

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO TERRITORIO E SISTEMI
AGRO-FORESTALI**

Corso di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

**I TAGLI DIREZIONATI COME OPERE DI MITIGAZIONE
DEL RISCHIO DI CADUTA MASSI:
due casi studio in boschi danneggiati da bostrico in Trentino**

Relatore
Prof. Emanuele Lingua

Correlatori
Dott. Andrea Sgarbossa
Dott. Paul Richter

Laureanda
Sara Fait
Matricola n. 1191689

**ANNO ACCADEMICO
2024/2025**

There is pleasure in the pathless woods, there is rapture in the lonely shore, there is
society where none intrudes, by the deep sea, and music in its roar;
I love not Man the less, but NATURE more.

Lord Byron

INDICE

ABSTRACT	9
RIASSUNTO	10
INTRODUZIONE	11
1. I DISTURBI ABIOTICI E BIOTICI DELLE FORESTE	14
1.1. I disturbi nell’ecosistema foresta nella realtà europea	14
1.2. Un evento estremo per la piccola realtà italiana: la tempesta Vaia.....	16
1.3. Gli effetti della tempesta Vaia in Trentino	18
1.4. Le conseguenze della tempesta Vaia: l’epidemia di Ips typographus in Trentino	21
2. I SERVIZI ECOSISTEMICI OFFERTI DALLE FORESTE	26
2.1. I concetti di “ecosistema” e “servizi ecosistemici”	26
2.2. I servizi ecosistemici forestali.....	28
2.2.1. Servizi di approvvigionamento	29
2.2.2. Servizi di regolazione e mantenimento	29
2.2.3. Servizi culturali	31
3. LA FUNZIONE PROTETTIVA DEI VERSANTI	32
3.1. Il valore economico della funzione protettiva dei versanti	32
3.2. La quantificazione del ruolo protettivo delle foreste.....	33
3.3. Una misura di mitigazione degli effetti negativi di Vaia e l’epidemia di bostrico in Provincia Autonoma di Trento	35
4. OBIETTIVO DELLA TESI	37
5. MATERIALI E METODI	38
5.1. Caratterizzazione delle aree studiate	38
5.1.1. Il Cantiere di Montesover	39
5.1.2. Il cantiere di Malga Caore	41
5.2. I software utilizzati.....	44
5.2.1. I dati richiesti dal software Rockyfor3D.....	44
5.3. Campionamento dei dati in campo	48
5.4. Elaborazione dei raster di output di Rockyfor3D	50
6. RISULTATI E DISCUSSIONE	54
6.1. Dati utilizzati per Montesover e risultati.....	54
6.2. Dati utilizzati per Malga Caore e risultati.....	67
6.3. Discussione	75
7. CONCLUSIONI	81
Bibliografia	83

RINGRAZIAMENTI

Vorrei innanzitutto ringraziare il Servizio Foreste della Provincia Autonoma di Trento e il Corpo Forestale Trentino per aver contribuito attivamente allo studio di un argomento tanto interessante quanto attuale quali sono i tagli direzionati e il loro effetto sui servizi ecosistemici offerti delle foreste. Un ringraziamento anche alla Magnifica Comunità di Fiemme per aver messo a disposizione di questa tesi le proprietà forestali in suo possesso e aver condiviso con me i dati relativi al proprio cantiere forestale.

Un sentito ringraziamento anche al mio correlatore Andrea dott, Sgarbossa, funzionario dell'Ufficio Pianificazione del Servizio Foreste, per avermi avvicinato a questo argomento e per i preziosi consigli offerti durante il periodo di redazione di questo scritto.

Un grazie particolare anche a tutti gli amici e conoscenti che mi hanno donato parte del loro tempo contribuendo alla stesura della tesi, ognuno con le proprie competenze: grazie Paul per avermi seguito durante le fasi operative della tesi; grazie Teo per le tue doti informatiche; grazie Samuele per le dritte sulla corretta strutturazione, redazione e impaginazione della tesi di laurea magistrale; grazie Giulia Tomasi, del Museo Civico di Rovereto, per le ineguagliabili competenze in ambito botanico.

Un sincero ringraziamento a Simone, perché con quella telefonata ricevuta al Comune di Vallarsa, oltre alla motivazione per concludere gli esami rimasti, ho trovato anche un Amico.

