frane totali, ottenute a partire dai DTM, si concentrano in valori compresi tra i 30 e 40° ed il valore della mediana è di 34.69° (figura 40).

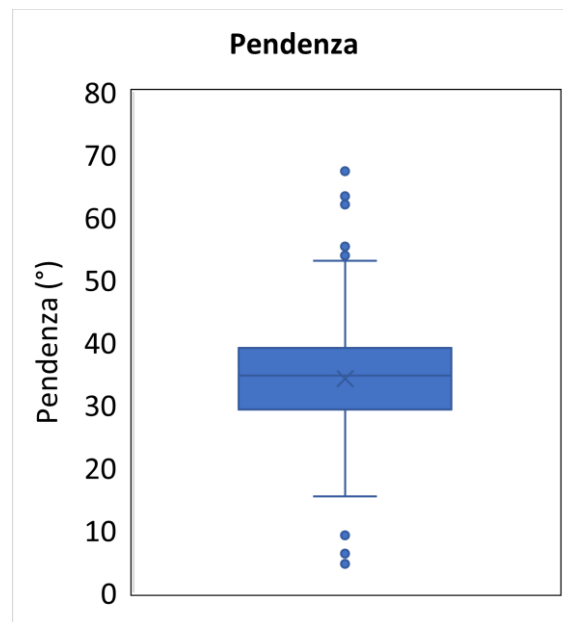


Figura 40: Box plot delle pendenze delle frane totali.

- **Relazione tra area e pendenza**

Analizzando la relazione tra area di incisione delle frane e pendenza del punto di innescò, si può osservare una lieve tendenza negativa (figura 41).

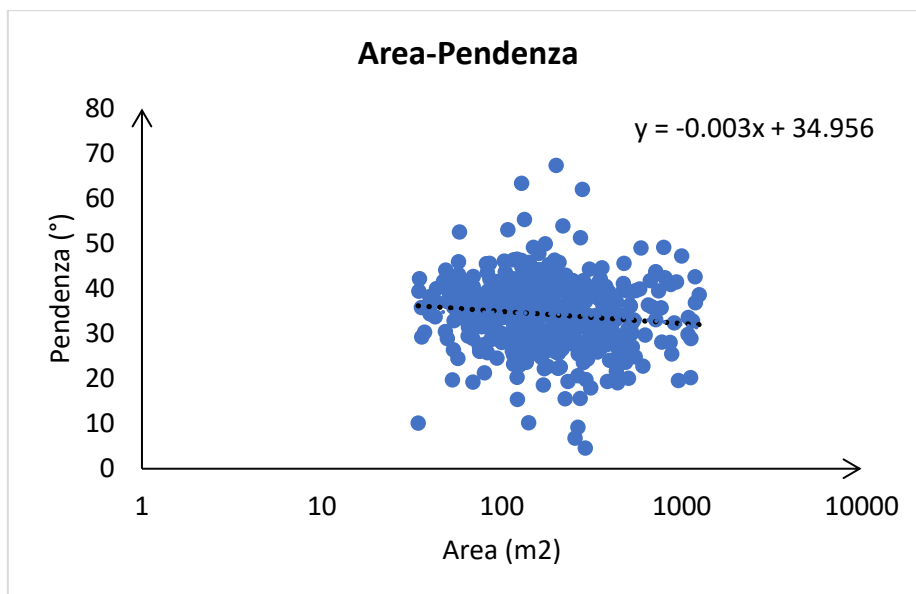


Figura 41: Relazione tra area di incisione delle frane e pendenza alla quale si sono innescate.

- **Curvatura**

Analizzando la morfologia del terreno in cui si sono innescate le frane, si può osservare come questa sia prevalentemente concava per quanto riguarda sia quella di profilo, sia quella planare; infatti, circa l'80% del totale è dato dalle categorie 7, 8 e 9 (figura 42).

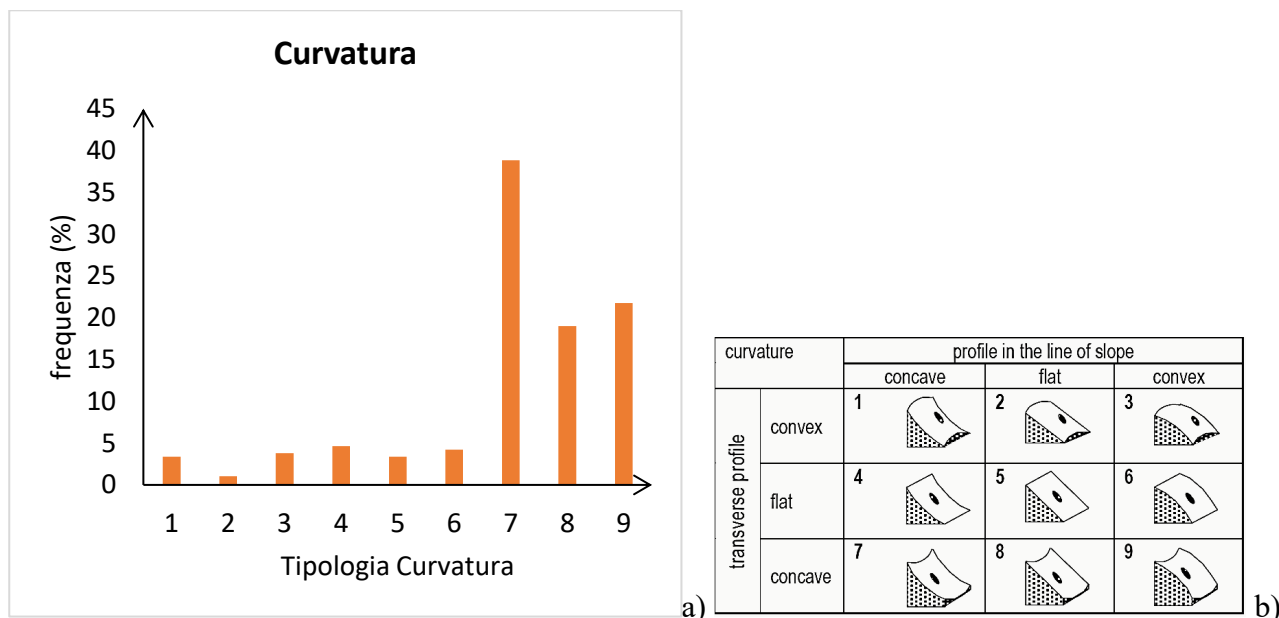


Figura 42: Distribuzione di frequenza (a) dei diversi tipi di morfologia di terreno, secondo la classificazione riportata in figura b).

- **Volumi in funzione delle classi di pendenza**

Dall'analisi dei volumi delle frane totali innescate su tre differenti classi di pendenza (<30°, 30-40° e >40°), risultano esserci differenze statisticamente significative tra le mediane per cui, confrontando le classi <30° e 30-40° (p-value = 0.00005) e <30° e >40° (p-value = 0.047), la prima presenta valori di volume maggiori. Confrontando invece le classi 30-40° e >40° non risulta esserci una differenza statisticamente significativa, dato il p-value di 0.11 (figura 43).

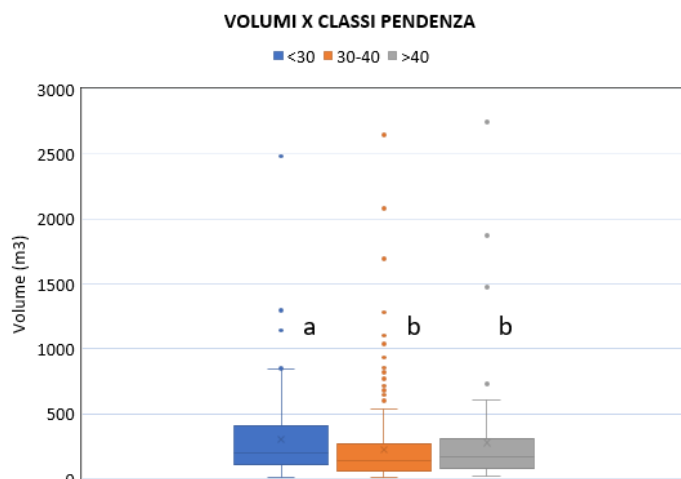


Figura 43: Confronto dei box-plot dei volumi corrispondenti alle tre classi di pendenze. A lettera diversa, corrisponde una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra i gruppi.

Considerando invece il range che va da 10 a 500 metri cubi di volume, la mediana dei volumi della classe di pendenze <30° risulta statisticamente diversa (maggiore) da quella della classe 30-40° (p-value = 0.0012). Quella della classe >40° invece non presenta differenze significative sia alla prima (p-value = 0.15) sia alla seconda classe (p-value = 0.13).

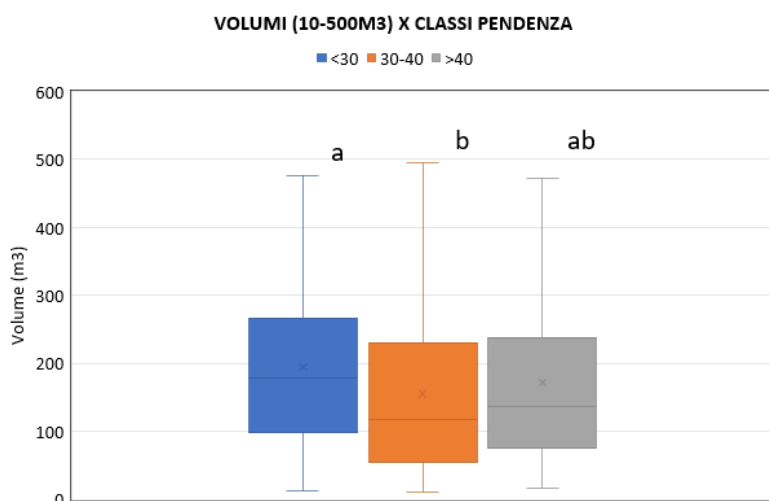


Figura 44: Confronto dei box-plot dei volumi, nel range 10-500 metri cubi, corrispondenti alle tre classi di pendenze. A lettera diversa, corrisponde una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra i gruppi.

- **Relazione area-volume**

Diversi autori hanno proposto equazioni empiriche relative al volume delle frane in funzione dell'area. Allo stesso modo, nel presente lavoro si è cercato di elaborare una relazione empirica sui dati delle 469 frane rilevate, basata sul modello di regressione presente:

$$V_L = \alpha A_L^\beta \quad (7)$$

La regressione è stata applicata dopo la trasformazione logaritmica di entrambe le variabili originali per tenere conto dell'aumento della varianza. L'equazione empirica così ottenuta ( $R^2 = 0,61$ ) è stata quindi confrontata graficamente con quelle ottenute da Zieher et al. (2016) e Guzzetti et al. (2009) (Figura 45).

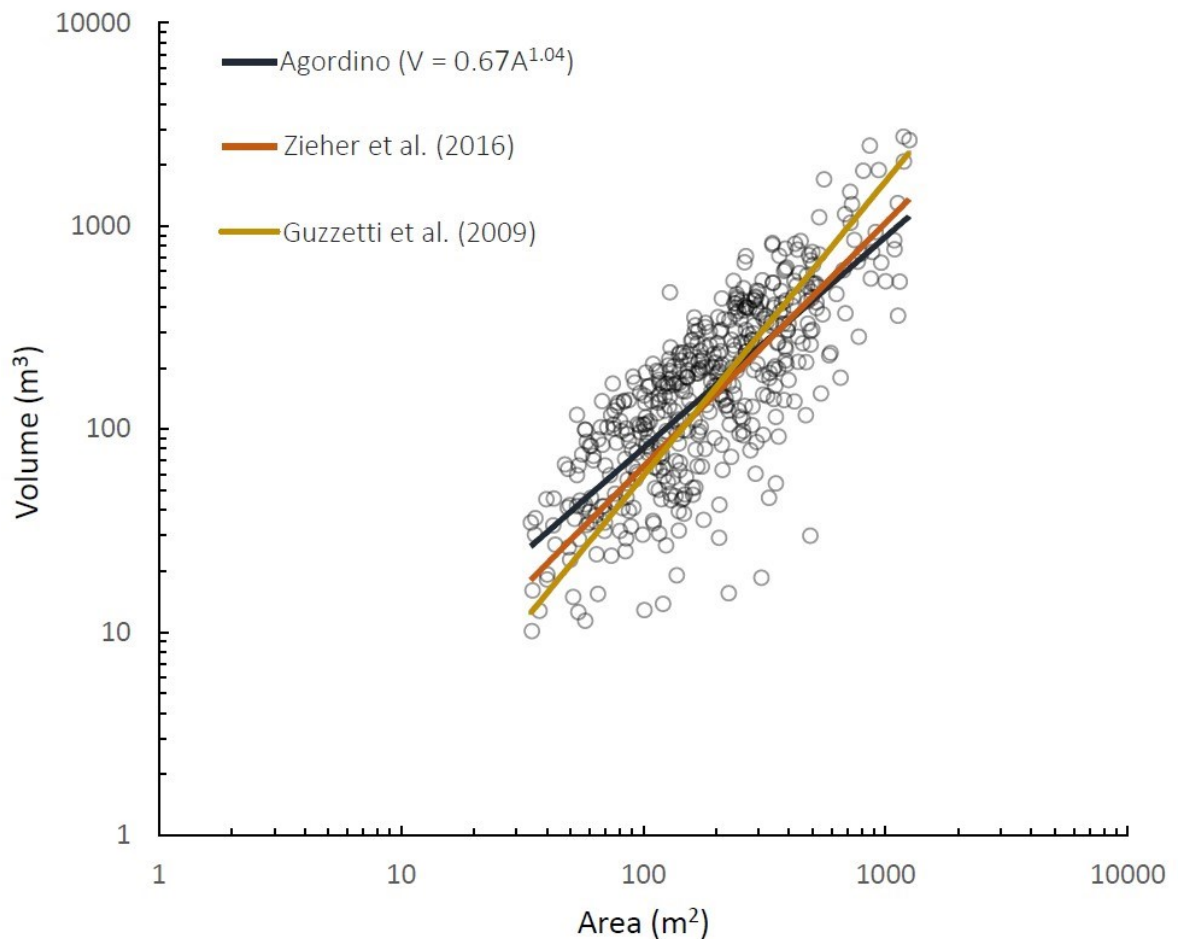


Figura 45: Relazione tra area e volume delle frane totali e confronto con quelle ottenute da Zieher et al (2016) e Guzzetti et al. (2009).

### 3.1.1. Confronto tra bosco e non bosco

Dalla figura 46, rappresentante le densità (numero di frane per chilometro quadrato), si può notare come i fenomeni franosi siano molto più numerosi nelle aree di non bosco. Dal grafico in figura 47, riportante la frequenza percentuale, si riesce ad apprezzare meglio il fatto che le frane in bosco si inneschino tendenzialmente su pendenze leggermente maggiori.

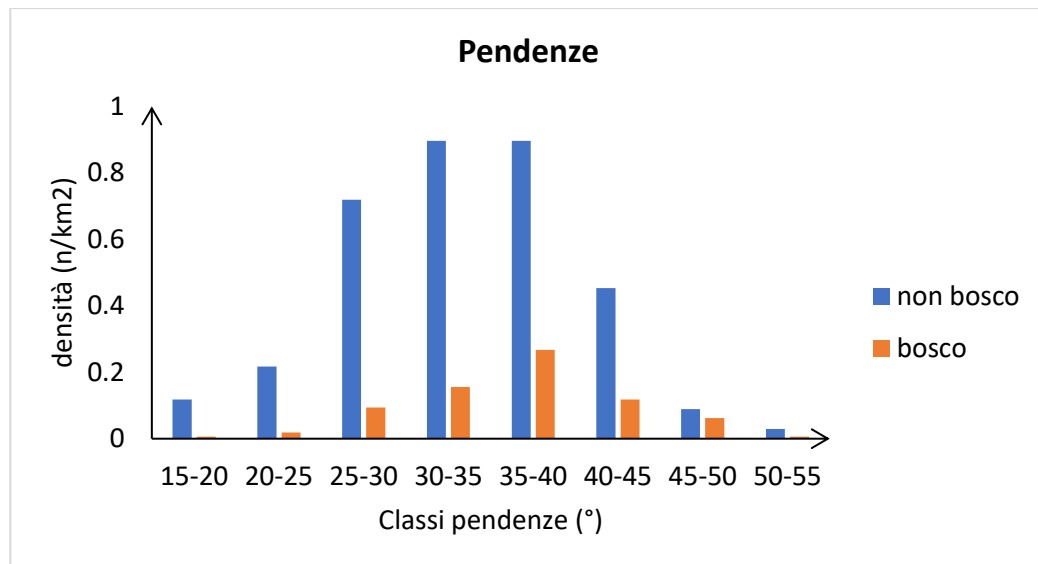


Figura 46: Distribuzione delle pendenze, espresse in termini di densità, delle frane innescate in bosco e non bosco.

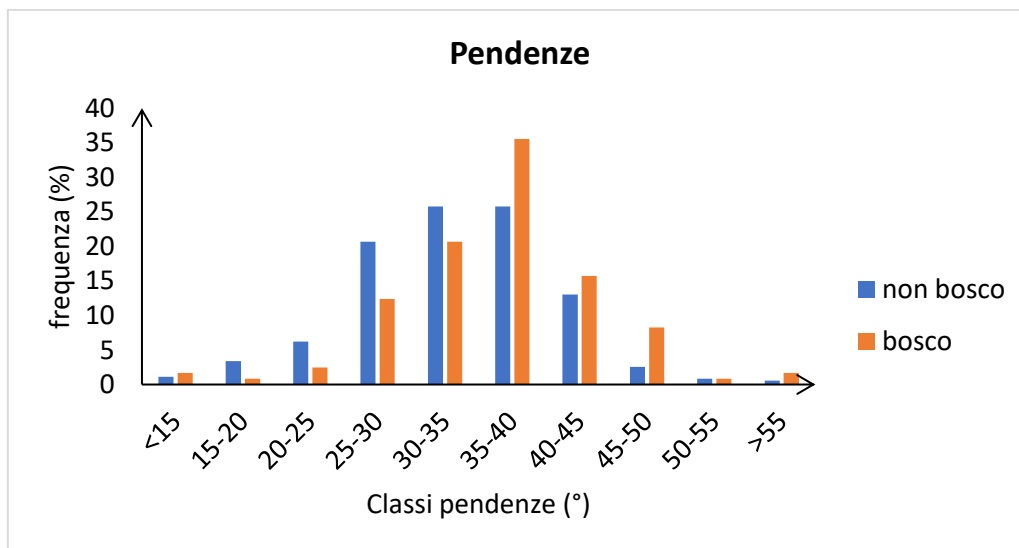


Figura 47: Distribuzione delle pendenze, espresse in termini di frequenza percentuale, delle frane innescate in bosco e non bosco.

Dal confronto delle pendenze dei versanti intorno ai punti di innesco delle frane, come emerso anche dai precedenti istogrammi, risulta che in bosco queste siano maggiormente concentrate tra valori intorno ai 35/40°, mentre quelle in non bosco assumono valori leggermente inferiori, tendenzialmente tra i 30° e i 40°. Questa differenza risulta statisticamente significativa dal confronto delle mediane,

con un p-value pari a 0.00006. Le mediane risultano pari a 36.76° in bosco e 33.58° in non bosco (figura 48).

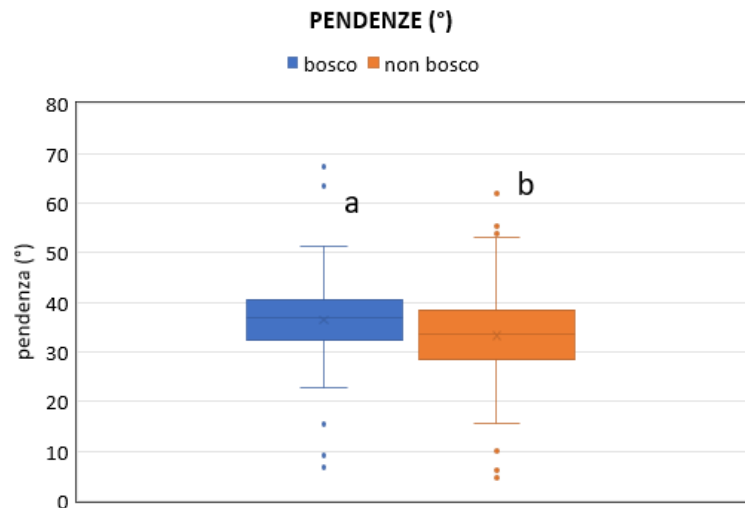


Figura 48: Confronto tra box plot delle pendenze delle frane in bosco e non bosco, p-value pari a 0.00006. A lettera diversa, corrisponde una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra i gruppi.

Come operato da altri autori (Bebi et al., 2019; Rickli et al., 2019a; Rickli et al., 2008) si è cercato di valutare se vi sono state differenze in termini di intensità e di condizioni di innesco delle frane tra quelle originatesi in bosco e quelle fuori bosco. Confrontando le profondità medie, ricavate da DoD, delle frane in bosco e non bosco non risulta esserci una differenza statisticamente significativa, il p-value è di 0.46 (Figura 49).

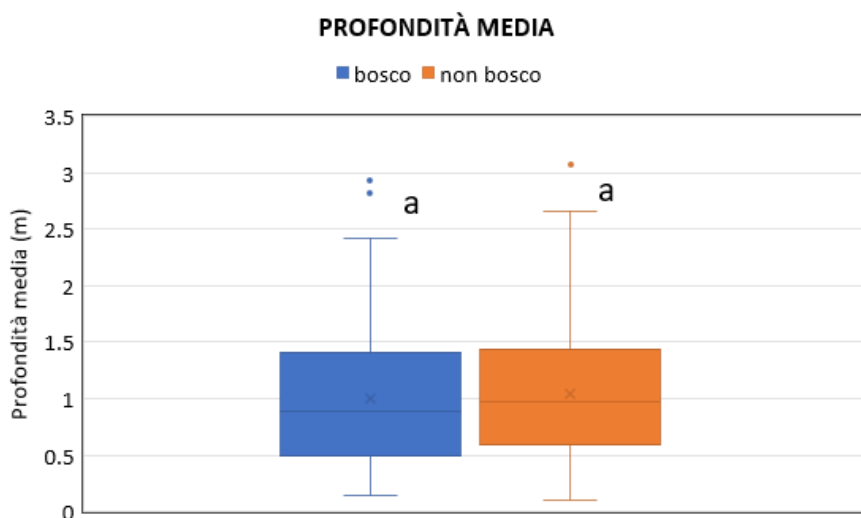


Figura 49: Confronto tra box plot delle profondità medie delle frane in bosco e non bosco, p-value pari a 0.46. A lettera diversa, corrisponde una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra i gruppi.



Non c'è una differenza significativa tra le frane situate in bosco e non bosco nemmeno nel confronto delle aree di incisione, il p-value risulta infatti essere pari a 0.42 (figura 50).