Grazie di cuore alla mia Amica Anna, per avermi accompagnata durante la raccolta dei dati in campo nei cantieri forestali, per aver vegliato su di me affinché su quei pendii, in mezzo a tutti quei tronchi a terra, piante pungenti e residui di utilizzazioni, rimediassi "solo" un piccolo sfregio in fronte.

Grazie Matteo, per il notevole aiuto nell'elaborazione dei dati, delle mappe e per la revisione finale di questo scritto. Soprattutto grazie per la tua presenza nella mia vita come un Larice in un pascolo: resistente e amorevole offri riparo dalle mie insicurezze lasciando fiorire le mie capacità più nascoste.

Grazie infinite, in conclusione, alla mia famiglia per il senso di unione, per il sostegno e l'amore donatomi sempre, grandi costanti nella mia vita e valori assai rari.

All'alba dei miei trent'anni, concludo il percorso universitario con l'assoluta convinzione di aver fatto la scelta giusta, sentendomi fortunata nel poter dire di essere riuscita a fare di una mia grande passione, il mio lavoro.

RIASSUNTO

Le tempeste di vento rappresentano uno dei maggiori disturbi a grande scala di natura abiotica in grado di influenzare la struttura delle foreste europee, i cui effetti possono essere ampliati da conseguenti disturbi di natura biotica quali le infestazioni di *Ips typographus*. Di conseguenza, la gestione forestale successiva ai danni causati gioca un ruolo fondamentale nel mantenimento delle funzioni ecosistemiche, soprattutto nelle foreste montane. È stato dimostrato che il rilascio di piante atterrate può mantenere, e in alcuni casi aumentare, la protezione contro la caduta massi, fornendo potenzialmente anche riparo alla rinnovazione naturale post-evento. Tuttavia, l'intento di conservare tali servizi ecosistemici potrebbe entrare in contrasto con la tradizionale gestione forestale incentrata prevalentemente sugli aspetti economici, per la quale l'esbosco totale delle piante danneggiate risulta l'unica opzione.

Lo scopo di questo progetto è comprendere la possibilità di conciliare il bisogno dei proprietari forestali di un ritorno economico dai danni causati dall'epidemia di bostrico con il mantenimento dei servizi ecosistemici in foreste classificate di protezione dalla caduta massi. I risultati mostrano che il rilascio a terra di una parte delle piante danneggiate, direzionate perpendicolarmente alla massima pendenza, può mantenere la funzione di protezione dalla caduta massi. Infine, si suggerisce, in fase progettuale, di diversificare gli interventi variando la quantità dei tagli direzionati in base alla lunghezza del versante e alla presenza di "zone cuscinetto" di foresta rimasta intatta tra il cantiere e le opere da proteggere.

ABSTRACT

BIOLOGICAL LEGACIES AS WORKS TO MITIGATE THE RISK OF ROCKFALL: two case studies in woods damaged by bark beetle in Trentino

Windstorms represent one of the major large-scale abiotic disturbances that can influence the structure of European forests, with their effects potentially amplified by subsequent biotic disturbances, such as infestations of *Ips typographus*. Consequently, forest management following the damage can play an active role in maintaining ecosystem functions, particularly in mountain forests. It has been shown that leaving biological legacies in place can maintain, and in some cases even increase, protection against rockfall, potentially providing shelter for natural regeneration after the event. However, the intent to conserve such ecosystem services may conflict with traditional forest management, which is primarily focused on economic aspects, where salvage logging is often seen as the only option.

The aim of this project is to explore the possibility of reconciling forest owners' need for economic returns from damage caused by bark beetle outbreaks with the maintenance of ecosystem services in forests that play an active role in rockfall protection. The results show that biological legacies can maintain the rockfall protection function. Finally, it is suggested that, during the planning phase, interventions should be diversified by varying the amount of biological legacies based on the slope length and the presence of "buffer zones" of intact forest between the worksite and the areas to be protected.

INTRODUZIONE

Nelle foreste, i disturbi di natura abiotica e biotica costituiscono veri e propri motori sia per la perpetuazione di questi ecosistemi, generando quelle condizioni indispensabili per l'avvio della rinnovazione naturale, sia per la biodiversità che caratterizza ogni tipo forestale (McCarthy, 2001). Nelle foreste non gestite dall'uomo, cosiddette vergini, quanto detto può risultare vero, ma non si può dire altrettanto in quelle sottoposte a pianificazione il cui ruolo è principalmente quello produttivo. È in questo caso che si comincia a parlare di “danno”, appunto, in termini economici: basti pensare che in Europa il 50% dei danni alle foreste, in termini di metri cubi di legname, è causato dalle tempeste di vento (Schelhaas, 2008a).