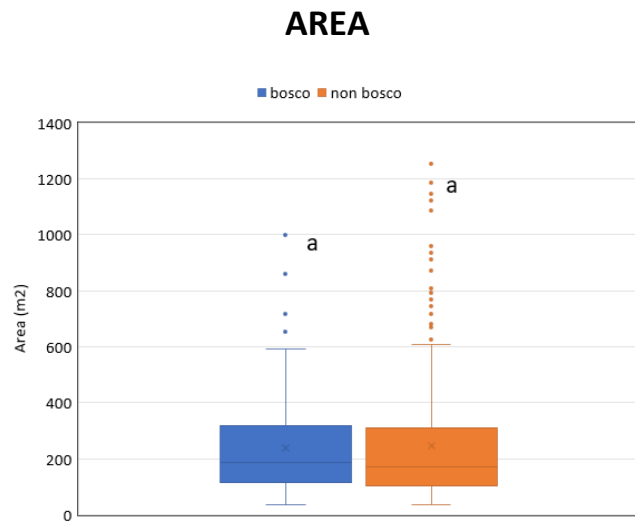


Figura 50: Confronto dei box plot delle aree di incisione delle frane innescate in bosco e non bosco, il p-value è pari a 0.42. A lettera diversa, corrisponde una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra i gruppi.

Nel caso dei volumi, inoltre, non c'è una differenza statisticamente significativa tra le frane in bosco e quelle in non bosco dato il p-value = 0.88 (figura 51). Anche escludendo i valori estremi, considerando quindi solamente quelle frane con volumi compresi tra 10 e 500 metri cubi (figura 52), non risulta comunque esserci una differenza statisticamente significativa tra bosco e non bosco, il p-value in questo caso risulta pari a 0.85.

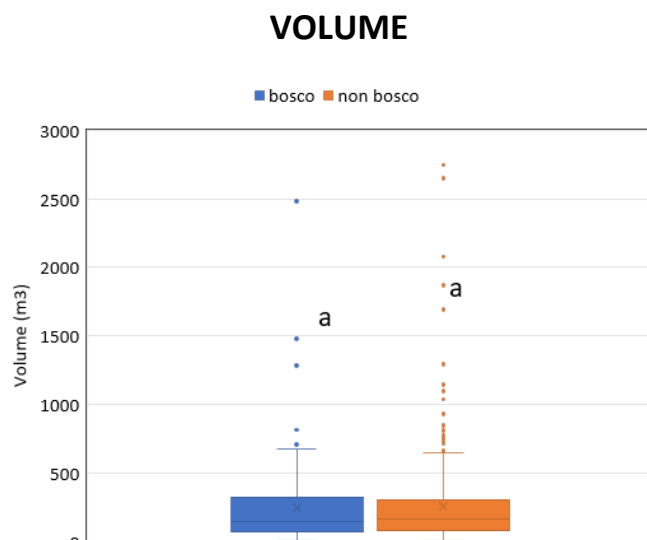


Figura 51: Confronto tra box plot dei volumi delle frane in bosco e non bosco, il p-value è pari a 0.88. A lettera diversa, corrisponde una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra i gruppi.

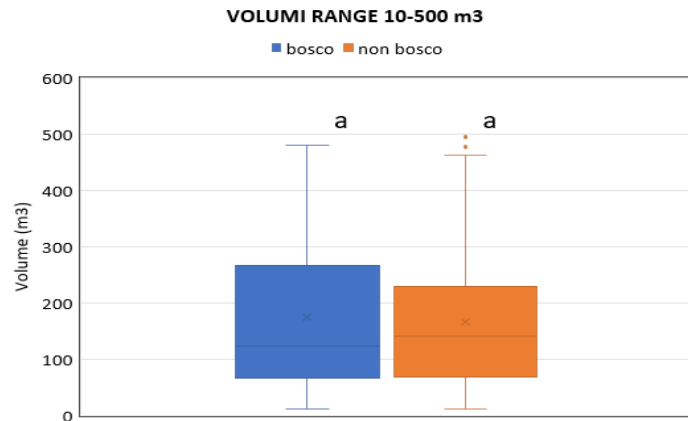


Figura 52: Confronto tra box plot dei volumi di frane in bosco e non bosco, il p-value è pari a 0.85. A lettera diversa, corrisponde una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra i gruppi.

### 3.2. Analisi delle frane innescate in bosco

Dal layer della copertura forestale risulta che delle 469 frane totali, solo 116 si sono innescate in bosco, su queste vengono in seguito riportati i risultati relativi a categorie forestali, copertura e struttura del popolamento, confrontandoli con le linee guida SFP.

#### 3.2.1. Categorie forestali

Analizzando le categorie forestali nel quale si sono innescate le frane in bosco individuate risulta che, in termini di frequenza percentuale, il 40.5% di quelle in bosco si sono innescate all'interno di peccete, il 30.6% in lariceti e 16.5% in piceo-faggete, come riportato dalle figure 53 e 54.

Considerando invece la densità (numero di frane in bosco per chilometro quadrato di categoria forestale “netta” – vedi cap. 2.4.2), risulta invece che si siano verificate più frane in acero-frassineti, seguite da quelle in piceo-faggete e successivamente peccete (figura 55).

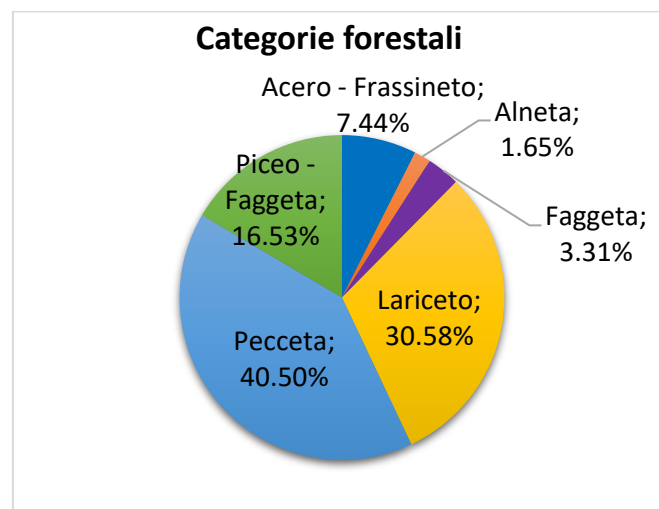


Figura 53: Areogramma della distribuzione percentuale delle diverse categorie forestali in cui si sono innescate le frane in bosco.

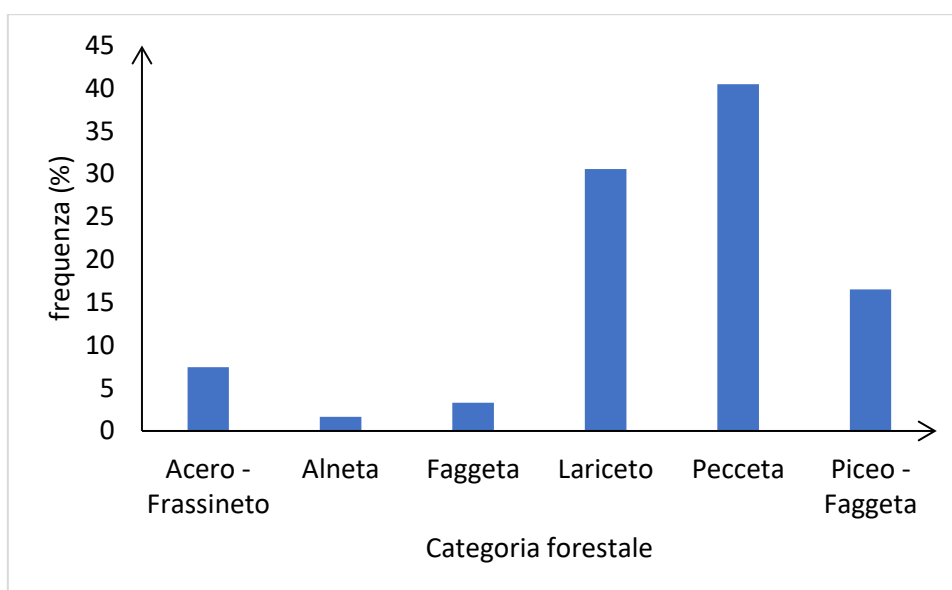


Figura 54: Istogramma della distribuzione percentuale delle diverse categorie forestali in cui si sono innescate le frane in bosco.

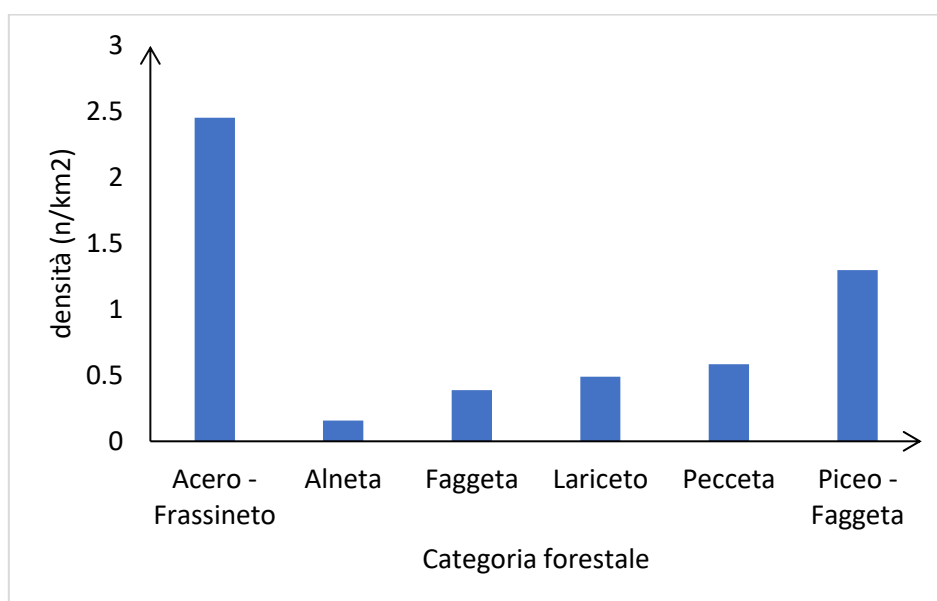


Figura 55: Densità delle frane per le diverse categorie forestali.

I volumi risultano distribuiti diversamente nelle diverse categorie forestali delle frane in bosco, all'interno di acero-frassineti questi raggiungono infatti valori molto maggiori rispetto alle altre (figura 56). Dal test di Kruskal-Wallis il p-value risulta pari a 0.043, dunque le mediane dei box plot sono diverse tra di loro in maniera statisticamente significativa. Considerando invece un range di volumi tra 10 e 500 m<sup>3</sup> (figura 57), questi risultano distribuiti più omogeneamente tra le categorie forestali. In questo caso, anche a livello statistico, non risulta esserci una differenza significativa tra le mediane (p-value = 0.11).

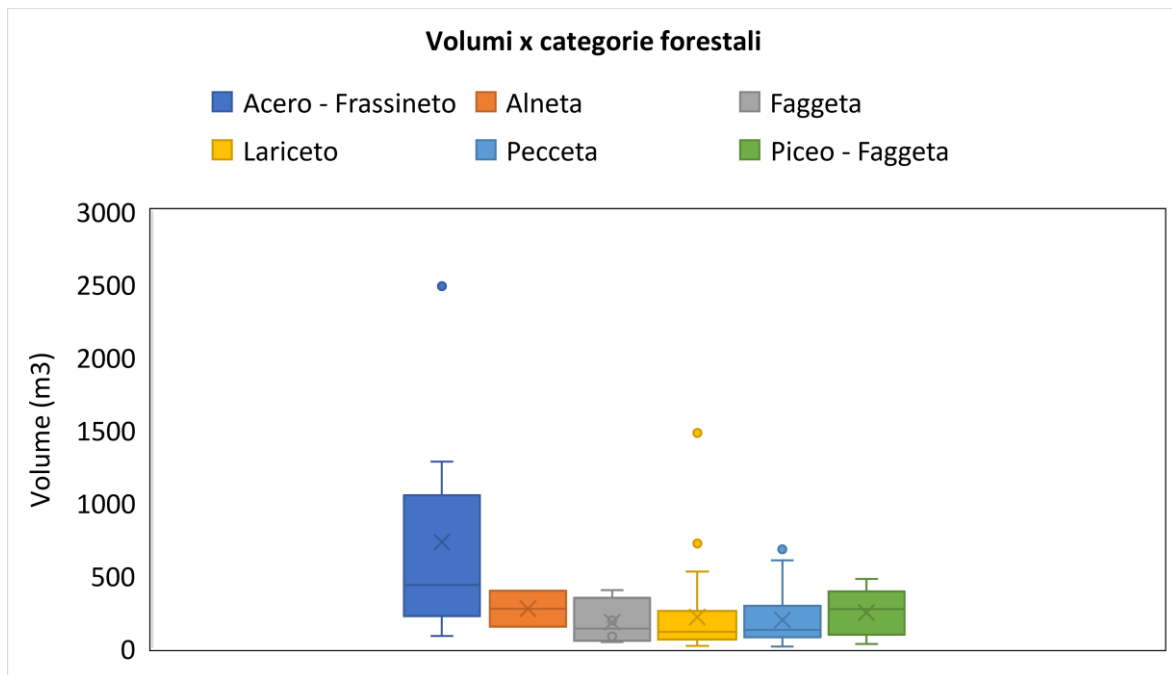


Figura 56: Box plot dei volumi delle frane innescate all'interno delle diverse categorie forestali, il p-value pari a 0.043 indica una differenza statisticamente significativa tra i box plot.

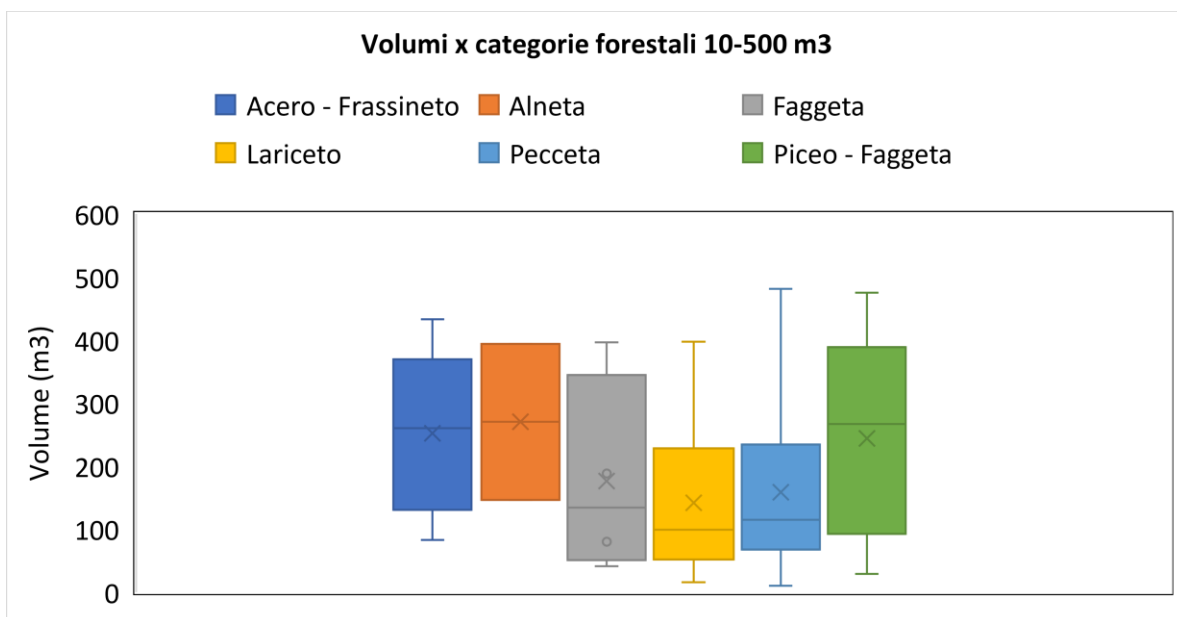


Figura 57: Box plot dei volumi delle frane, compresi tra i 10 e 500 m³, innescate all'interno delle diverse categorie forestali, il p-value pari a 0.11 indica che non c'è una differenza statisticamente significativa tra i box plot.

### 3.2.2. Caratteristiche strutturali del popolamento

Come indicato nel workflow (cap. 2.2), all'interno di ogni plot (50x50 m) di frana innescata in bosco, sono stati valutati i parametri strutturali del popolamento in termini di copertura e lunghezza, larghezza e area dell'eventuale gap presente.

- **Copertura**

Nelle frane innescate in bosco il valore della mediana della copertura all'interno dei plot 50x50, riportata dal box plot in figura 58, risulta pari a 60.3%.

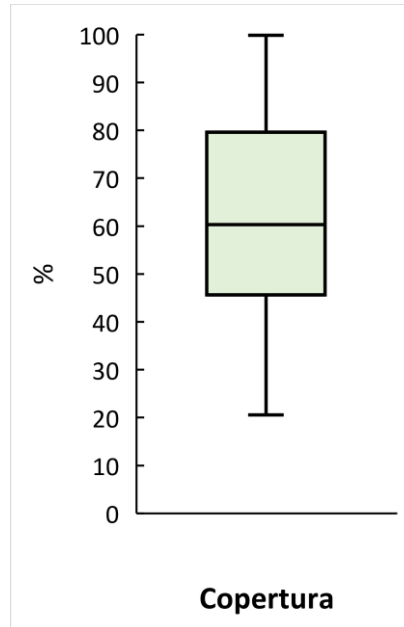


Figura 58: Copertura percentuale nelle frane in bosco.

- **Caratteristiche dei gap**

Per quanto riguarda le dimensioni dei gap all'interno dei plot 50x50, la mediana è di 15.83 metri per la larghezza e i 17.95 metri per la lunghezza, come si può notare dalle figure 59 e 60.

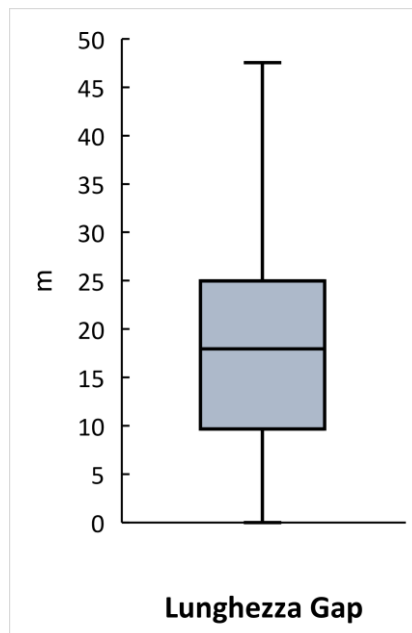


Figura 59: Box plot delle lunghezze dei gap per le frane in bosco.

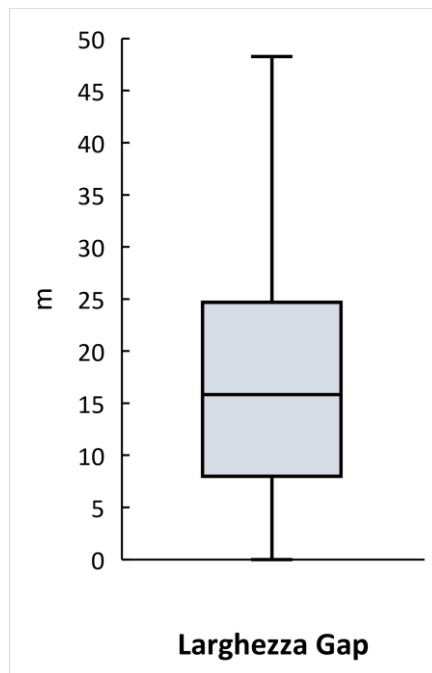


Figura 60: Box plot delle larghezze dei gap per le frane in bosco.

La mediana delle aree dei gap, all'interno dei plot 50x50, risulta di 551.29 metri quadrati, come rappresentato dal box plot in figura 61.

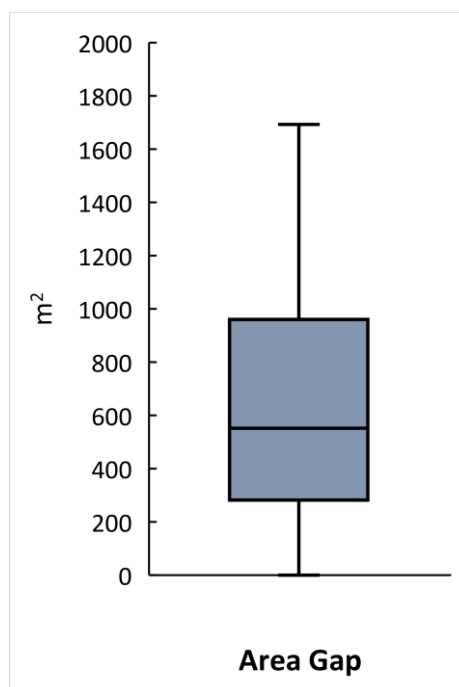


Figura 61: Box plot delle aree dei gap per le frane in bosco.

- **Matrice di correlazione**

In questo sottocapitolo viene descritta l'analisi relativa alla matrice di correlazione (figura 62). Essa riporta, attraverso il coefficiente di correlazione di Pearson che varia da un valore di -1 a 1, quanto

due caratteristiche delle frane analizzate siano tra di loro correlate. È quindi utile per una primaria analisi di valutazione su quali parametri influiscano maggiormente sull'intensità delle frane superficiali. Andando per ordine, dall'alto al basso, si può evincere come la pendenza alla quale si innesca la frana influisca leggermente sulla profondità media, in maniera negativa. La copertura, all'interno dei plot 50x50 è fortemente legata all'area dei gap e, come si può intuire, diminuisce all'aumentare delle quote. Di conseguenza la relazione tra dimensioni dei gap e quota è opposta. Riguardo le caratteristiche dimensionali dei gap e la copertura, è interessante osservare come la lunghezza sia l'unico parametro legato alla magnitudo della frana, in quanto al suo aumentare tendono a diminuire profondità, area e volume.

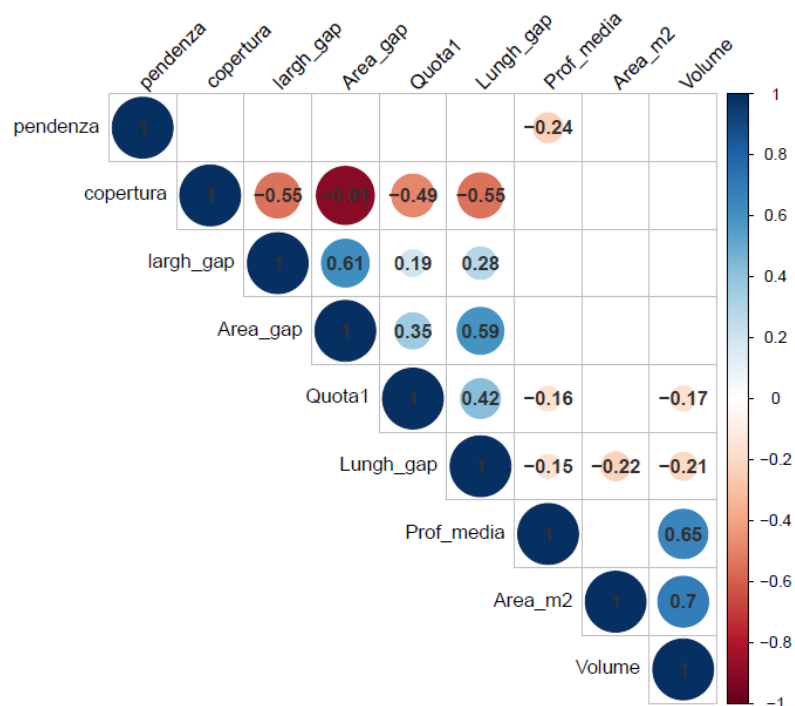


Figura 62: Matrice di correlazione tra le principali caratteristiche quantitative delle frane innescate in bosco (n=116). I valori corrispondono all'indice di correlazione di Pearson (livello di significatività = 5%).

- **Relazione tra volume/area delle frane e lunghezza dei gap**

Considerando i risultati osservati nella matrice di correlazione in figura 62, si è cercato di analizzare più nello specifico la relazione tra lunghezza dei gap e volume/area. Osservando i grafici a dispersione riportati in figura 63 e 64, non vi è effettivamente una chiara relazione negativa tra le due variabili. È piuttosto apprezzabile un trend negativo relativo alle linee di inviluppo superiore.



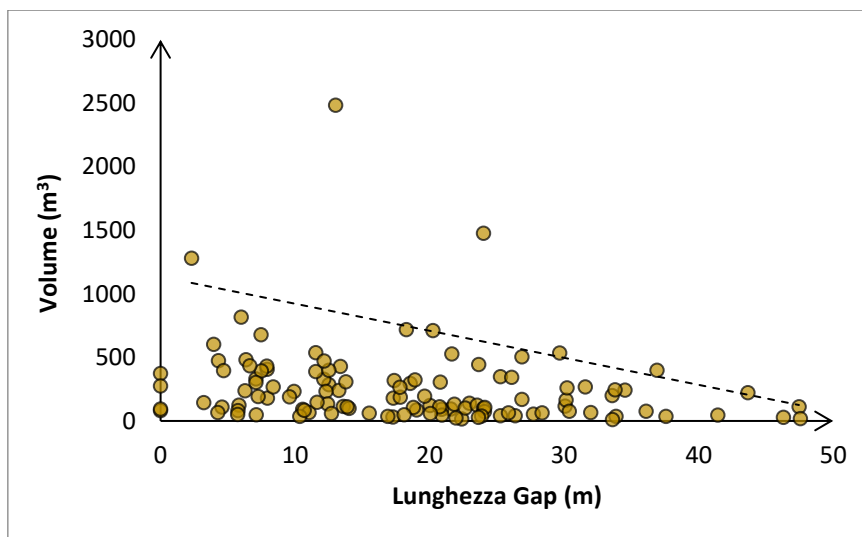


Figura 63: Linea di involucro superiore tra volumi delle frane e lunghezze dei gap.

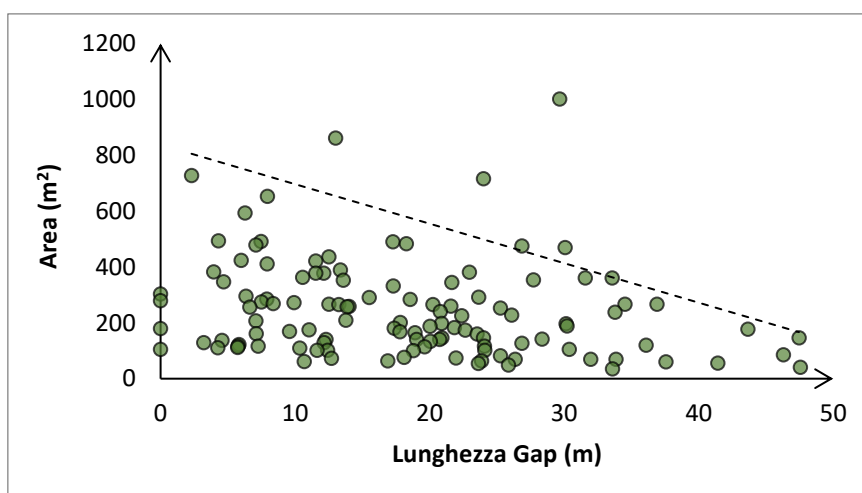


Figura 64: Linea di involucro superiore tra aree delle frane e lunghezze dei gap.

### 3.2.3. Confronto con linee guida SFP

Qui vengono riportati dei grafici tramite i quali si vogliono rappresentare le percentuali in cui le frane superficiali si sono innescate in condizioni per cui, anche secondo le linee guida SFP, le caratteristiche strutturali dei boschi, a scala di popolamento, non permettono una funzione protettiva. Questo confronto è stato eseguito per determinare quanto queste linee guida possano risultare precise ed attendibili.

Dato che la copertura all'interno dei plot 50x50 è compresa tra il 50 e l'80%, secondo i parametri dell'SFP (soprattutto quelli riguardanti le esigenze minime) la maggior parte delle frane si sono innescate dove la funzione protettiva del popolamento dovrebbe risultare efficace (figura 65).

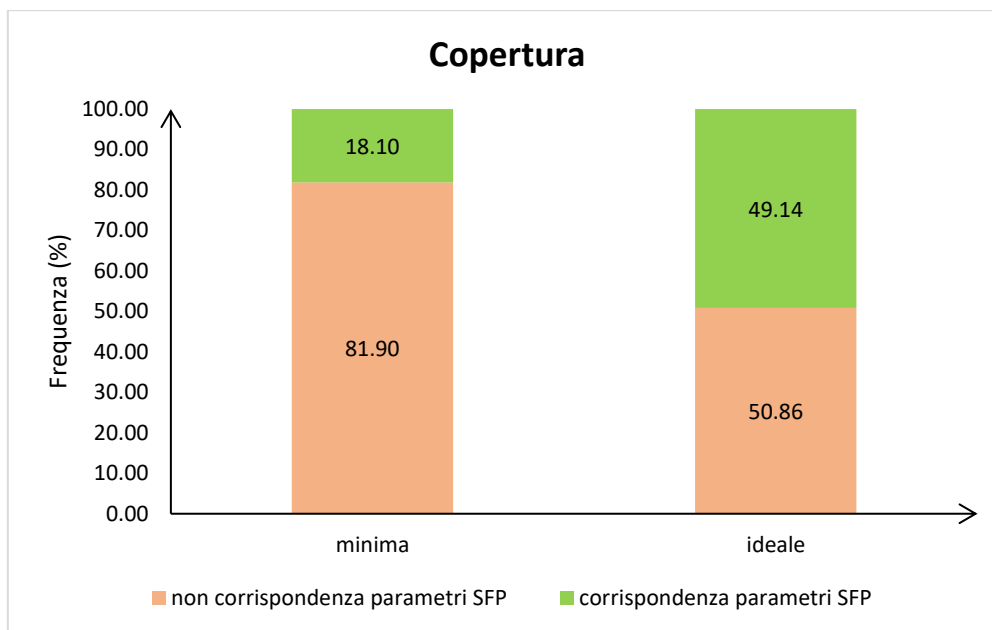


Figura 65: Percentuali di frane che si sono innescate in condizioni di copertura corrispondenti e non corrispondenti alle soglie minime e ideali riportate dal manuale SFP.

Anche per le lunghezze dei gap secondo il manuale SFP, visti i valori misurati, la maggior parte delle frane si sono innescate dove la funzione protettiva del popolamento dovrebbe risultare efficace, se si considerano le esigenze minime. Le esigenze ideali però non riportano una percentuale alta tale da affermare una validità delle linee guida nei confronti di questo parametro (figura 66).

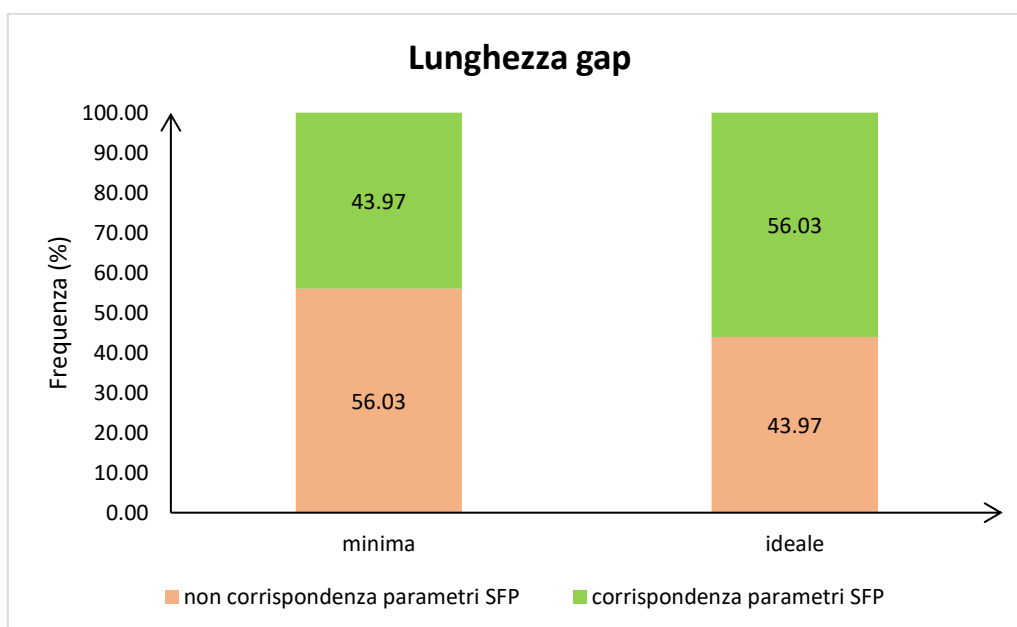


Figura 66: Percentuali di frane che si sono innescate in condizioni di lunghezze dei gap corrispondenti e non corrispondenti a quelle riportate dal manuale SFP.

Nemmeno per i valori di superficie dei gap ottenuti, secondo il manuale SFP, la maggior parte delle frane si sono innescate dove la funzione protettiva del popolamento dovrebbe risultare efficace, se si

considerano le esigenze minime. In questo caso però si ha una buona corrispondenza se si prende in considerazione la superficie dei gap ideale (figura 67).

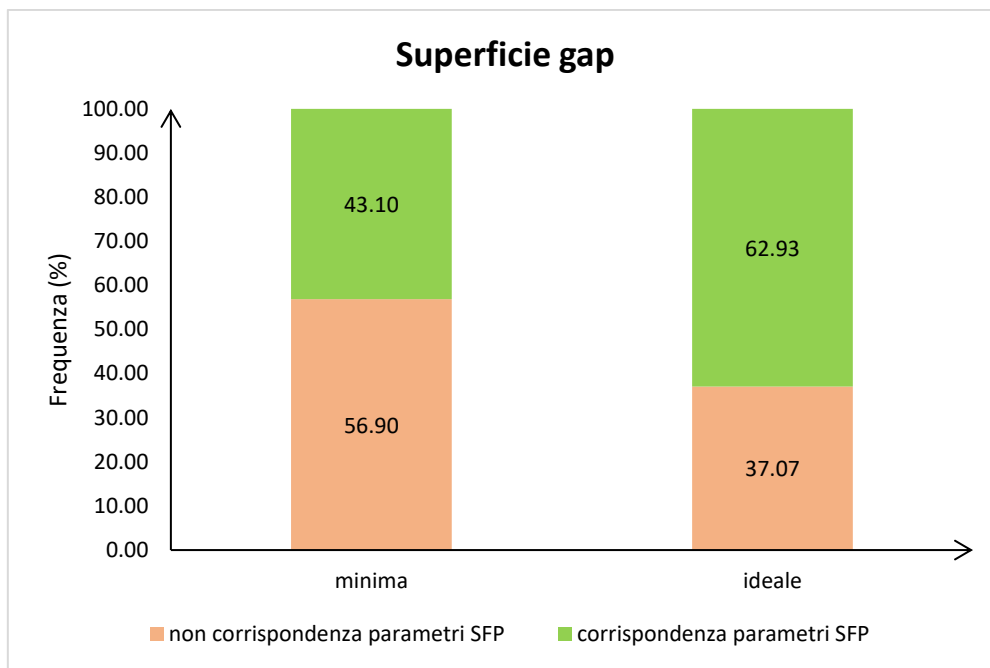


Figura 67: Percentuali di frane che si sono innescate in condizioni di superfici dei gap corrispondenti e non corrispondenti a quelle riportate dal manuale SFP.

Confrontando la combinazione dei parametri riguardanti gap e copertura sopra riportati con le soglie definite dal manuale SFP, risulta esserci una migliore corrispondenza. Ciò è evidente soprattutto se si considerano le esigenze ideali, che determinano effettivamente una maggiore efficacia nella funzione di protezione dall'innescio di frane superficiali (figura 68).

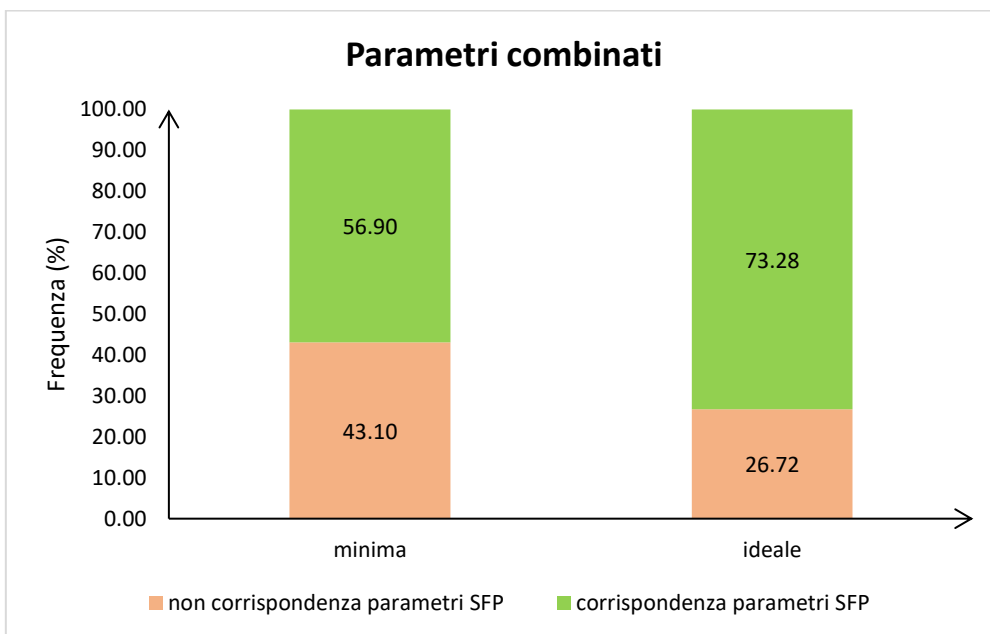


Figura 68: Percentuali di frane che si sono innescate in condizioni di combinazione dei parametri corrispondenti e non corrispondenti a quelle riportate dal manuale SFP.

### 3.3. Rinforzo radicale

Si è scelto di realizzare diverse tipologie di grafici per confrontare il rinforzo radicale all'interno del plot con quello lungo la scarpata e per valutare dunque se le frane si sono innescate in zone caratterizzate da valori inferiori.

Il seguente grafico è un density plot (figura 69) che rappresenta quindi la distribuzione di una variabile numerica e, in questo caso, è stato utilizzato per sovrapporre i grafici di densità Kernel di due o più gruppi. Si può osservare come il rinforzo radicale (espresso come valore dei singoli pixel) nelle scarpate assuma valori tendenzialmente inferiori rispetto a quello totale relativo all'intero plot 50x50, che presenta in effetti una coda più lunga verso destra. Questo risultato è evidente anche dalle medie, rappresentate dalle linee tratteggiate, pari a 7186.55 N/m per i plot e 5179.43 N/m per le scarpate.

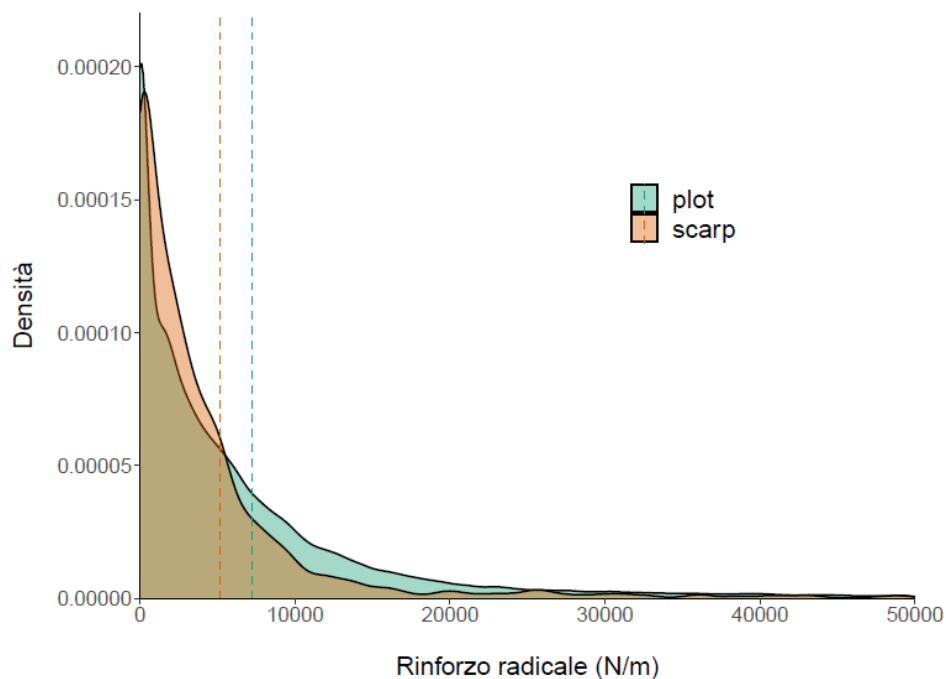


Figura 69: Density plot del rinforzo radicale relativo alle scarpate e ai plot 50x50, le linee tratteggiate simboleggiano le medie.

Il confronto tra box plot dei rinforzi radicali (in questo caso espressi come valori medi di ogni frana) lungo le scarpate e all'interno dei plot 50x50 (figura 70) indica, come il grafico precedente, che questi ultimi sono distribuiti su valori maggiori. La differenza tra le mediane dei due box plot, pari a 4846.90 N/m per i plot e 3434.38 N/m per le scarpate, è statisticamente significativa dato che il p-value è inferiore a 0.05.

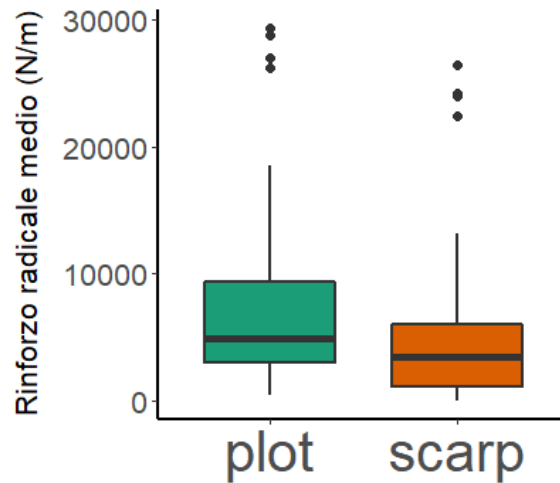


Figura 70: Box plot dei rinforzi radicali all'interno dei plot 50x50 e lungo le scarpate di frana. Il p-value è inferiore a 0.05.

In figura 71 sono rappresentate le differenze tra i rinforzi radicali medi delle scarpate e del plot per le singole frane (segmenti neri che più sono lunghi e maggiore è la differenza), al fine di capire quale risultasse maggiore per i differenti eventi e in quale misura. È possibile osservare come nell'80% delle zone di innesco delle frane fosse presente un rinforzo radicale medio inferiore lungo la scarpata (punti arancioni) rispetto a quello nel plot (punto verde) quando le frane si sono innescate, dato che i primi sono situati al di sotto dei secondi.

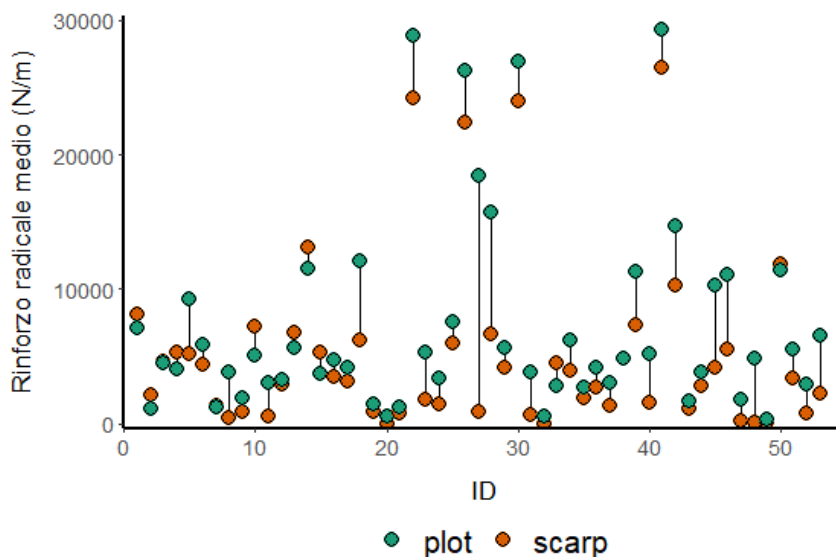


Figura 71: Differenze tra i rinforzi radicali medi lungo le scarpate e all'interno dei plot 50x50 per le singole frane.

Analizzando ulteriormente la differenza tra il rinforzo radicale medio nei plot e quello lungo la scarpata, per determinare la sua influenza sugli inneschi, il grafico in figura 72 è un'ulteriore

conferma che il secondo rinforzo sia nella maggior parte dei casi inferiore (in 42 frane su 53), dato che la linea si trova principalmente al di sopra del valore zero.