In particolare, nel 2018, le regioni del Nord-Est Italia sono state colpite da un evento meteorologico estremo che, per questa realtà, non ha eguali nella storia: la tempesta Vaia. Essa ha causato danni a livello nazionale per otto milioni e mezzo di metri cubi di legname schiantato, quattro milioni dei quali nei soli territori della Provincia Autonoma di Trento. Oltre agli ingenti danni di natura patrimoniale per i proprietari forestali, perlopiù pubblici, e le enormi sfide logistiche e di cantierizzazione per il recupero delle notevoli quantità di materiale disponibile, un secondo evento, conseguente al primo, ha ulteriormente amplificato l'emergenza: la pullulazione di *Ips typogrphus*. Se l'evento Vaia ha avuto effetti immediati, l'infestazione di bostrico ha determinato invece effetti via via sempre maggiori negli anni successivi alla tempesta, che sta peraltro durando ancora oggi. Si tratta della morte in piedi delle piante di abete rosso, con danni che, in termini di metri cubi di legname, hanno superato nel 2023 la metà di quelli causati da Vaia (P.A.T. – S.F. Piano Bostrico, 2024).

Come detto, nelle foreste gestite dall'uomo tali eventi causano gravi danni patrimoniali per i loro proprietari intaccandole e compromettendone il reddito che generavano quando erano intatte. Ma non solo: se l'ecosistema foresta espleta ben altre funzioni ecosistemiche, oltre a quella produttiva, questi eventi possono sortire danni forse ancora più gravi del mero mancato guadagno ottenuto dalla vendita di assortimenti legnosi. Si tratta, per esempio, della funzione di protezione che la foresta offre dall'erosione, dalla caduta massi o dai fenomeni valanghivi, a maggior ragione se questa cresce su di un versante montano a valle del quale vi sono insediamenti umani e infrastrutture. Alcuni autori hanno provato a quantificare tale funzione protettiva da questi fenomeni gravitativi, considerandola come “costo di sostituzione” (Dixon et al., 2013 e Shabman & Batie, 1978), ovvero il costo della messa in opera di manufatti artificiali di difesa, o come “danni evitati”

sommando il valore di ciò che potenzialmente è esposto a tale rischio (Fuchs & McAlpin, 2005).

Tuttavia, tale funzione di protezione non viene espletata in modo continuativo da una foresta naturale, proprio in virtù del fatto che essa attraversa diversi stadi evolutivi, i quali non presentano la stessa efficacia di protezione (Motta & Haudemand, 1999; Dorren, 2002 in Meloni et al., 2006). Nelle foreste gestite, ciò non può essere contemplato poiché gli insediamenti e le opere infrastrutturali hanno bisogno di una protezione continuativa. Questo è il motivo per il quale molti autori suggeriscono di integrare le modalità di gestione forestale tenendo in considerazione anche questo aspetto.

Con la tempesta Vaia e l'infestazione di bostrico, dunque, è emerso non solo il problema dei danni patrimoniali e logistici per il recupero del materiale legnoso danneggiato, ma anche quello della protezione dal rischio di fenomeni gravitativi che, nei territori per lo più montuosi del Trentino, è tutt'altro che marginale. Alcuni studi hanno considerato proprio questi aspetti: sia il mantenimento dell'effetto protettivo della foresta durante e dopo le ordinarie attività di utilizzazione, cercando degli accorgimenti che in qualche modo conciliassero la necessità di tagliare la foresta per ricavarne reddito e quella di mantenere un livello di protezione accettabile (Bourrier et al., 2012; Ringenbach et al., 2022), sia il mantenimento della funzione protettiva in seguito a eventi estremi come le tempeste di vento (Costa et al., 2021). Questi esperimenti hanno concordato sulla tesi che, sia successivamente a utilizzazioni forestali di carattere ordinario che a quelle dovute alla raccolta di materiale legnoso in regime emergenziale dovuto ad un evento estremo, il rilascio di piante a terra direzionate perpendicolarmente alla massima pendenza aumenta la scabrezza della superficie del versante fungendo da barriera contro la caduta massi, diminuendone l'energia cinetica. È stato dimostrato, in sintesi, che la funzione protettiva della foresta può essere così mantenuta e, nel breve periodo, potenzialmente aumentata se il rilascio delle piante atterrate successivamente ad una tempesta da vento è totale.

Tale approccio è stato scelto dall'amministrazione della Provincia Autonoma di Trento che, tramite fondi messi a disposizione dallo Stato italiano, con delibera di giunta provinciale nr. 1303 del 20 luglio 2023 ha previsto degli incentivi per la mitigazione degli effetti negativi causati dal bostrico. Lo scopo di questi aiuti è proprio quello di andare a colmare il mancato guadagno dei proprietari forestali derivato dal rilascio di piante a terra direzionate e l'eventuale contestuale rimboschimento, incentivandoli appunto a mettere in atto tali accorgimenti per limitare gli effetti negativi che il bostrico sta causando in foreste classificate "di protezione" contro i fenomeni gravitativi.

Lo studio di due cantieri forestali soggetti agli aiuti e alle conseguenti prescrizioni impartite dalla suddetta delibera mira, in questo lavoro di tesi, a verificarne gli effetti sulla capacità di protezione dalla caduta massi.

1. I DISTURBI ABIOTICI E BIOTICI DELLE FORESTE

1.1. I disturbi nell'ecosistema foresta nella realtà europea

I disturbi naturali di tipo abiotico, come per esempio incendi e tempeste di vento, e di tipo biotico, come le pullulazioni di insetti, fanno parte del naturale ciclo vitale delle foreste. Questi eventi contribuiscono a diversificare la copertura forestale creando delle discontinuità più o meno ampie a seconda del grado di disturbo. Le cosiddette foreste vergini, ovvero quelle foreste che non hanno mai conosciuto una gestione umana, sono caratterizzate per l'appunto da una marcata diversità di copertura arborea. Secondo McCarthy (2001), infatti, i veri promotori del ciclo delle foreste e della biodiversità che ospitano sono i disturbi. Basti pensare a tutte quelle specie pioniere ed eliofile che, senza un'apertura di dimensioni adeguate, non avrebbero modo di rinnovarsi sotto copertura, aumentando così la diversità della foresta sia a livello di specie che a livello strutturale. Alcuni esempi a sostegno di quanto detto sono la caduta di un grosso albero vetusto che grazie al maggior apporto di luce al suolo avvia la rinnovazione rimasta sotto copertura; un incendio che innesca la rinnovazione di un popolamento i cui semi hanno bisogno del fuoco per poter germinare o la moria di gruppi di alberi causata dalla pullulazione di un parassita che, contestualmente all'aumento di luce che arriva al terreno, crea "isole" di legno morto (in piedi e successivamente a terra) favorendo rinnovazione e biodiversità. Approfondendo ulteriormente, diminuendo la scala fino al livello del terreno, l'ingente quantitativo di materiale organico al suolo favorisce non soltanto la fitocenosi, ma tutta la biodiversità presente in quel luogo.

Possiamo così concludere che, se nelle foreste naturali i disturbi a scala locale costituiscono un motore per la perpetuazione dell'ecosistema, in quelle gestite dall'uomo possono considerarsi un vero e proprio danno per gli obiettivi gestionali delle stesse andando ad intaccare sia l'aspetto paesaggistico che quello economico, soprattutto se avvengono su larga scala (Gardiner et al., 2013).

Focalizzando l'attenzione sulle tempeste da vento, ad oggi queste sono responsabili di oltre il 50% dei danni nelle foreste Europee, espressi in volume di legname, derivati da eventi di disturbo (Schelhaas, 2008a), come riportato in Figura 1.