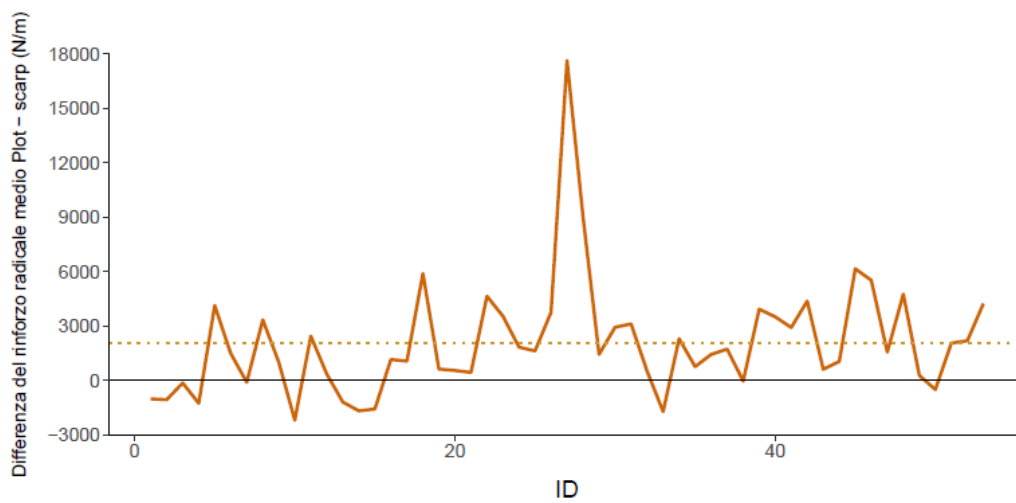


Figura 72: Differenze tra i rinforzi radicali medi di plot e scarpate per le singole frane.

Dalla relazione tra i due diversi rinforzi radicali (plot e scarpata), osservando la figura 73, risulta evidente come vi sia una relazione lineare positiva tra le due variabili. Inoltre, si può osservare come tendenzialmente a gap di maggiori dimensioni (punti blu) risultino rinforzi radicali più bassi.

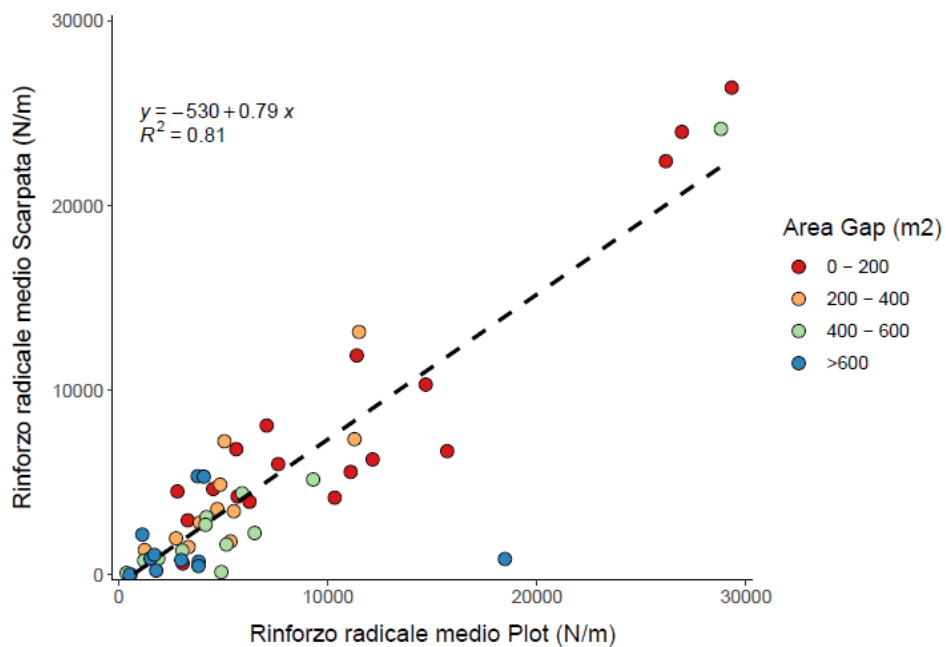


Figura 73: Relazione tra i rinforzi radicali all'interno dei plot e lungo le scarpate di frana e loro variazione in funzione dell'area dei gap.

### 3.4. Rilievi in campo

- **Dati ottenuti**

I dati ottenuti in campo sulle 20 frane sono stati utilizzati all'interno dell'analisi multivariata ed organizzati, insieme ai principali parametri descrittivi ottenuti da GIS, all'interno di apposite schede riportate negli allegati e di cui la figura 74 è un esempio.

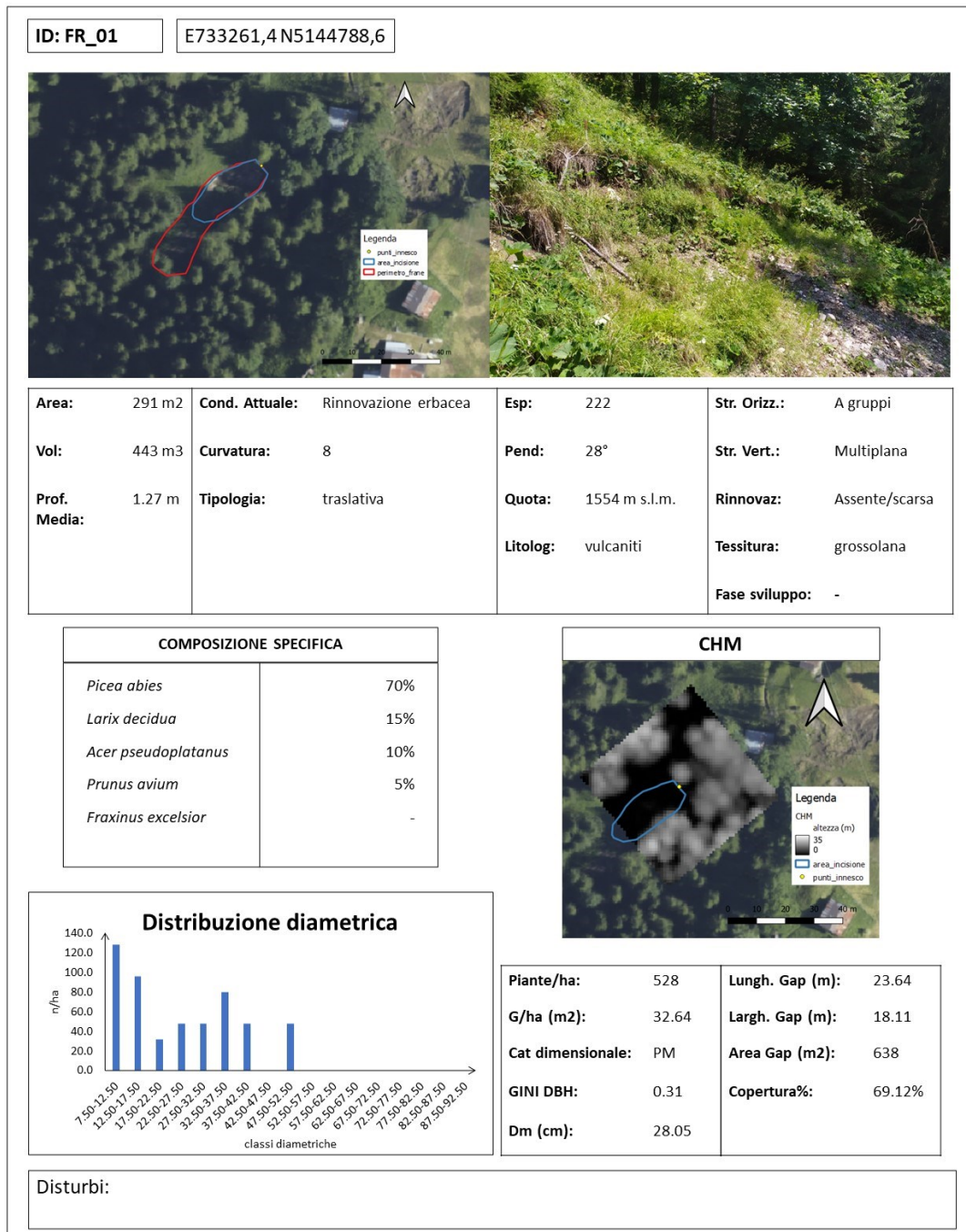


Figura 74: Parametri descrittivi della frana in campo FR\_01 e dati ottenuti in campo.



- **Analisi multivariata**

Relativamente alle 20 frane scelte per i rilevamenti in campo, è stata eseguita un'analisi multivariata includendo le variabili riportate in tabella 5 e, per i diametri, è anche stato calcolato il coefficiente di Gini. L'analisi multivariata riportata in figura 75 è rappresentata tramite un biplot realizzato con un'analisi delle componenti principali (PCA), la quale è una tecnica finalizzata a derivare, a partire da un set di variabili numeriche correlate, un insieme più ridotto di variabili ortogonali "artificiali". Nel grafico ogni vettore rappresenta una variabile e più queste si trovano ad una minore distanza (formando un angolo piccolo) più sono correlate tra di loro. Lo stesso funzionamento vale per i punti, relativi invece alle variabili categoriche qualitative. Il 50 % della dispersione dei dati può essere spiegata dalla prima (30%) e dalla seconda componente principale (20.8%). La prima componente (Dim.1) dipende sostanzialmente dalle variabili di copertura e dimensione dei gap e può essere intesa quindi come una componente relativa alla copertura del popolamento. La seconda componente (Dim.2) può invece essere intesa principalmente come un indicatore di intensità del fenomeno poiché l'area e il volume contribuiscono in maniera preponderante. Soffermandosi sulle variabili quantitative, come ci si può attendere, le dimensioni dei gap (area, lunghezza e larghezza) sono fortemente correlate positivamente tra di loro e aumentano al diminuire della copertura. L'area basimetrica (G/ha) si presenta in direzione opposta alle variabili relative ai gap. Riguardo alle variabili di intensità dei fenomeni franosi, la profondità, l'area e il volume sono strettamente correlate tra loro. In particolar modo è interessante osservare come, anche se moderatamente rappresentato (lunghezza non così elevata della freccia), il parametro di diametro medio (Dm), risulta correlato negativamente al volume e alla profondità media, mentre la copertura non risulta un parametro particolarmente influente a scala locale, dato che non è correlata significativamente a volume ed area, essendo disposta ortogonalmente rispetto ad esse. Osservando la disposizione delle variabili categoriche all'interno del biplot (i punti con il codice della categoria rappresentano il baricentro degli individui appartenenti alla categoria di riferimento) è possibile valutare, nell'ambito delle frane rilevate in campo, come si differenziano le principali caratteristiche strutturali dei popolamenti in funzione dell'intensità delle frane. Partendo dal considerare la struttura orizzontale, si può evincere come strutture regolari presentino una densità maggiore, coperture maggiori e, apparentemente, si concentrano frane con volumi superiori rispetto a strutture a gruppi o lacunose. Considerando invece la struttura verticale, si osserva come la differenziazione tra le due categorie (monoplana e multiplana) si ha lungo la seconda componente. La categoria composizione invece non presenta differenze evidenti. Infine, sulla base del parametro categorie dimensionali, si osserva come le categorie PG (piante grandi) e PP (piante piccole) siano anch'esse opposte lungo la seconda dimensione, evidenziando come nei popolamenti a prevalenza di piante piccole si siano osservati volumi ed aree di frana più elevati.

Tabella 5: Tabella di sintesi delle variabili quantitative e qualitative utilizzate nell'analisi multivariata.

Area	Volume	Prof media	Copertura	Lar Gap	Lun Gap	Area Gap	N/ha	G/ha	Dm	GINI Dbh	cat dim	STR_ORIZ	STR_VERT	COMP
291.24	443.05	1.71	69.12	18.11	23.64	638.54	528	32.63	28.05	0.316885	PM	A gruppi	Multipiana	Mista
174.45	65.29	0.42	89.88	4.42	11.02	62.67	592	14.64	17.75	0.167195	PP	Lacunosa	Monoplana	Pura
420.45	536.1	1.22	78.48	19.18	11.53	298.05	1472	46.20	19.99	0.170375	PP	Regolare	Monoplana	Pura
140.07	85.01	0.47	93.92	7.11	19.03	87.83	832	43.99	25.95	0.368339	PG	Lacunosa	Multipiana	Pura
187.35	121.82	0.71	46.96	23.25	20.02	1087.04	464	28.25	27.84	0.358309	PM	A gruppi	Multipiana	Pura
258.97	92.97	0.38	60.28	18.99	21.56	450.09	448	40.62	33.98	0.379766	PG	Lacunosa	Multipiana	Pura
111.91	51.2	0.43	57.72	8.30	5.74	360.25	528	58.63	37.60	0.357493	PG	Lacunosa	Multipiana	Pura
224.95	15.54	0.14	52.12	22.44	22.38	748.73	432	53.55	39.73	0.251035	PG	A gruppi	Multipiana	Mista
109.68	35.34	0.25	67.28	8.70	10.35	369.69	1232	57.11	24.29	0.303888	PG	Lacunosa	Multipiana	Mista
258.50	97.67	0.44	70.6	10.31	14.02	324.22	528	49.52	34.56	0.238884	PM	A gruppi	Multipiana	Mista
346.57	396.3	1.11	97.8	4.20	4.67	16.10	848	72.12	32.91	0.345998	PG	Regolare	Multipiana	Mista
279.22	274.37	0.80	99.24	0	0	0	672	48.93	30.44	0.280272	PM	Regolare	Multipiana	Mista
180.53	317.8	1.86	60.32	7.45	17.36	206.95	384	33.68	33.41	0.415267	PG	Lacunosa	Multipiana	Pura
122.36	123.24	1.56	87.4	15.57	5.82	115.70	640	35.91	26.72	0.268135	PM	Regolare	Monoplana	Mista
360.28	266.72	0.69	46.24	13.42	31.56	1256.05	448	18.33	22.82	0.278569	PM	Lacunosa	Monoplana	Mista
302.54	372.46	1.07	99.16	0	0	0	608	58.37	34.96	0.339106	PG	Regolare	Monoplana	Pura
104.40	92.51	0.81	99.8	0	0	0	368	24.95	29.38	0.320557	PG	Lacunosa	Monoplana	Mista
76.47	48.12	0.90	88.24	5.73	18.09	122.98	864	28.78	20.59	0.302046	PP	Regolare	Multipiana	Mista
139.64	111.74	0.96	67	17.21	20.74	588.70	256	38.38	43.68	0.148404	PM	Lacunosa	Monoplana	Pura
176.81	222.73	1.41	75.2	6.71	43.66	271.98	624	24.26	22.25	0.198546	PP	Regolare	Monoplana	Mista

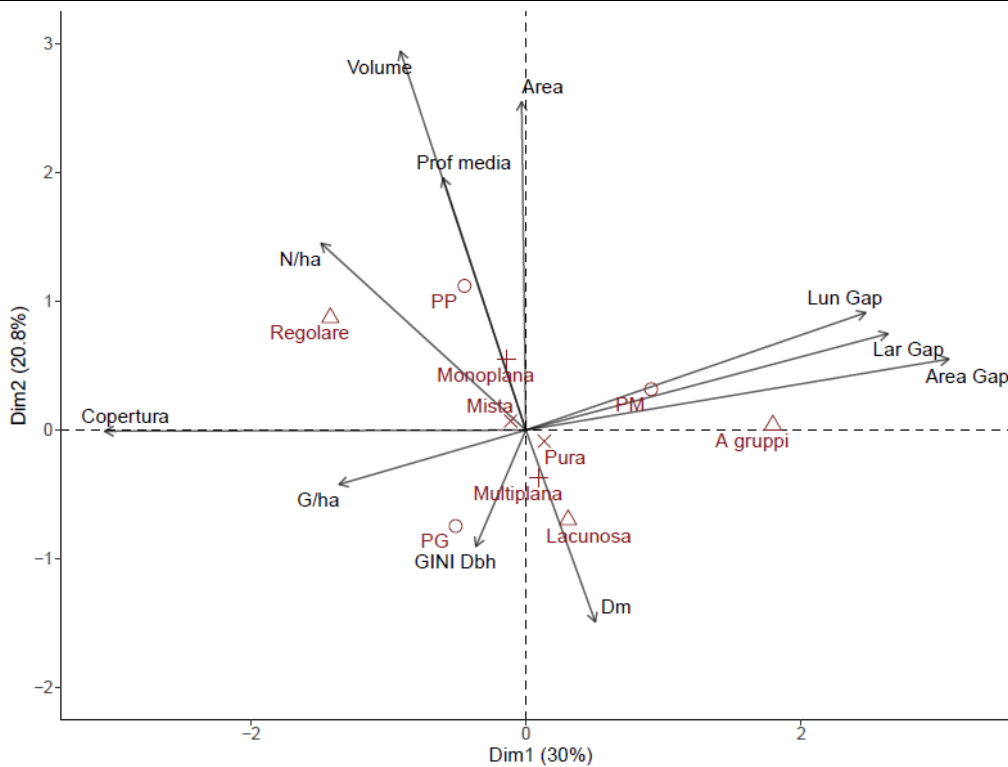


Figura 75: Grafico biplot PCA dell'analisi multivariata.

## 4. Discussioni

Tramite questi risultati è stato possibile valutare la funzione di protezione dei popolamenti forestali su un dataset di frane reali, innescate durante un evento estremo.

In questo studio è stato quindi predisposto un inventario di frane superficiali che sono state innescate in un'area colpita dalla tempesta Vaia. Tali inventari possono essere utili per avere un quadro completo della distribuzione delle frane, sia per l'archiviazione delle informazioni, sia per la rappresentazione cartografica di questi fenomeni (ISPRA, 2022); ad oggi, inoltre, sono relativamente facili da realizzare grazie all'utilizzo di dati telerilevati ad elevata risoluzione, come quelli analizzati nel presente lavoro di tesi. La fase di individuazione di fenomeni franosi potrebbe risultare ancora più immediata sfruttando tecniche come quelle di "change detection", che individuano automaticamente le modifiche della superficie in un intervallo temporale (IREA, 2022) e che possono essere ad esempio applicate alle ortofoto. Questo metodo può però risultare inefficace viste le dimensioni tendenzialmente ridotte delle frane superficiali e le possibili condizioni di scarsa visibilità (frane in zone d'ombra e in bosco). Un punto critico di questo studio può essere dato dalla mancata coregistrazione dei due dati lidar (pre e post evento), i quali possono non essere sovrapposti in maniera ottimale ed avere quindi fornito un DoD poco accurato. Sui 405.84 km<sup>2</sup> sono state individuate 469 fenomeni franosi e le litologie dei versanti in cui si sono innescati sono soprattutto vulcaniti e arenarie. Questo probabilmente perché sono rocce meno permeabili (tabella 6) che hanno quindi facilitato il deflusso superficiale e sottosuperficiale. Un risultato analogo è quello ottenuto da Pellegrini et al. (2021) che hanno osservato come la maggior parte delle frane superficiali si fossero innescate su litologie caratterizzate da basse permeabilità, al contrario delle colate detritiche in aree invece più permeabili, coperte ad esempio da ghiaioni. Dalla frequenza percentuale, la presenza di numerose frane in siti con litologia data da calcari e calcari dolomitici può essere quindi dovuta all'ampia area presentante questa tipologia di rocce.

Tabella 6: Permeabilità delle classi litologiche presenti.

LITOLOGIA	PERMEABILITÀ
Vulcaniti	Rocce POCO PERMEABILI ( $K= 10^{-4} - 10^{-6}$ cm/s)
Argilliti e gessi	Rocce POCO PERMEABILI ( $K= 10^{-4} - 10^{-6}$ cm/s)
Arenarie alternate a marne	Rocce POCO PERMEABILI ( $K= 10^{-4} - 10^{-6}$ cm/s)
Calcari e calcari dolomitici	Rocce MOLTO PERMEABILI ( $K>1$ cm/s)
Ghiaie	Depositi MOLTO PERMEABILI ( $K>1$ cm/s)
Depositi alluvionali misti	-
Morenico	-

Le pendenze alle quali sono situati i punti di innesco, corrispondono ai range osservati nell'ambito del progetto SilvaProtect-CH, essendo concentrate principalmente tra i 30° e i 40°. Risulta inoltre interessante osservare come le frane in bosco si siano verificate su pendenze tendenzialmente maggiori rispetto a quelle fuori bosco, in maniera statisticamente significativa ed analogamente a quanto descritto da Moos et al. (2016) e Rickli et al. (2019a).

Il fatto che, in quasi il 20% dei casi, le frane abbiano interessato il reticolo idrografico, può rappresentare un aspetto importante in termini di dinamiche geomorfologiche che interessano i bacini idrografici montani: la creazione di nuove aree sorgenti di sedimento può influire sul trasporto di quest'ultimo lungo il reticolo movimentabile a valle. Ciò rientra in una più ampia valutazione di incremento e variazione di connettività del sedimento a scala di bacino (Cavalli et al., 2013).

Per quanto riguarda le frane il cui innesco può essere legato alla presenza di strade, la percentuale ridotta rispetto al totale (8%) va in contrasto all'opinione comune secondo cui la presenza di strade determina la maggior parte delle frane superficiali nei bacini idrografici (Gucinski et al., 2001) a causa della loro influenza sui deflussi superficiali e sottosuperficiali. La bassa percentuale di inneschi dovuti alla presenza di strade può essere dovuta alla natura catastrofica dell'evento e può essere confrontata con quella ottenuta da Penna et al. (2014) in quanto la severità delle precipitazioni avrebbe causato un'instabilità dei versanti con inneschi maggiormente diffusi all'interno del bacino idrografico. Dai risultati ottenuti sull'intensità si può affermare che, in termini dimensionali, le frane combacino con i valori riportati in introduzione (studi di Moser e Schoger, 1989; Malamud et al., 2004; Markart et al., 2007; Rickli e Graf, 2009), dati i valori mediani di area pari a 177 m<sup>2</sup>, volume 163 m<sup>3</sup> e soprattutto le profondità medie la cui mediana è di 0.96 m. Anche la morfologia del terreno rispecchia le ipotesi iniziali, dato che nella maggior parte dei casi la tipologia è concava, coerentemente a quanto studiato da Hales et al. (2009) e Masi et al. (2021). Ciò può essere in qualche misura anche legato all'effetto di rinforzo dell'apparato radicale, il quale nelle zone concave, per una concentrazione dell'umidità che influisce sulla quantità di cellulosa nella radice, risulta minore. Inoltre, durante le precipitazioni l'acqua viene convogliata verso queste zone concave, facilitando il suo aumento nel suolo e quindi il possibile incremento di pressione della stessa, promuovendo il possibile innesco di frane.

Dalla relazione tra area e volume delle frane risulta evidente che all'aumentare di una aumenti anche l'altra, secondo una funzione di potenza. Confrontando le equazioni riportate da Zieher et al. (2016) e quella ottenuta in questo studio (equazione 8) sembra esserci una corrispondenza, soprattutto per valori di area superiori ai 200 m<sup>2</sup>. In entrambi gli studi vengono considerate le sole frane superficiali e caratterizzate attraverso DoD, a differenza di quelle analizzate in Guzzetti et al. (2009) dove sono state considerate anche quelle profonde, ottenendo un'equazione che si discosta maggiormente.

$$V_L = 0.6506 \times A_L^{1.0485} \quad (8)$$

Dei 469 fenomeni franosi totali, solo 116 si trovano in bosco e la matrice di correlazione indica che maggiori pendenze alle quali si innescano le frane in bosco determinino minori profondità medie delle frane, questo è probabilmente dovuto anche ad un suolo meno profondo. La copertura è nel 57% dei casi composta da peccete pure o miste e l'abete rosso è in effetti la specie forestale che determina una minore protezione dalle frane superficiali, come affermato da Schwarz et al. (2012b). Anche dalle quote dei punti di innesco, che si trovano per lo più tra i 1700 e i 2300 metri, si può dedurre un'importanza data dalla presenza delle foreste, infatti, nel range di quota che va dai 1900 ai 2200 m s.l.m. dovrebbe collocarsi il limite del bosco.