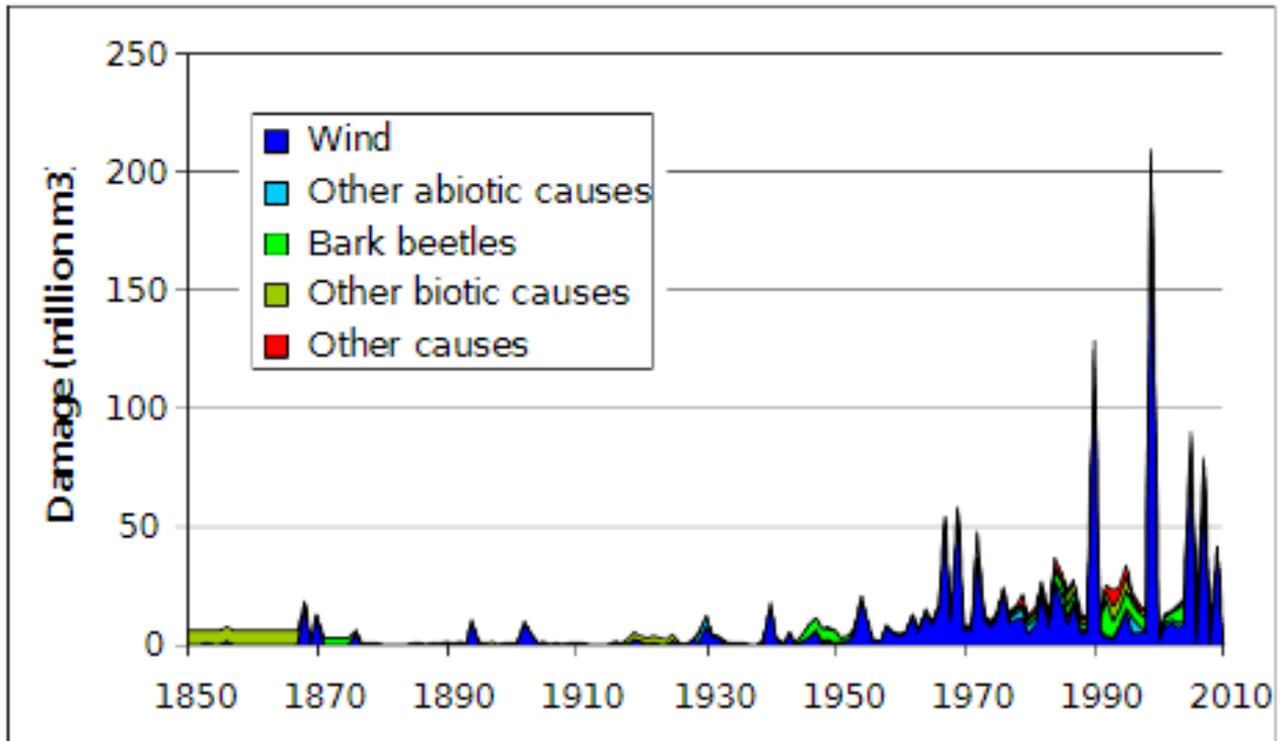


Figura 1: Danni totali causati da disturbi nelle foreste Europee (Schelhaas, 2008a)

Dal 1950 molti studi affermano che i danni alle foreste sono in aumento (Schelhaas, 2003): se da un lato è vero che i disturbi naturali hanno sempre fatto parte della storia delle foreste, dall'altro è necessario tenere in considerazione che nell'ultimo secolo le foreste si sono espanse sia spazialmente sia in termini di provvigione. Ciò è stato determinato da un aumento delle superfici boscate in seguito a rimboschimenti artificiali e nuove attività selvicolturali volte alla conversione all'alto fusto, spesso prediligendo un'unica specie per soddisfare prettamente esigenze produttivo-economiche (Loustau, 2010), senza dimenticare l'abbandono delle attività agricole in montagna e l'avvento dei combustibili fossili.

A livello Europeo sta diventando una priorità il coordinamento tra la mitigazione e la gestione dei danni da vento a fronte di un probabile aumento dell'incidenza delle tempeste nelle foreste. Ciò risulta determinato sì, come detto sopra, dall'espansione spaziale e volumetrica ma anche dai cambiamenti climatici (Gardiner et al., 2013).

Per quanto riguarda i disturbi di natura biotica, è sicuramente da annoverare l'insetto scolitide *Ips typographus* (L.). Si tratta di un piccolo coleottero scolitide corticicolo specifico dell'abete rosso, "classificato tra le dieci specie di insetti responsabili dei maggiori danni alle foreste europee" (Battisti et al., 2020 – Sherwood 245). Un suo attacco, infatti, determina