Riguardo ai valori mediani ottenuti, la copertura presenta un valore del 60.3%, leggermente superiore a quello ideale riportato nel manuale SFP, mentre le aree dei gap di 551.29 m<sup>2</sup> e 17.95 m di lunghezza sono compresi quindi tra valori minimi e ideali. La larghezza presenta invece una mediana di 15.83 m. Considerando i singoli parametri per osservare quale influisca maggiormente, nella maggior parte dei casi, nonostante le esigenze minime per garantire la protezione fossero rispettate all'interno dei plot 50x50, si sono ugualmente innescate frane (soprattutto per quanto riguarda la copertura percentuale, che si è dimostrata poco determinante) e le linee guida risultano più precise se si considerano le soglie di esigenze ideali. Tramite la corretta interpretazione, considerando la combinazione dei diversi parametri, risulta che queste siano ancora più affidabili. Bisogna comunque tenere in considerazione che queste linee guida sono nate per determinare una gestione a scala di unità gestionale (1 ha) o comunque più ampia di popolamento, mentre in questo studio si sono considerati plot di dimensioni 50x50 metri, in linea con quanto effettuato da Perzl e Kleemayr (2020).

È interessante osservare come la lunghezza dei gap sia l'unico parametro correlato alla magnitudo della frana, in quanto al suo aumentare tendono a diminuire profondità, area e volume. Apparentemente questo risultato è controintuitivo e può essere dovuto al fatto che gap lunghi possano anche presentare larghezze modeste e dunque innescare frane poco "svilupate" lateralmente, caratterizzate da aree e volumi inferiori. Quindi nonostante i gap di elevate dimensioni provochino una maggior concentrazione di frane, queste possono essere anche di modesta intensità. Un'altra spiegazione possibile per questo risultato può essere data dalla posizione del gap, che non sempre si trovava in prossimità del punto di innesco, ma in alcuni casi era posizionato più marginalmente all'interno del plot 50x50 e che potrebbe quindi non essere stato determinante nell'innesco della frana. Lo studio del rinforzo radicale tramite SOSlope ha evidenziato il fatto che lungo le scarpate di frana il rinforzo risultava per la maggior parte dei casi inferiore rispetto a quello interno al plot 50x50. Questo dato conferma l'effetto positivo determinato dagli apparati radicali e, quindi, della presenza di bosco nella protezione dall'innesco delle frane superficiali. I risultati relativi ai rinforzi radicali,

dato che la mediana è situata al di sotto dei 10000 N/m, concordano con quelli dello studio di Schwarz et al. (2012b), secondo il quale per ottenere una protezione dalle frane superficiali potrebbero essere necessari rinforzi fino a 30000 N/m, a seconda della pendenza e del tipo di terreno. Di conseguenza la presenza di una "zona debole" porta ad un comportamento simile a quello dei suoli nudi, in quanto con un rinforzo radicale scarso o assente il cedimento del pendio è più probabile e si verifica prima (Cohen e Schwarz, 2017).

L'analisi multivariata, invece, rappresenta il 50% della variabilità ed è stata applicata sulle sole 20 frane nelle quali sono stati eseguiti i rilievi in campo. Questa mette in luce le relazioni tra le differenti variabili considerate, ad esempio quelle relative l'intensità dei fenomeni franosi (profondità, area e volume) che, essendo rappresentate da vettori più vicini tra loro, sono strettamente dipendenti. Risulta però più interessante determinare le caratteristiche che rendono un popolamento forestale più o meno efficace nella protezione legata all'intensità di frane superficiali: con categorie dimensionali più piccole, maggiore numero di piante ad ettaro, struttura verticale monopiana ed orizzontale regolare, si riscontrano maggiori intensità delle frane, che viceversa assumono valori inferiori se presenti piante di maggiori dimensioni (quindi maggiore diametro medio e, tendenzialmente, popolamenti a minore densità), struttura orizzontale lacunosa e struttura verticale multiplana. Questi ultimi risultati, condivisi anche dagli studi di Rickli et al. (2019a) e Bebi et al. (2019), potrebbero rappresentare una base empirica per una gestione selvicolturale efficace nelle foreste di protezione nei confronti di frane superficiali e la struttura orizzontale lacunosa concorda con i risultati della matrice di correlazione, per cui anche gap lunghi non determinano elevate intensità di frana ma possono provocare ad un maggior numero di inneschi. Dai risultati ottenuti, non è stato possibile osservare differenze in termini di composizione specifica. Da quanto riportato da Rickli et al. (2019a), comunque, una composizione mista con maggiore eterogeneità di distribuzione delle radici, può portare ad una migliore resistenza ed un'adeguata funzione protettiva nei confronti di questi fenomeni. È bene ricordare anche che, come hanno dimostrato Liu et al. (2021), il recupero del rinforzo radicale nei primi quattro anni post-disturbo in popolamenti forestali ad alta quota (cioè a 1800 m s.l.m.) è lento o quasi assente ed i popolamenti di abete rosso (specie prevalente nell'area di studio di questa tesi) a questa altitudine, necessitano di particolare attenzione per lo studio delle dinamiche di rinforzo radicale a lungo termine.

Sulle 20 frane nelle quali sono stati eseguiti i rilievi in campo 16 hanno presentato disturbi naturali secondari (oltre alla presenza della frana superficiale), dei quali la maggior parte sono schianti da vento (13) seguiti da attacco di bostrico (7) e schianti da neve (4). La presenza di disturbi "a cascata" su diversi popolamenti nell'area di studio, può determinare una finestra di suscettibilità per la quale

risulta necessario agire attraverso la pianificazione di una gestione post disturbo efficace, ai fini di garantire il più possibile la funzione protettiva delle foreste considerate.

## 5. Conclusioni

Da questo studio si può comprendere l'importante effetto protettivo che le foreste svolgono nei confronti degli inneschi di frane superficiali. In questo lavoro sono state individuate tramite confronto di ortofoto e DTM pre e post evento, 469 frane superficiali, delle quali 116 si sono innescate all'interno di superfici boscate. Quest'ultime, oltre ad essere meno frequenti, si sono anche innescate su versanti con maggiori pendenze. Prima però di considerare nello specifico il ruolo del bosco, si può riportare quanto emerso riguardo le condizioni stazionali, per cui le frane si sono innescate nel complesso maggiormente su litologie composte da rocce permeabili, pendenze intorno ai 35° e morfologie concave. Dai risultati relativi alle caratteristiche dimensionali dei gap, è emerso che in siti con presenza di aperture lunghe si sono innescate frane caratterizzate da area, profondità e volumi inferiori, ma in ogni caso evitare gap di elevate superfici risulta la scelta migliore, in quanto causano un maggior numero di inneschi. Infatti, le frane superficiali osservate si sono registrate in plot con gap di lunghezza mediana pari a circa 18 m. Per la gestione delle foreste di protezione, in termini quantitativi, le linee guida riportate dal manuale SFP possono risultare efficaci se si considera la combinazione di tutti i parametri riguardanti la copertura e i gap, bisogna comunque tenere in considerazione che queste linee guida sono nate per determinare una gestione a scala di popolamento, mentre in questo studio si stanno considerando plot di dimensioni 50x50 metri. Il ruolo di protezione della foresta è attribuibile in gran parte all'effetto del rinforzo radicale, con il quale si costituisce una matrice rinforzata tra terreno e radici e che può determinare una maggiore stabilità dei versanti, evitando l'innescamento di frane superficiali. Questo è stato confermato dai risultati ricavati tramite SOSlope secondo i quali, nella maggior parte dei casi (42 frane su 53), il rinforzo presenterebbe valori inferiori lungo le scarpate di frana che non negli interi plot 50x50. Per pianificare una gestione selvicolturale efficace delle foreste di protezione, che permetta di ottenere la stabilità dei versanti, i risultati di questo lavoro possono fungere da supporto, per cui sarebbe preferibile optare per una struttura verticale multiplana e garantire un'adeguata compartecipazione di piante di grandi dimensioni (DBH > 47,5 cm). Una struttura orizzontale lacunosa è risultata più efficace rispetto a quelle regolari o a gruppi e potrebbe essere ricondotta ad un popolamento disetaneiforme, con caratteristiche strutturali più eterogenee. Secondo altri studi può risultare efficace una composizione mista, che oltre ad una maggiore resistenza per la migliore distribuzione spaziale dei diversi apparati radicali, fornirebbe anche un'adeguata funzione protettiva.

La tempesta Vaia, considerata come fattore scatenante delle frane nel presente studio, oltre alle forti precipitazioni ha anche causato schianti molto diffusi nell'area esaminata e, oltre al problema dato dalle infestazioni di bostrico alle quali stiamo assistendo, si potrebbe verificare nei prossimi anni un incremento di innesco di nuovi fenomeni franosi superficiali, per effetto del decadimento degli



apparati radicali e del loro rinforzo. Per ridurre i danni che verranno di conseguenza causati in queste aree schiantate, soprattutto se presenti elementi vulnerabili a valle (per esempio centri abitati), può essere importante intervenire tramite rimboschimenti ed opere di difesa per stabilizzare i versanti fin quando il rinforzo radicale non sarà ripristinato.

## 6. Bibliografia

- ArcGIS for Windows v.10.7. Redlands, California: Esri
- ARPAV. 2019. RELAZIONE EVENTO 27/10/2018 – 01/11/2018 Art.9 del D.P.G.P. n.35 del 26 agosto 2008.
- ARPAV. 2022. [www.arpa.veneto.it](http://www.arpa.veneto.it)
- Bathurst J. C., Moretti G., El-Hames A., Beguería S., García-Ruiz J. M. 2007. Modelling the impact of forest loss on shallow landslide sediment yield, Ijuez river catchment, Spanish Pyrenees. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 569–583
- Baumhauer R. 2013. *Physische Geographie 1: Geomorphologie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 3 ed. 144 p.
- Beaudoin J.J. 1990. *Handbook of Fiber-Reinforced Concrete. Principles, Properties, Developments and Applications*; William Andrew: Park Ridge, NJ, USA, 1990; pp. 1–332.
- Bebi P., Bast A., Ginzler C., Rickli C., Schöngrundner K., Graf F. 2019. Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse. *Schweiz Z Forstwes* 170 (2019) 6: 318–325
- Benda L., Dunne T. 1997. Stochastic forcing of sediment supply to channel networks from land sliding and debris flow. *Water Resour Res* 33:2849–2863
- Berretti R., Caffo L., Camerano P., De Ferrari F., Domaine A., Dotta A., Gottero F., Haudemand J-C., Letey C., Meloni F., Motta R., Terzuolo P.G. 2006. *Selvicoltura nelle foreste di protezione: esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e Valle d’Aosta*. Arezzo: Compagnia delle Foreste S.r.l.
- BGEO. 2022. Frana. <https://www.bgeo.it/glossario/frana/>
- Bischetti G. B., Chiaradia E. A., Simonato T., Speziali B., Vitali B., Vullo P., Zocco A. 2005. Root Strength and Root Area Ratio of Forest Species in Lombardy (Northern Italy), *Plant Soil*, 278, 11 22, <https://doi.org/10.1007/s11104-005-0605-4>
- Bischetti G.B., Chiaradia E.A., Epis T., Morlotti E. 2009. Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant Soil* 324:71–89.
- Bischetti, G., Bassanelli, C., Chiaradia, E., Minotta, G., Vergani, C., 2016. The effect of gap opening on soil reinforcement in two conifer stands in northern Italy. *For. Ecol. Manag.* 359, 286–299.
- Borga M. 2021. Analisi della severità pluviometrica dell'evento Vaia: 27-29 ott 2018. In *Atti Gli eventi pluviometrici del 1966 e VAIA a confronto*, Università degli Studi di Padova, Padova, 01 July 2021
- Brang P., Schönenberger W., Ott E., Gardiner B. 2001. Forest as protection from natural hazards. In: Evans J, editor. *The Forest Handbook Volume 2, Applying Forest Science for Sustainable Management*. Blackwell Science; 2001. p. 53-81. DOI:10.1002/9780470 757079.ch3

- BRP/BWW/BUWAL 1997. Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Ta..tigkeiten – Empfehlung. BRP/BWW/BUWAL, Bern: 42 p
- Cannon S.H., Reneau S.L. 2000. Conditions for generation of fire-related debris flows, Capulin Canyon, New Mexico. *Earth Surf. Proc. & Landforms* 25, 1103-1121
- Carlyle-Moses, D.E., Gash, J.H.C., 2011. Rainfall interception loss by forest canopies, chapter. *Forest Hydrology and Biogeochemistry. Ecological Studies* 216. Springer, pp. 407–423.
- Cat Berro D., Acordon V., Castellano C. 2018. 27-30 Ottobre 2018: scirocco eccezionale, mareggiate e alluvioni in Italia con la tempesta “Vaia” SMI/Redazione Nimbus - 31 ottobre 2018 <http://www.nimbus.it/eventi/2018/181031TempestaVaia.htm>
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L. 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology* 188 (2013) 31–41
- Centrometeo. 2022. Scala e misura dei venti: la classificazione Beaufort. <http://www.centrometeo.com/>
- Chirici G., Giannetti F., Travaglini D., Nocentini S., Francini S., D’Amico G., Calvo E., Fasolini D., Broll M., Maistrelli F., Tonner J., Pietrogiovanna M., Oberlechner K., Andriolo A., Comino R., Faidiga A., Pasutto I., Carraro G., Zen S., Contarin F., Alfonsi L., Wolynski A., Zanin M., Gagliano C., Tonolli S., Zoanetti R., Tonetti R., Cavalli R., Lingua E., Pirotti F., Grigolato S., Bellingeri D., Zini E., Gianelle D., Dalponte M., Pompei E., Stefani A., Motta R., Morresi D., Garbarino M., Alberti G., Valdevit F., Tomelleri E., Torresani M., Tonon G., Marchi M., Corona P., Marchetti M, 2019. Stima dei danni della tempesta “Vaia” alle foreste in Italia. *Forest@* 16: 3-9. – doi: 10.3832/efor3070-016 [online 2019-02-15]
- Cohen D., Lehmann P., Or D. 2009. Fiber bundle model for multiscale modeling of hydromechanical triggering of shallow landslides, *Water Resour. Res.*, 45, W10436, <https://doi.org/10.1029/2009WR007889>
- Cohen D., Schwarz M. 2017. Tree-root control of shallow landslides. *Earth Surf Dynam* 5: 451–477.
- Dazio E., Conedera M., Schwarz M. 2018. Impact of different chestnut coppice managements on root reinforcement and shallow landslide susceptibility. *For Ecol Manage* 417: 63–76.
- Dhakal A.S., Sidle R.C. 2003. Long-term modelling of landslides for different forest management practices. *Earth Surf. Process. Landf.* 28, 853–868.
- Dorren L., Schwarz M. 2016. Quantifying the Stabilizing Effect of Forests on Shallow Landslide Prone Slopes
- Dorren L. 2017. FINT – Find individual trees. User manual. ecorisQ paper ([www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org)): 5 p.
- Ennos A.R. 1990. The anchorage of leek seedlings: The effect of root length and soil strength. *Ann. Bot.*, 65, 409–416. [CrossRef]

- Fan C.C., Tsai M.H. 2016. Spatial distribution of plant root forces in root-permeated soils subject to shear. *Soil Tillage Res* 156: 1–15.
- Feuillet T., Mercier D., Decaulne A., Cossart E. 2012. Classification of sorted patterned ground areas based on their environmental characteristics (Skagafjörður, Northern Iceland). *Geomorphology* 139–140: 577–587
- FINT for Windows v1.11. Geneva: EcorisQ.
- Flepp G., Robyr R., Scotti R., Giadrossich F., Conedera M., Vacchiano G., Fischer C., Ammann P., May D., Schwarz M. 2021. Temporal Dynamics of Root Reinforcement in European Spruce Forests. *Forests* 2021, 12, 815
- Fredlund D.G. 1979. Second Canadian geotechnical colloquium: appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Can Geotech J* 16(1):121–139
- Frehner M., Wasser B., Schwitter R. 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. *Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)
- G.M.P.E. 2022. Le frane. <https://www.gmpe.it/geomorfologia/frane>
- Gaiardo M. J. 1997. L'Agordino e la sua storia attraverso le carte geografiche, Belluno, Tipografia Piave, 1997, p. 13
- Garcia-Ruiz J.M., Begueri'a S., Alatorre L.C., Puigdefa'bregas J. 2010. Land cover changes and shallow landsliding in the flysch sector of the Spanish Pyrenees. *Geomorphology* 124 (3–4):250–259
- Gauquelin X., Courbaud B. 2006. Editors. *Guide des Sylvicultures de Montagne*. Alpes du Nord Françaises. Cemagref, CRPF Rhône-Alpes, ONF; 2006. 289 p.
- Gehring E., Conedera M., Maringer J., Giadrossich F., Guastini E. et al. 2019. Shallow landslide disposition in burnt European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests. *Sci Rep* 9: 8638.
- Genet M., Li M., Luo T., Fourcaud T., Clément-Vidal A., Stokes A. 2010. Linking carbon supply to root cell-wall chemistry and mechanics at high altitudes in *Abies georgei*. *Ann. Bot.*, 107, 311–320.
- Geoportale Regione Veneto - <https://idt2.regione.veneto.it/>
- Giadrossich F., Cohen D., Schwarz M., Ganga A., Marrosu R. et al. 2019. Large roots dominate the contribution of trees to slope stability. *Earth Surf Process Landforms* 44: 1602–1609.
- Giannetti F., Pecchi M., Travaglini D., Francini S., D'Amico G., Vangi E., Coccozza C., Chirici G. 2021. Estimating VAIA Windstorm Damaged Forest Area in Italy Using Time Series Sentinel-2 Imagery and Continuous Change Detection Algorithms. *Forests* 2021, 12, 680. <https://doi.org/10.3390/f12060680>
- Greenway D.R. 1987. Vegetation and slope stability. In *Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology*; Anderson, M.G., Richards, K.S., Eds; Wiley: Chichester, UK; pp. 187–230.

- Gucinski H., Furniss M. J., Ziemer R. R., Brookes M. H. 2001. Forest roads: A synthesis of scientific information, Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-509, US Dept. of Agric. For. Serv. Pac. Northwest Res. Stat., Portland, Oreg., 103 pp.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., Valigi, D. 2009. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, Central Italy. *Earth Planet. Sci. Lett.* 279, 222–229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2009.01.005>.
- Haigh M.J., Rawat J.S., Rawat M.S. 1995. Interactions between forest and landslide activity along new highways in the Kumaun Himalaya. *For Ecol Manag* 78(1–3):173–189
- Hales T.C., Ford C.R., Hwang T., Vose J.M., Band L.E. 2009. Topographic and ecologic controls on root reinforcement. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 114.
- Hasenmueller E.A., Gu X., Weitzman J.N., Adams T.S., Stinchcomb G.E., Eissenstat D.M., Drohan P.J., Brantley S.L., Kaye J.P. 2017. Weathering of rock to regolith: The activity of deep roots in bedrock fractures. *Geoderma*, 300, 11–31.
- Hwang T., Band L.E., Hales T.C., et al. 2015. Simulating vegetation controls on hurricane-induced shallow landslides with a distributed ecohydrological model. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* n/a
- IREA. 2022. Tecniche di change detection. [http://www.irea.cnr.it/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=137&Itemid=127](http://www.irea.cnr.it/index.php?option=com_k2&view=item&id=137&Itemid=127)
- ISPRA. 2022. IFFI- Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia. [www.isprambiente.gov.it/it/progetti/cartella-progetti-in-corso/suolo-e-territorio-1/iffi-inventario-dei-fenomeni-franosi-in-italia](http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/cartella-progetti-in-corso/suolo-e-territorio-1/iffi-inventario-dei-fenomeni-franosi-in-italia)
- Jakob M. 2000. The impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia. *CATENA* 38:279–300
- Kim D., Im S., Lee C., Woo C. 2013. Modeling the contribution of trees to shallow landslide development in a steep, forested watershed. *Ecol Eng* 61:658–668
- Ladier J, Rey F, Dreyfus P. 2012. Editors. Guide des Sylvicultures de Montagne. Alpes du Sud françaises. OFN, Irstea, Centre PACA; 2012. 301 p.
- Lehmann P., Or D. 2012. Hydromechanical triggering of landslides: from progressive local failures to mass release. *Water Resour Res* 48:8250–8262
- Li S.C., Sun H.L., Yang Z.R., Xiong W.L., Cui B.S. 2007. Root anchorage of *Vitex negundo* L. on rocky slopes under different weathering degrees. *Ecol. Eng.*, 30, 27–33.
- Lingua E., Marzano R., Berger F. 2017. Mountain Watersheds and Ecosystem Services: Balancing multiple demands of forest management in head-watersheds. European Forest Institute: 115-122 pp.
- Liu W., Yang Z., He S. 2021. Modeling the landslide-generated debris flow from formation to propagation and run-out by considering the effect of vegetation. *Landslides* 2021, 18, 43–58.

- Losey S., Wehrli A. 2013. Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Federal Office for the Environment FOEN, Bern: 29 pp
- Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzetti F., Reichenbach P. 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surf Process Landf* 29: 687–711
- Mao Z., Saint-André L., Genet M., Mine F.X., Jourdan C., Rey H., Courbaud B., Stokes A. 2012. Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models. *Ecol. Eng.*, 45, 55–69.
- Markart G., Perzl F., Kohl B., et al. 2007. 22nd and 23rd august 2005 – analysis of flooding events and mass movements in selected communities of Vorarlberg. BFW-Dokumentation 5/2007: 45 pp
- Masi, E.B.; Segoni, S.; Tofani, V. 2021. Root Reinforcement in Slope Stability Models: A Review. *Geosciences* , 11, 212. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050212>
- Mattli J. 2014. Quantifizierung der Wurzelverstärkung im Schutzwald. Zollikofen: Hochschule Agrarforst- Lebensmittelwissenschaften, Bachelorarbeit. 79 p.
- Microsoft Excel for Windows v18.0. Redmond, Washington: Microsoft
- Milledge D.G., Bellugi D., McKean J.A. 2014. A multidimensional stability model for predicting shallow landslide size and shape across landscapes. *J Geophys Res Earth Surf* 119:2481–2504
- Moos C., Bebi P., Graf F., Mattli J., Rickli C., Schwarz M. 2016. How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides? *Earth Surf. Process. Landforms*
- Moser M., Schoger H. 1989. Die Analyse der Hangbewegungen im mittleren Inntal anlässlich der Unwetterkatastrophe 1985. *Wildbach- Lawinenverbau* 53(110):1–22
- Murgia I., Giadrossich F., Mao Z., Cohen D., Capra G.F., Schwarz M. 2022. Modeling shallow landslides and root reinforcement: A review. *Ecological Engineering*, Volume 181, 106671, ISSN 0925-8574,
- O’Loughlin C.L. 1974. The effect of timber removal on the stability of forest soils. *J. Hydrol.* 121–134. *Geosciences*, 11, 212 21 of 24
- Okada Y., Kurokawa U. 2015. Examining effects of tree roots on shearing resistance in shallow landslides triggered by heavy rainfall in Shobara in 2010. *J For Res* 20:230–235
- Pagès J. 2015. *Multiple Factor Analysis by Example Using R*. Taylor & Francis Group
- Pawlik Ł., Phillips J.D., Šamonil P. 2016. Roots, rock, and regolith: Biomechanical and biochemical weathering by trees and its impact on hillslopes—A critical literature review. *Earth Sci. Rev.*, 159, 142–159.
- Peduzzi P. 2010. Landslides and vegetation cover in the 2005 North Pakistan earthquake: A GIS and statistical quantitative approach. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10:623–640

- Pellegrini G., Martini L., Cavalli M., Rainato R., Cazorzi A., Picco L. 2021. The morphological response of the Tegnass alpine catchment (Northeast Italy) to a Large Infrequent Disturbance. *Science of the Total Environment* 770
- Penna D., Borga M., Aronica G. T., Brigandi G., and Tarolli P. 2014. The influence of grid resolution on the prediction of natural and road-related shallow landslides.
- Perzl F. 2008. Ein Minimalstandard für die Dokumentation der Schutzwirkungen des Waldes im Rahmen der Österreichischen "Initiative Schutz durch Wald". In: Conference Proceedings - Internationales Symposium Interpraevent; 2008; Dornbirn; 2. p. 551-562.
- Perzl F. 2014. Der Objektschutzwald. Bedeutung und Herausforderung. *BFW-Praxisinformation*. 2014; 34:20-24.
- Perzl F, Kleemayr K. Assessment of forest protection effects and functions for natural hazard processes. 2020. GreenRisks4Alps Report D.T.1.3.2. Available from: [https://www.alpinespace.eu/projects/greenrisk4alps/deliverables/a.t1\\_prona/d.t.1.3.2\\_assessment\\_of\\_protective\\_effects\\_of\\_forest\\_2.pdf](https://www.alpinespace.eu/projects/greenrisk4alps/deliverables/a.t1_prona/d.t.1.3.2_assessment_of_protective_effects_of_forest_2.pdf)
- Perzl, F., Bono A., Garbarino M., Motta R. 2021. Protective Effects of Forests against Gravitational Natural Hazards. 10.5772/intechopen.99506.
- Phillips C.J., Watson A.J. 1994. Structural tree root research in New Zealand: a review, *Landcare Research Science Series N\_7*: 70 pp
- Pollen N. Simon A. Collison, A. 2004 Advances in assessing the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. In *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*; Bennett S.J., Simon A. Eds.; American Geophysical Union: Washington, DC, USA, 2004; pp. 125-139.
- Prosser I.P., Williams L. 1998. The effect of wildfire on runoff and erosion in native *Eucalyptus* forest. *Hydrol. Processes* 12, 251-265.
- Provincia Autonoma di Bolzano Alto Adige. 2022. Meteo Alto Adige. <https://webapp-afbs.prov.bz.it/>
- Provincia Autonoma di Trento. 2008. Linee tecniche per la redazione dei piani di gestione forestale aziendale e dei piani semplificati di coltivazione.
- Provincia Autonoma di Trento. 2011. Inventario dendrometrico nella nuova pianificazione forestale aziendale trentina (NPFAT).
- QGIS for Windows v3.26.3. Bialowieza: QGIS
- Regione del Veneto. 2022. Il Geoportale della Regione del Veneto. <https://idt2.regione.veneto.it/>
- Regione Veneto. 2022. Veneto in ginocchio. <https://www.regione.veneto.it/web/veneto-inginocchio/le-immagini-del-disastro>




- Reubens B., Poesen J., Danjon F., Geudens G., Muys B. 2007. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review. *Trees*, 21, 385–402.
- Rickli C., Zürcher K., Frey W., Lüscher P. 2002. Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. *Schweiz Z Forstwes* 153: 437–445. doi: 10.3188/szf.2002.0437
- Rickli, C., Bucher, H.U., 2003: Oberflächennahe Rutschungen, ausgelöst durch die Unwetter vom 15.-16.7.2002 im Napfgebiet und vom 31.8.-1.9.2002 im Gebiet Appenzell. Projektbericht zuhanden des Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG. 96 S.
- Rickli C., Raetzo H., McArdell B., Presler J. 2008. Hanginstabilitäten. In: Bezzola, GR, Hegg C, editors. Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bern: Bundesamt Umwelt. pp. 97–116.
- Rickli C., Graf F. 2009. Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland. *For Snow Landsc Res* 82(1):33–44.
- Rickli C., Graf F., Bebi P., Bast A., Loup B., McArdell B. 2019a. Schützt der Wald vor Rutschungen? Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank. *Schweiz Z Forstwes* 170 (2019) 6: 310–317
- Rickli C., Bebi P., Graf F., Moos C. 2019b. Shallow Landslides: Retrospective Analysis of the Protective Effects of Forest and Conclusions for Prediction. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature.
- Roering J.J., Schmidt K.M., Stock J.D., Dietrich W.E., Montgomery D.R. 2003. Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range. *Can. Geotech. J.* 40, 237–253.
- RStudio (v. 1.4.2) - RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R.
- Schmidt K.M., Roering J., Stock J., Dietrich J.D., Montgomery W.E., Schaub D.R.T. 2001. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Can. Geotech. J.* 38, 995–1024.
- Schwarz M., Cohen D., Or D. 2010. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles, *J. Geophys. Res.-Earth*, 115, F04035, <https://doi.org/10.1029/2009JF001603>
- Schwarz M., Cohen D., Or D. 2012a. Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: theory and case study. *Geomorphology* 171–172: 190–200
- Schwarz M., Thormann J.J., Zürcher K., Feller K. 2012b. Quantifying root reinforcement in protection forests: Implications for slope stability and forest management. *Proc Interpraevent* 23–26 April 2012, Grenoble, France. pp. 791–802.
- Schwarz, M., F. Giadrossich, and D. Cohen (2013), Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4367–4377.



- Schwarz M., Rist A., Cohen D., Giadrossich F., Egorov P. et al. 2015. Root reinforcement of soils under compression. *J Geophys Res* 120: 2103–2120.
- Selby M.J. 1993. *Hillslope Materials and Processes*, 2nd ed.; Oxford University Press: Oxford, UK, 1993; pp. 1–466.
- Sidle R.C. 1992. A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. *Water Resources* 28:1897–1910
- Sidle R.C., Wu W. 1999. Simulation effects of timber harvesting on the temporal and spatial distribution of shallow landslides. *Z Geomorphol NF* 43:185–201
- Sidle R.C., Ochiai H. 2006. *Landslides: processes, prediction, and land use*. American Geophysical Union, Washington, DC
- SOSlope for Windows v1.5.0. Geneva: EcorisQ.
- Statgraphics Centurion for Windows v 19.4.02. The Plains, Virginia: Statgraphics Technologies, Inc.
- Stokes A., Norris J., Van Beek L.P.H., Bogaard T., Cammeraat E., Mickovski S.B., Jenner A., Di Iorio A., Fourcaud T. 2008. How vegetation reinforces soil on slopes. In *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*; Norris, J.E., Stokes, A., Mickovski, S.B., Cammeraat, E., Van Beek, R., Nicoll, B.C., Achim, A., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands; pp. 1–288.
- Toll D.G., Lourenco S.D.N., Mendes J. et al. 2011. Soil suction monitoring for landslides and slopes. *Q J Eng Geol Hydrogeol* 44:23–33
- VaiaLand, Progetto. Valuation and Application of Innovative Approaches in LANDslide risk mitigation - <https://storymaps.arcgis.com/stories/805a52d1c18a4b4a8e44a30c153d5f39>
- Valt M., Salvatori R., Salzano R., Marigo G. 2019. Identification of potential avalanche areas associated with the Vaia storm using Sentinel-2 data. *Neve e valanghe* (93): 8-19
- Vergani, C., Graf, F., 2015. Soil permeability, aggregate stability and root growth: a pot experiment from a soil bioengineering perspective. *Ecohydrology* <http://dx.doi.org/10.1002/eco.1686>.
- Vergani C., Schwarz M., Soldati M., Corda A., Giadrossich F., Chiaradia E. A., Morando P., Bassanelli C. 2016. Root reinforcement dynamics in subalpine spruce forests following timber harvest: a case study in Canton Schwyz, Switzerland, *Catena*, 143, 275–288, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.038>
- Vergani C., Giadrossich F., Buckley P., Conedera M., Pividori M., Salbitano F., Rauch H.S., Lovreglio R., Schwarz M. 2017. Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review. *Earth-Science Reviews*. Volume 167: 88-102,
- Waldron L.J. 1977. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 843–849.

- Waldron L.J., Dakessian S. 1981. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties. *Soil Sci* 132: 427–435.
- Wu T.H., McKinnell III W.P., Swanston D.N. 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Can Geotechn J* 16: 19–33.
- Zieher T., Perzl F., Rössel M., Rutzinger M., Meißl G., Markart G., Geitner C. 2016. A multi-annual landslide inventory for the assessment of shallow landslide susceptibility – Two test cases in Vorarlberg, Austria. *Geomorphology* 259 (2016) 40–54
- Ziemer R. 1981. Roots and the stability of forested slopes. In *Proceedings of the International Symposium on Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands*, Christchurch, New Zealand, 25–31 January 1981; pp. 343–361.

## Allegati 1- Scheda di campo

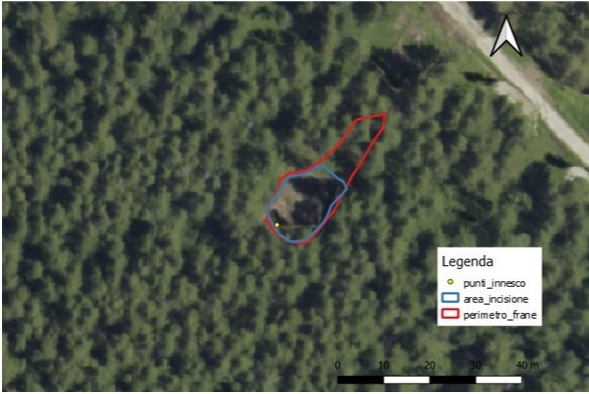

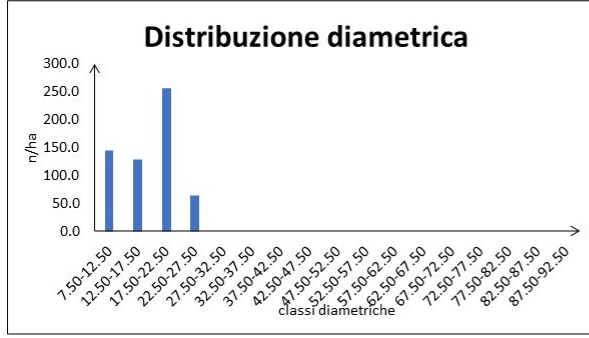
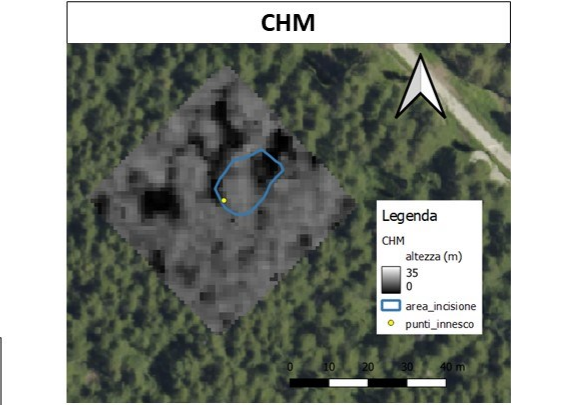
<b>1. Inquadramento e caratterizzazione frana</b>	ID: _____ Data: _____																								
1a. Condizione attuale: <input type="checkbox"/> inalterata <input type="checkbox"/> sistemata <input type="checkbox"/> rinnovazione erbacea <input type="checkbox"/> segni di erosione <input type="checkbox"/> altro _____																									
1b. Tipologia: <input type="checkbox"/> rotazionale <input type="checkbox"/> traslativa _____																									
1c. Profondità media: _____ m <span style="float: right;">1 d. Profondità massima: _____ m</span>																									
<b>2. Geomorfologia</b>	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; padding: 5px;">1 </td> <td style="width: 33%; padding: 5px;">2 </td> <td style="width: 33%; padding: 5px;">3 </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">4 </td> <td style="padding: 5px;">5 </td> <td style="padding: 5px;">6 </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">7 </td> <td style="padding: 5px;">8 </td> <td style="padding: 5px;">9 </td> </tr> </table>	1 	2 	3 	4 	5 	6 	7 	8 	9 															
1 	2 	3 																							
4 	5 	6 																							
7 	8 	9 																							
2a. Curvatura: _____																									
<b>3. Piante più vicine alla zona di innesco</b>																									
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">3a. 1. Distanza _____ m</td> <td style="width: 33%;">Dbh _____ cm</td> <td style="width: 33%;">Specie _____</td> </tr> <tr> <td>2. Distanza _____ m</td> <td>Dbh _____ cm</td> <td>Specie _____</td> </tr> <tr> <td>3. Distanza _____ m</td> <td>Dbh _____ cm</td> <td>Specie _____</td> </tr> <tr> <td>4. Distanza _____ m</td> <td>Dbh _____ cm</td> <td>Specie _____</td> </tr> <tr> <td>5. Distanza _____ m</td> <td>Dbh _____ cm</td> <td>Specie _____</td> </tr> <tr> <td>6. Distanza _____ m</td> <td>Dbh _____ cm</td> <td>Specie _____</td> </tr> <tr> <td>7. Distanza _____ m</td> <td>Dbh _____ cm</td> <td>Specie _____</td> </tr> <tr> <td>8. Distanza _____ m</td> <td>Dbh _____ cm</td> <td>Specie _____</td> </tr> </table>		3a. 1. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____	2. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____	3. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____	4. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____	5. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____	6. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____	7. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____	8. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____
3a. 1. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____																							
2. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____																							
3. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____																							
4. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____																							
5. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____																							
6. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____																							
7. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____																							
8. Distanza _____ m	Dbh _____ cm	Specie _____																							
<b>4. Presenza di disturbi</b>																									
4a. <input type="checkbox"/> Schianti da vento <input type="checkbox"/> Schianti da neve <input type="checkbox"/> Bostrico <input type="checkbox"/> Cad. massi <input type="checkbox"/> Altro _____																									
<b>5. Plot 50x50m</b>	5a. Copertura: _____ %																								
5b. Struttura orizzontale: <input type="checkbox"/> regolare <input type="checkbox"/> lacunosa <input type="checkbox"/> a gruppi																									
5c. Struttura verticale: <input type="checkbox"/> monoplana <input type="checkbox"/> multiplana <input type="checkbox"/> biplana																									
5d. Fase sviluppo (solo monoplana): <input type="checkbox"/> spessina <input type="checkbox"/> perticaia <input type="checkbox"/> adulto <input type="checkbox"/> maturo																									
5e. Tessitura (solo multiplana): <input type="checkbox"/> Fine <input type="checkbox"/> Grossolana																									
5f. Composizione: _____																									
5g. Rinnovazione: <input type="checkbox"/> Assente/scarsa <input type="checkbox"/> Buona/abbondante																									
Note: _____ _____ _____																									

6. Plot 50x50m diametro/specie

ID: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

n.	DBH (cm)	Specie	n.	DBH (cm)	Specie
1			51		
2			52		
3			53		
4			54		
5			55		
6			56		
7			57		
8			58		
9			59		
10			60		
11			61		
12			62		
13			63		
14			64		
15			65		
16			66		
17			67		
18			68		
19			69		
20			70		
21			71		
22			72		
23			73		
24			74		
25			75		
26			76		
27			77		
28			78		
29			79		
30			80		
31			81		
32			82		
33			83		
34			84		
35			85		
36			86		
37			87		
38			88		
39			89		
40			90		
41			91		
42			92		
43			93		
44			94		
45			95		
46			96		
47			97		
48			98		
49			99		
50			100		

## Allegati 2- Schede riassuntive frane rilevate in campo

<b>ID: FR_02</b>	E726822,2 N5148789,7										
											
<b>Area:</b> 174 m2	<b>Cond. Attuale:</b> inalterata	<b>Esp:</b> 32	<b>Str. Orizz.:</b> Lacunosa								
<b>Vol:</b> 65 m3	<b>Curvatura:</b> 6	<b>Pend:</b> 38°	<b>Str. Vert.:</b> monoplana								
<b>Prof. Media:</b> 0.7 m	<b>Tipologia:</b> traslativa	<b>Quota:</b> 1702 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b> Buona/abbondante								
		<b>Litolog:</b> vulcaniti	<b>Tessitura:</b> -								
			<b>Fase sviluppo:</b> perticaia								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">COMPOSIZIONE SPECIFICA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Larix decidua</i></td> <td style="text-align: right; padding: 5px;">95%</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Picea abies</i></td> <td style="text-align: right; padding: 5px;">4%</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><i>Sorbus aucuparia</i></td> <td style="text-align: right; padding: 5px;">1%</td> </tr> </tbody> </table>				COMPOSIZIONE SPECIFICA		<i>Larix decidua</i>	95%	<i>Picea abies</i>	4%	<i>Sorbus aucuparia</i>	1%
COMPOSIZIONE SPECIFICA											
<i>Larix decidua</i>	95%										
<i>Picea abies</i>	4%										
<i>Sorbus aucuparia</i>	1%										
											
<b>Piante/ha:</b> 592		<b>Lungh. Gap (m):</b> 11.02									
<b>G/ha (m2):</b> 14.65		<b>Largh. Gap (m):</b> 4.42									
<b>Cat dimensionale:</b> PP		<b>Area Gap (m2):</b> 62.67									
<b>GINI DBH:</b> 0.17		<b>Copertura %:</b> 89.88									
<b>Dm (cm):</b> 17.75											
Disturbi: Schianti da neve											



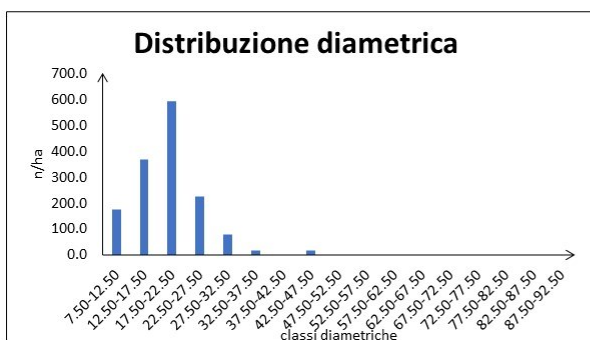
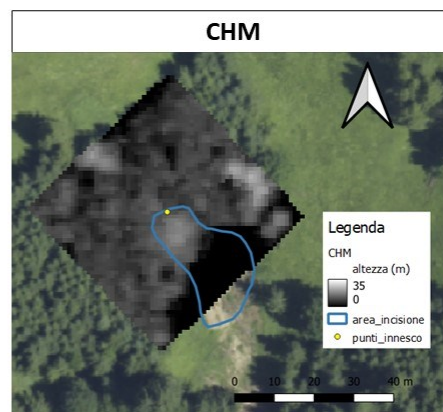
ID: FR\_03

E732252,3 N5148185,3



<b>Area:</b>	420 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione Erbacea, segni erosione	<b>Esp:</b>	135	<b>Str. Orizz.:</b>	Regolare
<b>Vol:</b>	536 m3	<b>Curvatura:</b>	7	<b>Pend:</b>	34°	<b>Str. Vert.:</b>	monoplana
<b>Prof. Media:</b>	1.22 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1263 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Assente/scarsa
				<b>Litolog:</b>	ghiaie	<b>Tessitura:</b>	-
						<b>Fase sviluppo:</b>	spessina

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Picea abies</i>	95%
<i>Larix decidua</i>	5%



<b>Piante/ha:</b>	1472	<b>Lungh. Gap (m):</b>	11.53
<b>G/ha (m2):</b>	46.2	<b>Largh. Gap (m):</b>	19.18
<b>Cat dimensionale:</b>	PP	<b>Area Gap (m2):</b>	298.05
<b>GINI DBH:</b>	0.17	<b>Copertura %:</b>	78.48
<b>Dm (cm):</b>	19.99		

Disturbi: Schianti neve, bostrico

ID: FR\_04

E732404,0N5148471,8

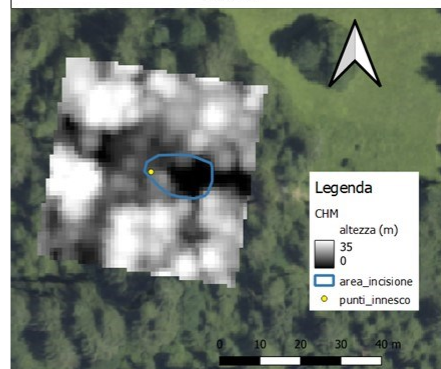


<b>Area:</b>	140 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea/segni erosione	<b>Esp:</b>	91	<b>Str. Orizz.:</b>	Lacunosa
<b>Vol:</b>	85 m3	<b>Curvatura:</b>	8	<b>Pend:</b>	25°	<b>Str. Vert.:</b>	multiplana
<b>Prof. Media:</b>	1.9 m	<b>Tipologia:</b>	rotazionale	<b>Quota:</b>	1244 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Buona/abbondante
				<b>Litolog:</b>	vulcaniti	<b>Tessitura:</b>	fine
						<b>Fase sviluppo:</b>	-

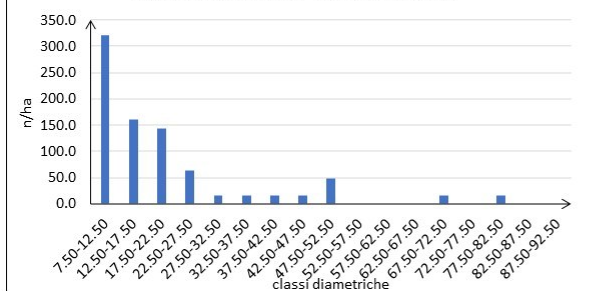
## COMPOSIZIONE SPECIFICA

<i>Picea abies</i>	90%
<i>Fagus sylvatica</i>	5%
<i>Corilus avellana</i>	5%
<i>Larix decidua</i>	-
<i>Fraxinus excelsior</i>	-
<i>Sorbus aucuparia</i>	-
<i>Acer pseudoplatanus</i>	-

## CHM



## Distribuzione diametrica



<b>Piante/ha:</b>	832	<b>Lungh. Gap (m):</b>	19.03
<b>G/ha (m2):</b>	43.99	<b>Largh. Gap (m):</b>	7.11
<b>Cat dimensionale:</b>	PG	<b>Area Gap (m2):</b>	87.83
<b>GINI DBH:</b>	0.37	<b>Copertura %:</b>	93.92
<b>Dm (cm):</b>	25.95		

Disturbi: bostrico



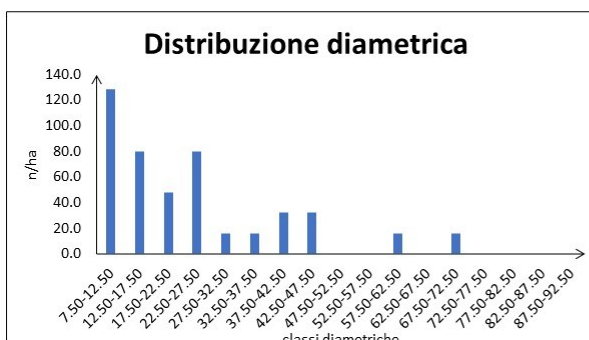
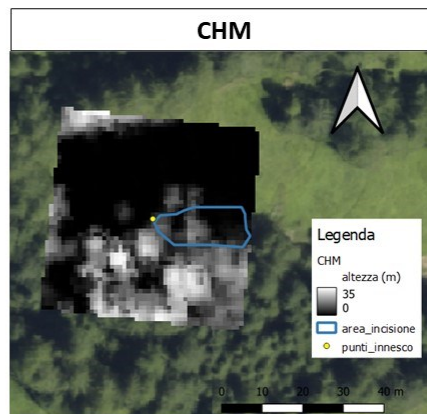
ID: FR\_05

E732469,2 N5150250,0



<b>Area:</b>	187 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea/ segni erosione	<b>Esp:</b>	113	<b>Str. Orizz.:</b>	A gruppi
<b>Vol:</b>	122 m3	<b>Curvatura:</b>	8	<b>Pend:</b>	39°	<b>Str. Vert.:</b>	multiplana
<b>Prof. Media:</b>	1.47 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1521 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Assente/scarsa
				<b>Litolog:</b>	ghiaie	<b>Tessitura:</b>	grossolana
						<b>Fase sviluppo:</b>	-

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Larix decidua</i>	80%
<i>Picea abies</i>	20%



<b>Piante/ha:</b>	464	<b>Lungh. Gap (m):</b>	20.02
<b>G/ha (m2):</b>	28.25	<b>Largh. Gap (m):</b>	23.25
<b>Cat dimensionale:</b>	PM	<b>Area Gap (m2):</b>	1087.04
<b>GINI DBH:</b>	0.36	<b>Copertura %:</b>	46.96
<b>Dm (cm):</b>	27.84		

Disturbi: Schianti da vento



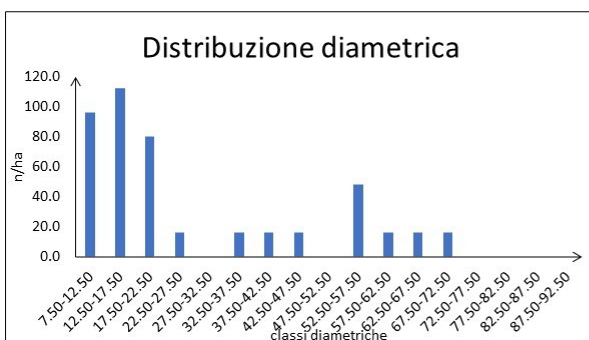
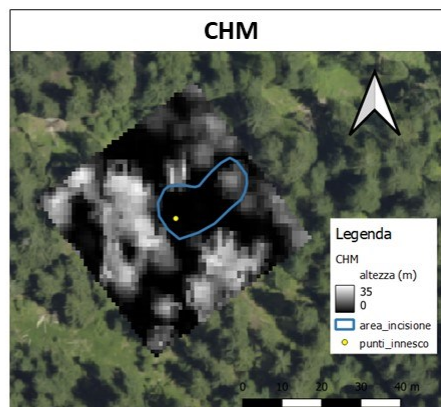
ID: FR\_06

E731046,3 N5149076,4



<b>Area:</b>	259 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	inalterata	<b>Esp:</b>	55	<b>Str. Orizz.:</b>	Lacunosa
<b>Vol:</b>	93 m3	<b>Curvatura:</b>	5	<b>Pend:</b>	34°	<b>Str. Vert.:</b>	multiplana
<b>Prof. Media:</b>	1.23 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1653 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Buona/ abbondante
				<b>Litolog:</b>	vulcaniti	<b>Tessitura:</b>	grossolana
						<b>Fase sviluppo:</b>	-

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Picea abies</i>	100%

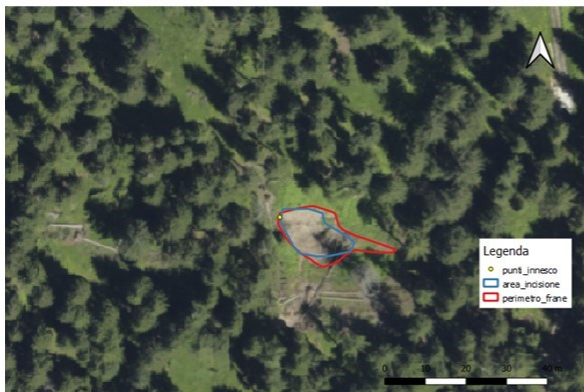


<b>Piante/ha:</b>	448	<b>Lungh. Gap (m):</b>	21.56
<b>G/ha (m2):</b>	40.62	<b>Largh. Gap (m):</b>	18.99
<b>Cat dimensionale:</b>	PG	<b>Area Gap (m2):</b>	450.09
<b>GINI DBH:</b>	0.38	<b>Copertura %:</b>	60.28
<b>Dm (cm):</b>	33.98		

Disturbi: bostrico

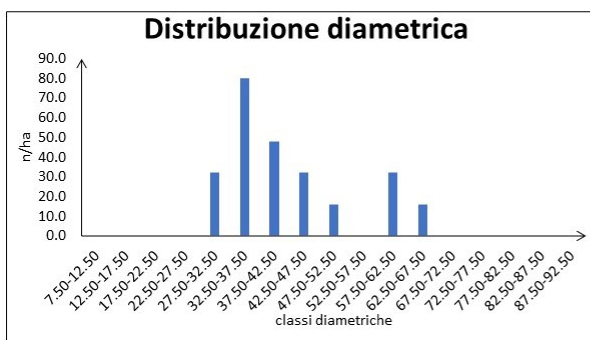
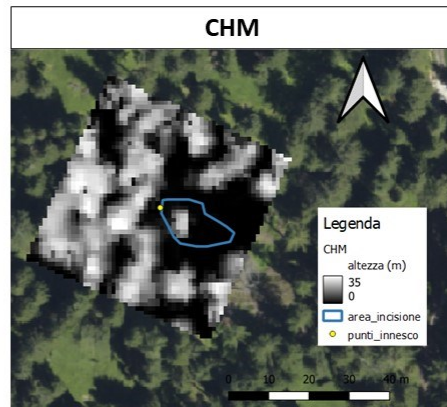
ID: FR\_19

E731936,9 N5149798,6



<b>Area:</b>	140 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	116	<b>Str. Orizz.:</b>	Lacunosa
<b>Vol:</b>	112 m3	<b>Curvatura:</b>	8	<b>Pend:</b>	27°	<b>Str. Vert.:</b>	monoplana
<b>Prof. Media:</b>	1.13 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1774 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Assente/scarsa
				<b>Litolog:</b>	calcari	<b>Tessitura:</b>	-
						<b>Fase sviluppo:</b>	matturo

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Picea abies</i>	95%
<i>Larix decidua</i>	5%



<b>Piante/ha:</b>	256	<b>Lungh. Gap (m):</b>	20.74
<b>G/ha (m2):</b>	38.38	<b>Largh. Gap (m):</b>	17.21
<b>Cat dimensionale:</b>	PM	<b>Area Gap (m2):</b>	588.70
<b>GINI DBH:</b>	0.15	<b>Copertura %:</b>	67
<b>Dm (cm):</b>	43.69		

Disturbi: Schianti da vento, bostrico



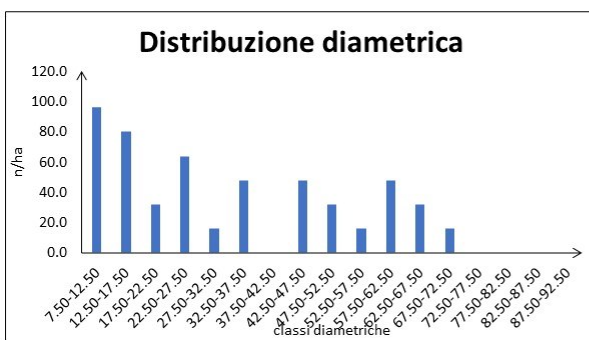
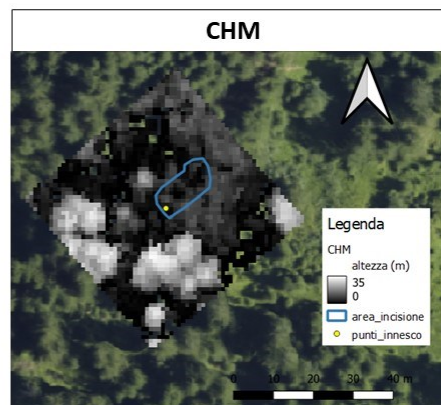
ID: FR\_07

E722130,0N5153218,1



<b>Area:</b>	112 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	23	<b>Str. Orizz.:</b>	Lacunosa
<b>Vol:</b>	51 m3	<b>Curvatura:</b>	8	<b>Pend:</b>	35°	<b>Str. Vert.:</b>	multiplana
<b>Prof. Media:</b>	0.53 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1554 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Buona/abbondante
				<b>Litolog:</b>	vulcaniti	<b>Tessitura:</b>	fine
						<b>Fase sviluppo:</b>	-

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Picea abies</i>	98%
<i>Larix decidua</i>	2%

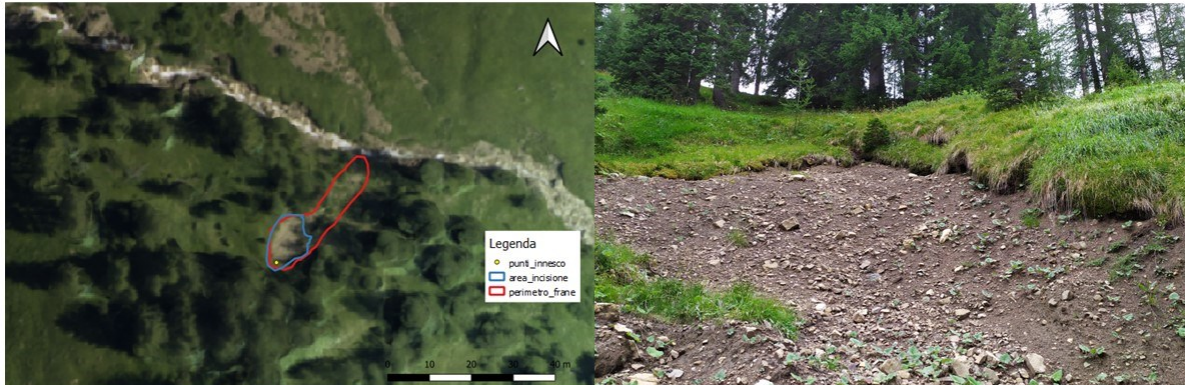


<b>Piante/ha:</b>	528	<b>Lungh. Gap (m):</b>	5.74
<b>G/ha (m2):</b>	58.63	<b>Largh. Gap (m):</b>	8.30
<b>Cat dimensionale:</b>	PG	<b>Area Gap (m2):</b>	360.25
<b>GINI DBH:</b>	0.36	<b>Copertura %:</b>	57.72
<b>Dm (cm):</b>	37.60		

Disturbi: Schianti da vento e neve

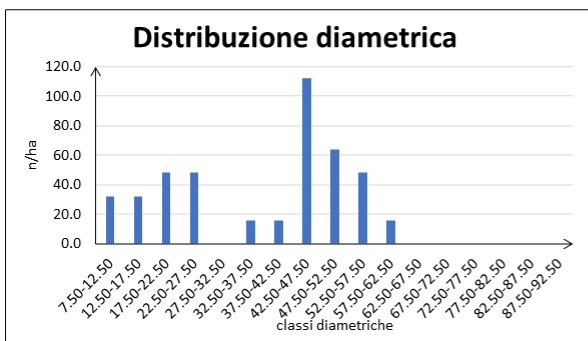
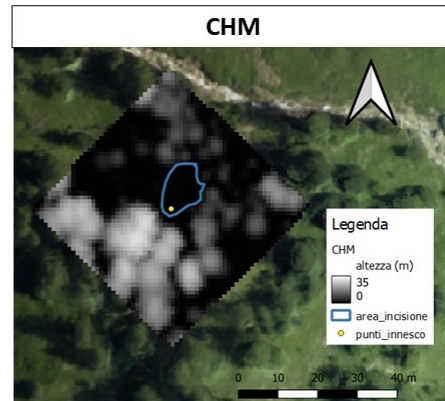
ID: FR\_08

E718103,9 N5152615,1



<b>Area:</b>	225 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	43	<b>Str. Orizz.:</b>	A gruppi
<b>Vol:</b>	16 m3	<b>Curvatura:</b>	9	<b>Pend:</b>	36°	<b>Str. Vert.:</b>	multiplana
<b>Prof. Media:</b>	1.2 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1949 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Buona/abbondante
				<b>Litolog:</b>	arenarie	<b>Tessitura:</b>	fine
						<b>Fase sviluppo:</b>	-

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Larix decidua</i>	70%
<i>Picea abies</i>	30%



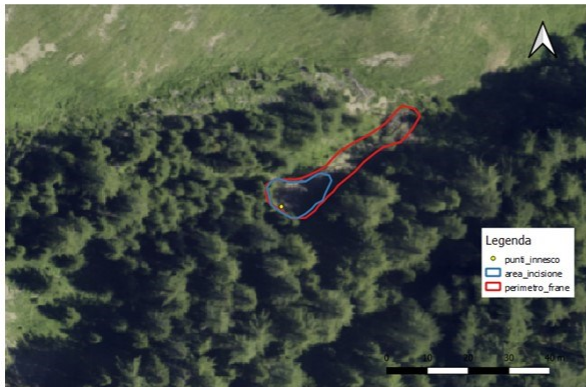
<b>Piante/ha:</b>	432	<b>Lungh. Gap (m):</b>	22.38
<b>G/ha (m2):</b>	53.55	<b>Largh. Gap (m):</b>	22.44
<b>Cat dimensionale:</b>	PG	<b>Area Gap (m2):</b>	748.73
<b>GINI DBH:</b>	0.25	<b>Copertura %:</b>	52.12
<b>Dm (cm):</b>	39.73		

Disturbi:



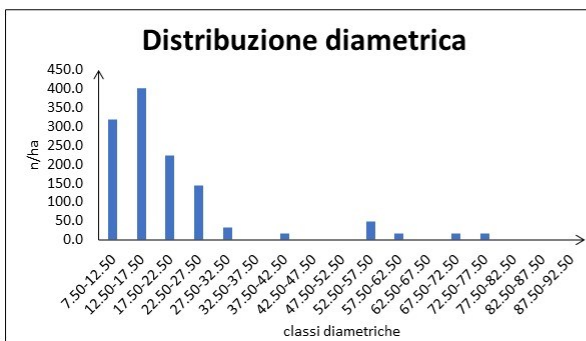
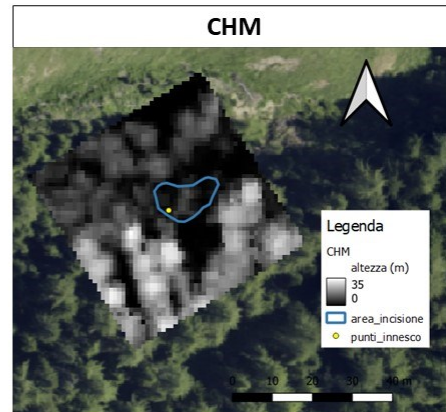
ID: FR\_09

E719861,0N5153642,3



<b>Area:</b>	110 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	51	<b>Str. Orizz.:</b>	Lacunosa
<b>Vol:</b>	35 m3	<b>Curvatura:</b>	8	<b>Pend:</b>	37°	<b>Str. Vert.:</b>	multiplana
<b>Prof. Media:</b>	1.27 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1773 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Assente/scarsa
				<b>Litolog:</b>	vulcaniti	<b>Tessitura:</b>	grossolana
						<b>Fase sviluppo:</b>	-

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Larix decidua</i>	60%
<i>Picea abies</i>	40%

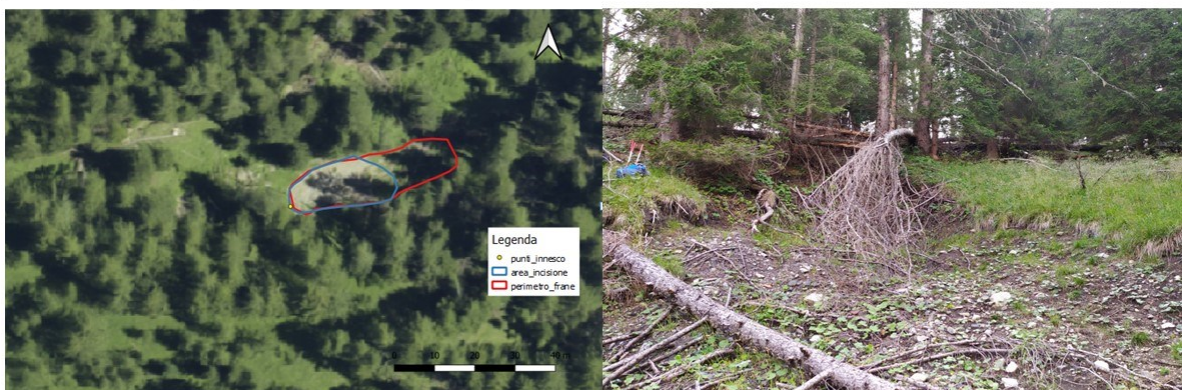


<b>Piante/ha:</b>	1232	<b>Lungh. Gap (m):</b>	10.35
<b>G/ha (m2):</b>	57.11	<b>Largh. Gap (m):</b>	8.7
<b>Cat dimensionale:</b>	PG	<b>Area Gap (m2):</b>	369.69
<b>GINI DBH:</b>	0.30	<b>Copertura %:</b>	67.28
<b>Dm (cm):</b>	24.29		

Disturbi: Schianti da vento

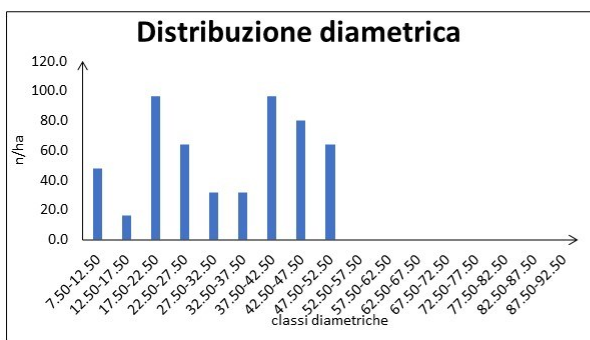
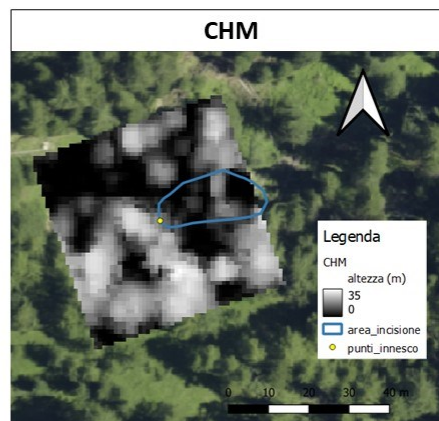
ID: FR\_10

E723316,5 N5151521,0



<b>Area:</b>	259 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	45	<b>Str. Orizz.:</b>	A gruppi
<b>Vol:</b>	98 m3	<b>Curvatura:</b>	8	<b>Pend:</b>	32°	<b>Str. Vert.:</b>	multiplana
<b>Prof. Media:</b>	1.17 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1794 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Assente/scarsa
				<b>Litolog:</b>	vulcaniti	<b>Tessitura:</b>	grossolana
						<b>Fase sviluppo:</b>	-

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Larix decidua</i>	60%
<i>Picea abies</i>	40%



<b>Piante/ha:</b>	528	<b>Lungh. Gap (m):</b>	14.02
<b>G/ha (m2):</b>	49.52	<b>Largh. Gap (m):</b>	10.31
<b>Cat dimensionale:</b>	PM	<b>Area Gap (m2):</b>	324.22
<b>GINI DBH:</b>	0.24	<b>Copertura %:</b>	70.6
<b>Dm (cm):</b>	34.56		

Disturbi: Schianti da vento, bostrico



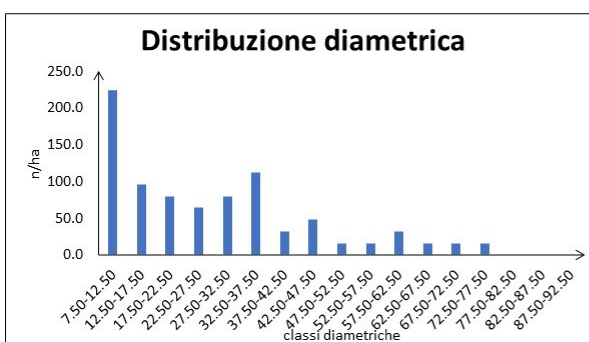
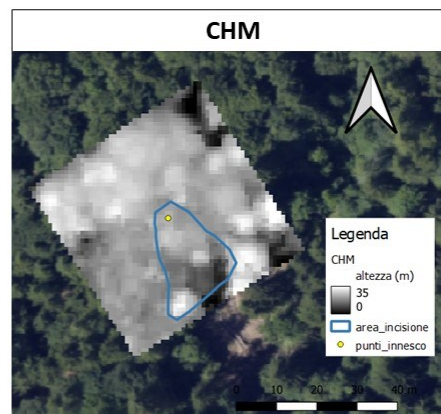
ID: FR\_11

E725798,5 N5139120,1



<b>Area:</b>	347 m <sup>2</sup>	<b>Cond. Attuale:</b>	Sistemata/segni di erosione	<b>Esp:</b>	167	<b>Str. Orizz.:</b>	Regolare
<b>Vol:</b>	396 m <sup>3</sup>	<b>Curvatura:</b>	6	<b>Pend:</b>	38°	<b>Str. Vert.:</b>	multiplana
<b>Prof. Media:</b>	1.4 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1069 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Buona/abbondante
				<b>Litolog:</b>	calcari	<b>Tessitura:</b>	fine
						<b>Fase sviluppo:</b>	-

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Picea abies</i>	60%
<i>Fagus sylvatica</i>	39%
<i>Larix decidua</i>	1%



<b>Piante/ha:</b>	848	<b>Lungh. Gap (m):</b>	4.67
<b>G/ha (m<sup>2</sup>):</b>	72.12	<b>Largh. Gap (m):</b>	4.20
<b>Cat dimensionale:</b>	PG	<b>Area Gap (m<sup>2</sup>):</b>	16.10
<b>GINI DBH:</b>	0.35	<b>Copertura %:</b>	97.8
<b>Dm (cm):</b>	32.91		

Disturbi: Schianti da vento

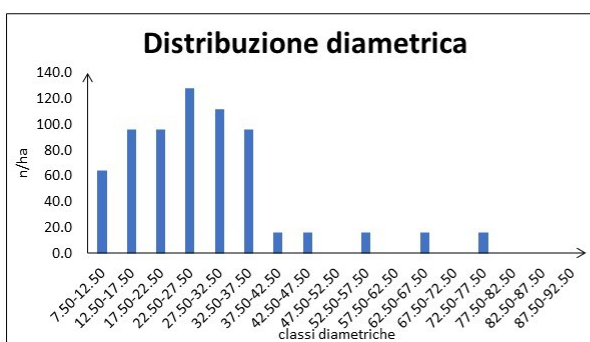
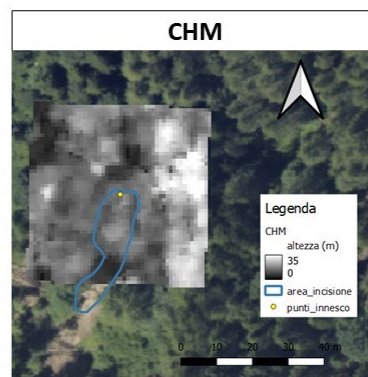
ID: FR\_12

E725949,4 N5138936,9



<b>Area:</b>	279 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	193	<b>Str. Orizz.:</b>	Regolare
<b>Vol:</b>	274 m3	<b>Curvatura:</b>	2	<b>Pend:</b>	28°	<b>Str. Vert.:</b>	multiplana
<b>Prof. Media:</b>	1.43 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	990m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Assente/scarsa
				<b>Litolog:</b>	calcari	<b>Tessitura:</b>	grossolana
						<b>Fase sviluppo:</b>	-

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Picea abies</i>	60%
<i>Fagus sylvatica</i>	20%
<i>Larix decidua</i>	15%
<i>Acer Pseudoplatanus</i>	5%
<i>Corilus avellana</i>	-



<b>Piante/ha:</b>	672	<b>Lungh. Gap (m):</b>	0
<b>G/ha (m2):</b>	48.93	<b>Largh. Gap (m):</b>	0
<b>Cat dimensionale:</b>	PM	<b>Area Gap (m2):</b>	0
<b>GINI DBH:</b>	0.28	<b>Copertura %:</b>	99.24
<b>Dm (cm):</b>	30.45		

Disturbi: Schianti da vento



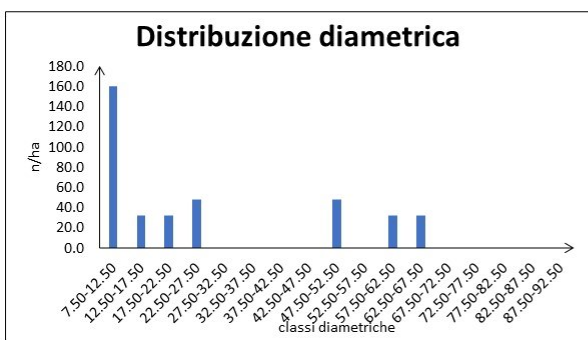
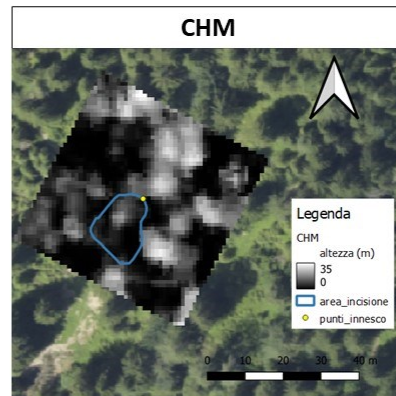
ID: FR\_13

E722674,0N5140438,2



<b>Area:</b>	181 m <sup>2</sup>	<b>Cond. Attuale:</b>	Sistemata, segni di erosione	<b>Esp:</b>	217	<b>Str. Orizz.:</b>	Lacunosa
<b>Vol:</b>	318 m <sup>3</sup>	<b>Curvatura:</b>	5	<b>Pend:</b>	23°	<b>Str. Vert.:</b>	multiplana
<b>Prof. Media:</b>	1.87 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1321 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Buona/abbondante
				<b>Litolog:</b>	depositi misti	<b>Tessitura:</b>	grossolana
						<b>Fase sviluppo:</b>	

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Picea abies</i>	90%
<i>Fagus sylvatica</i>	5%
<i>Larix decidua</i>	5%



<b>Piante/ha:</b>	384	<b>Lungh. Gap (m):</b>	17.36
<b>G/ha (m<sup>2</sup>):</b>	33.68	<b>Largh. Gap (m):</b>	7.45
<b>Cat dimensionale:</b>	PG	<b>Area Gap (m<sup>2</sup>):</b>	206.95
<b>GINI DBH:</b>	0.42	<b>Copertura %:</b>	60.32
<b>Dm (cm):</b>	33.42		

Disturbi: Schianti da vento

ID: FR\_14

E726887,3 N5138773,2

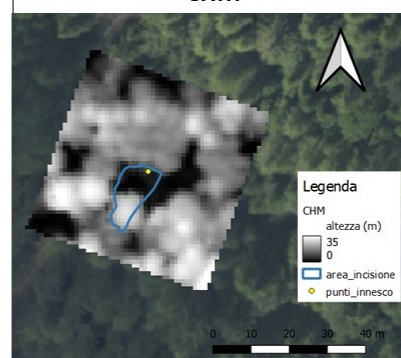


<b>Area:</b>	122 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	174	<b>Str. Orizz.:</b>	Regolare
<b>Vol:</b>	123 m3	<b>Curvatura:</b>	8	<b>Pend:</b>	15°	<b>Str. Vert.:</b>	monoplana
<b>Prof. Media:</b>	1.8 m	<b>Tipologia:</b>	rotazionale	<b>Quota:</b>	935 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Assente/scarsa
				<b>Litolog:</b>	calcari	<b>Tessitura:</b>	-
						<b>Fase sviluppo:</b>	adulto

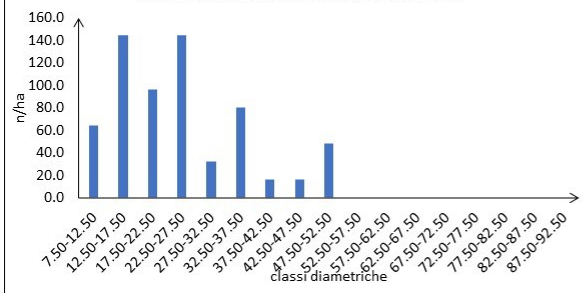
## COMPOSIZIONE SPECIFICA

<i>Picea abies</i>	50%
<i>Acer pseudoplatanus</i>	20%
<i>Fraxinus excelsior</i>	20%
<i>Fagus sylvatica</i>	10%
<i>Corilus avellana</i>	-
<i>Ulmus glabra</i>	-
<i>Populus tremula</i>	-

## CHM



## Distribuzione diametrica



<b>Piante/ha:</b>	640	<b>Lungh. Gap (m):</b>	5.82
<b>G/ha (m2):</b>	35.91	<b>Largh. Gap (m):</b>	15.57
<b>Cat dimensionale:</b>	PM	<b>Area Gap (m2):</b>	115.70
<b>GINI DBH:</b>	0.27	<b>Copertura %:</b>	87.4
<b>Dm (cm):</b>	26.73		

Disturbi: Schianti da vento



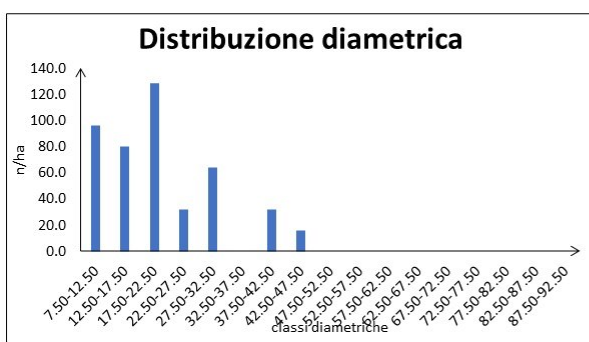
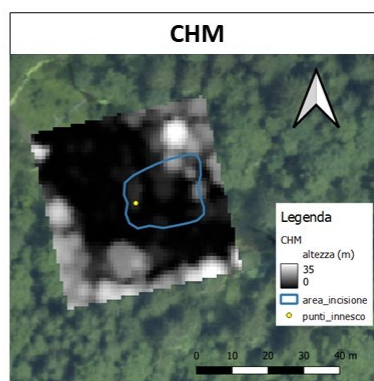
ID: FR\_15

E723345,9 N5136731,1



<b>Area:</b>	360 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	81	<b>Str. Orizz.:</b>	Lacunosa
<b>Vol:</b>	267 m3	<b>Curvatura:</b>	9	<b>Pend:</b>	45°	<b>Str. Vert.:</b>	monoplana
<b>Prof. Media:</b>	1.9 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1094 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Buona/ abbondante
				<b>Litolog:</b>	ghiaie	<b>Tessitura:</b>	-
						<b>Fase sviluppo:</b>	adulto

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Corilus avellana</i>	70%
<i>Picea abies</i>	25%
<i>Sorbus aucuparia</i>	5%
<i>Fagus sylvatica</i>	-
<i>Fraxinus excelsior</i>	-

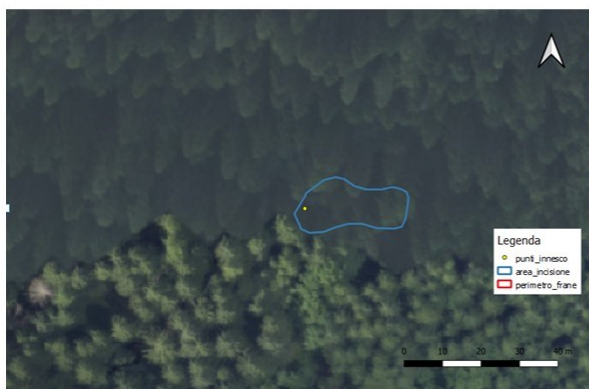


<b>Piante/ha:</b>	448	<b>Lungh. Gap (m):</b>	31.56
<b>G/ha (m2):</b>	18.33	<b>Largh. Gap (m):</b>	13.42
<b>Cat dimensionale:</b>	PM	<b>Area Gap (m2):</b>	1256.05
<b>GINI DBH:</b>	0.28	<b>Copertura %:</b>	46.24
<b>Dm (cm):</b>	22.82		

Disturbi:

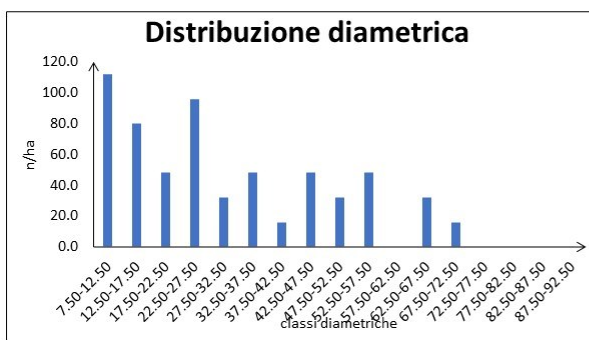
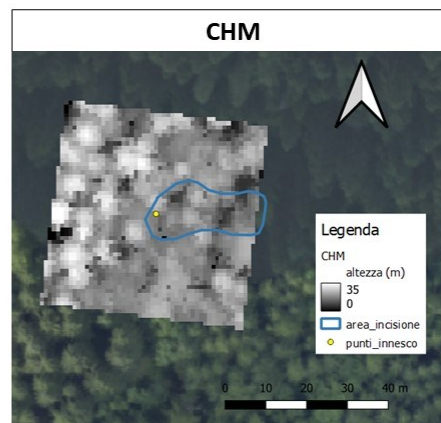
ID: FR\_16

E723284,4 N5136917,2



<b>Area:</b>	303 m <sup>2</sup>	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	91	<b>Str. Orizz.:</b>	Regolare
<b>Vol:</b>	373 m <sup>3</sup>	<b>Curvatura:</b>	8	<b>Pend:</b>	34°	<b>Str. Vert.:</b>	monoplana
<b>Prof. Media:</b>	1.43 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1184 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Buona/abbondante
				<b>Litolog:</b>	ghiaie	<b>Tessitura:</b>	-
						<b>Fase sviluppo:</b>	perticaia

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Picea abies</i>	85%
<i>Fraxinus excelsior</i>	5%
<i>Larix decidua</i>	5%
<i>Fagus sylvatica</i>	5%
<i>Acer pseudoplatanus</i>	-
<i>Corilus avellana</i>	-
<i>Abies alba</i>	-



<b>Piante/ha:</b>	608	<b>Lungh. Gap (m):</b>	0
<b>G/ha (m<sup>2</sup>):</b>	58.37	<b>Largh. Gap (m):</b>	0
<b>Cat dimensionale:</b>	PG	<b>Area Gap (m<sup>2</sup>):</b>	0
<b>GINI DBH:</b>	0.34	<b>Copertura %:</b>	99.16
<b>Dm (cm):</b>	34.96		

Disturbi: Schianti da vento, bostrico



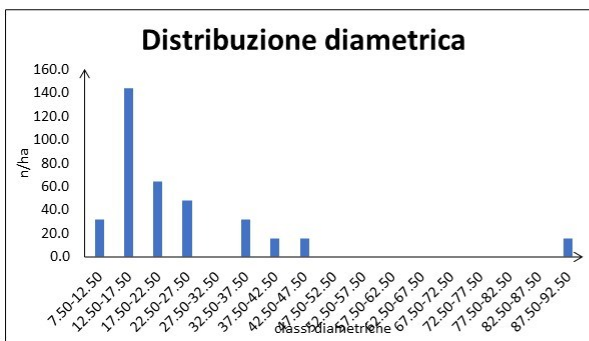
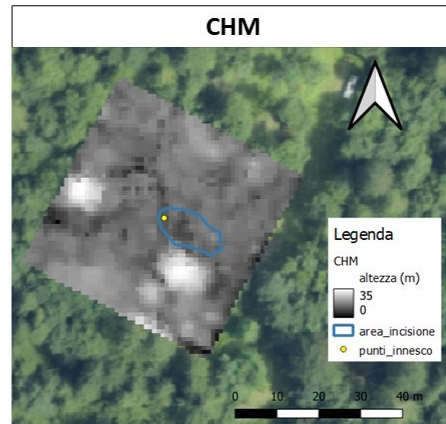
ID: FR\_17

E723075,6 N5136014,9



<b>Area:</b>	104 m <sup>2</sup>	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	131	<b>Str. Orizz.:</b>	Lacunosa
<b>Vol:</b>	93 m <sup>3</sup>	<b>Curvatura:</b>	8	<b>Pend:</b>	40°	<b>Str. Vert.:</b>	monoplana
<b>Prof. Media:</b>	1.5 m	<b>Tipologia:</b>	rotazionale	<b>Quota:</b>	1173 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Assente/scarsa
				<b>Litolog:</b>	depositi alluvionali misti	<b>Tessitura:</b>	-
						<b>Fase sviluppo:</b>	perticaia

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Acer pseudoplatanus</i>	40%
<i>Fraxinus excelsior</i>	40%
<i>Picea abies</i>	10%
<i>Larix decidua</i>	10%



<b>Piante/ha:</b>	368	<b>Lungh. Gap (m):</b>	0
<b>G/ha (m<sup>2</sup>):</b>	24.95	<b>Largh. Gap (m):</b>	0
<b>Cat dimensionale:</b>	PG	<b>Area Gap (m<sup>2</sup>):</b>	0
<b>GINI DBH:</b>	0.32	<b>Copertura %:</b>	99.80
<b>Dm (cm):</b>	29.38		

Disturbi:

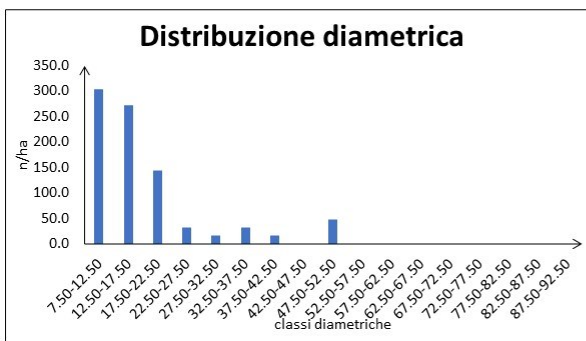
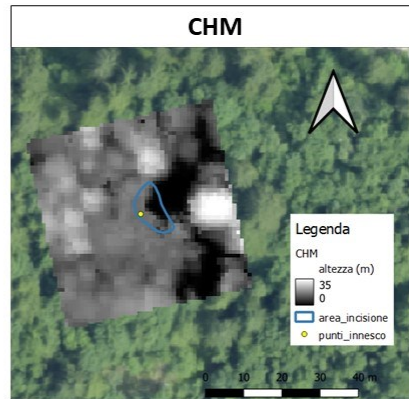
ID: FR\_18

E723345,2 N5136730,6



<b>Area:</b>	77 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	91	<b>Str. Orizz.:</b>	Regolare
<b>Vol:</b>	48 m3	<b>Curvatura:</b>	9	<b>Pend:</b>	39°	<b>Str. Vert.:</b>	multiplana
<b>Prof. Media:</b>	1.03 m	<b>Tipologia:</b>	traslativa	<b>Quota:</b>	1180 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Buona/ abbondante
				<b>Litolog:</b>	ghiaie	<b>Tessitura:</b>	fine
						<b>Fase sviluppo:</b>	-

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Acer pseudoplatanus</i>	40%
<i>Picea abies</i>	30%
<i>Fraxinus excelsior</i>	20%
<i>Larix decidua</i>	10%



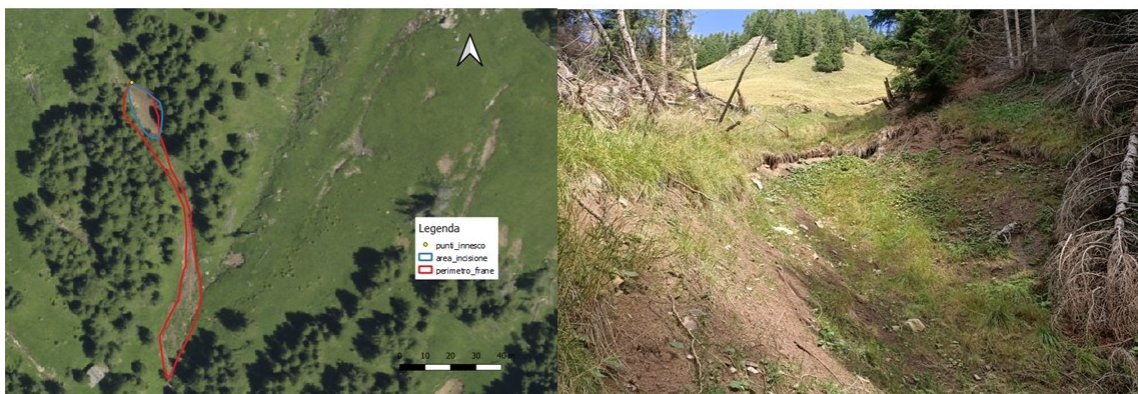
<b>Piante/ha:</b>	864	<b>Lungh. Gap (m):</b>	18.09
<b>G/ha (m2):</b>	28.78	<b>Largh. Gap (m):</b>	5.73
<b>Cat dimensionale:</b>	PP	<b>Area Gap (m2):</b>	122.98
<b>GINI DBH:</b>	0.30	<b>Copertura %:</b>	88.24
<b>Dm (cm):</b>	20.59		

Disturbi:



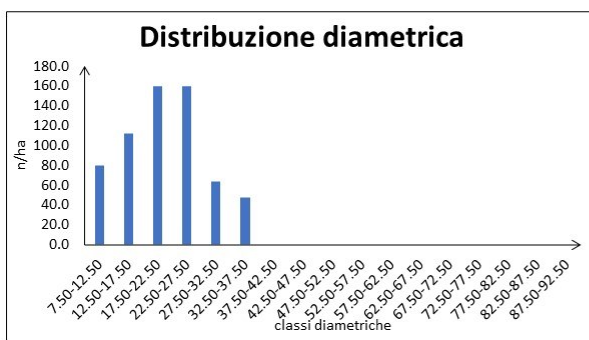
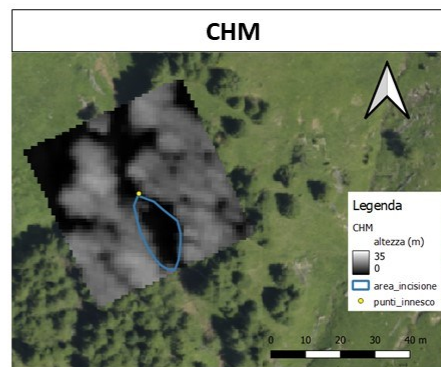
ID: FR\_20

E730469,1 N5151001,1



<b>Area:</b>	177 m2	<b>Cond. Attuale:</b>	Rinnovazione erbacea	<b>Esp:</b>	193	<b>Str. Orizz.:</b>	Regolare
<b>Vol:</b>	223 m3	<b>Curvatura:</b>	8	<b>Pend:</b>	29°	<b>Str. Vert.:</b>	monoplana
<b>Prof. Media:</b>	1.67 m	<b>Tipologia:</b>	rotazionale	<b>Quota:</b>	1934 m s.l.m.	<b>Rinnovaz:</b>	Assente/scarsa
				<b>Litolog:</b>	calcari	<b>Tessitura:</b>	-
						<b>Fase sviluppo:</b>	perticaia

COMPOSIZIONE SPECIFICA	
<i>Picea abies</i>	60%
<i>Larix decidua</i>	40%



<b>Piante/ha:</b>	624	<b>Lungh. Gap (m):</b>	43.66
<b>G/ha (m2):</b>	24.27	<b>Largh. Gap (m):</b>	6.71
<b>Cat dimensionale:</b>	PP	<b>Area Gap (m2):</b>	271.98
<b>GINI DBH:</b>	0.20	<b>Copertura %:</b>	75.2
<b>Dm (cm):</b>	22.25		

Disturbi: Schianti da vento e neve, bostrico