spesso la morte della pianta: in una foresta naturale caratterizzata da una buona complessità strutturale, decisamente lontana dalle estese foreste di abete rosso in purezza che caratterizzano molte parti d'Europa, la sua azione si concentra su piante già deperenti a causa di fattori abiotici, come per esempio stress idrici, favorendo quindi quelle più resistenti e creando nicchie di biodiversità (Battisti et al., 2020 – Sherwood 245). In una foresta danneggiata da vento, invece, si verificano delle pullulazioni di bostrico anche di entità estreme, che innescandosi a partire dal materiale legnoso a terra, portano alla morte piante sane anche su vasti settori. L'andamento di queste pullulazioni può essere monitorato con specifiche trappole attivate da feromoni le quali agiscono attraendo e catturando i singoli individui di questo scolitide. È stato determinato che un numero superiore a 8000-10.000 individui per trappola costituisce la soglia di passaggio tra la fase endemica dell'insetto, ovvero la sua normale presenza ecologica all'interno dell'ecosistema foresta, a quella epidemica che determina danni ingenti (Faccoli e Stergulc, 2004). In Europa gli attacchi di bostrico su boschi di conifera sono ben noti come del resto le tempeste di vento che spesso li precedono: l'entità del danno, in relazione alla massa di legname abbattuta dal vento, può raggiungere perdite ulteriori variabili tra il 10 e il 200% (Battisti, 2020). Nel decennio 1990-2001, per esempio, sono stati registrati in territorio europeo danni causati dal bostrico per circa 7,6 milioni di ettari e 31,6 milioni di metri cubi di legname (Lieutier et al., 2004).

1.2. Un evento estremo per la piccola realtà italiana: la tempesta Vaia

Sostenendo quanto detto precedentemente in merito ai disturbi abiotici, uno studio (Torreggiani L., 2019) presenta un *excursus* delle tempeste da vento che hanno interessato principalmente l'Europa centro-settentrionale le quali, dal 1960 circa ad oggi, sono responsabili della distruzione di enormi superfici forestali, stimando quasi 700 milioni di metri cubi di legname abbattuti.

Scorrendo la Tabella 1 risulta evidente che a livello europeo gli eventi meteorologici che hanno causato danni anche di importanti entità non sono poi così rari: in quarant'anni si sono verificati dieci eventi che hanno causato danni di diverse entità, dai 5,3 milioni di metri cubi della tempesta Elisabeth ai 240 milioni di metri cubi di Lothar e Martin.

Nello stesso arco temporale in Italia, invece, non sono stati registrati particolari eventi estremi paragonabili a quelli appena elencati, se non eventi di entità di gran lunga inferiori come quello del 1966 quando, nei territori nord-orientali della penisola e precisamente nel Trentino, un vento con un picco di velocità di 200 km/h ha abbattuto circa 700.000 m³ di legname. Nelle regioni di Piemonte e Valle D'Aosta, nel 1990 la tempesta Vivian finiva il suo corso provocando danni per circa 100.000 m³ di legname schiantato, mentre in Toscana, più recentemente nel 2015, si sono verificati schianti da vento per volumi superiori ai 330.000 m³ (Torreggiani L., 2019).

Tabella 1: Principali tempeste dagli anni '60 ad oggi (Torreggiani L., 2019 - adattato)

Tempesta	Zona d'Europa	Anno	Danno in Milioni di m³
Adolph e Bermoihl	Centro	1967	46,5
Orkanernas host	Nord	1969	42,2
Quimburga	Nord	1972	25
The Great Storm	Centro-Nord	1987	11,4
Vivien, Wiebke	Centro	1990	120
Lothar e Martin	Centro	1999	240
Elisabeth	Centro orientale	2004	5,3
Gudrun	Nord	2005	77,5
Kyrill	Nord	2007	65
Klaus	Sud-occidentale	2009	44,6
TOTALE			677,5

La tempesta Vaia, verificatasi nei giorni tra il 27 e il 30 ottobre 2018, rappresenta un'eccezione dunque per la storia italiana, in particolare per i territori montuosi del Nord-Est. L'evento si è diviso sostanzialmente in due parti: la prima, della durata di due giorni, ha visto intense piogge che hanno determinato la metà della piovosità media annuale di quelle zone, circa 600 mm; la seconda ha visto forti raffiche di vento provenienti da Est superiori ai 120 km/h, localmente spintesi fino a quasi 200 km/h (P.A.T. – A.Pro.Fo.D. – S.F., 2022), che hanno causato, complice il suolo fradicio, lo schianto di circa 42.000 ettari di superficie forestale, per un volume stimato di circa 8.500.000 metri cubi a livello nazionale (P.A.T. – A.Pro.Fo.D. – S.F., 2022; Chirici et al., 2019).

Inoltre, Chirici et al. (2019) riportano che le Regioni maggiormente interessate dai danni risultano essere Trentino Alto-Adige con più di 18.000 ha danneggiati, Veneto con 12.000 ha, e Lombardia con circa 4.500 ha, seguiti, in modo marginale, da Friuli-Venezia Giulia, Piemonte e Valle D'Aosta.

Confrontando questi dati con quelli registrati in Italia sopra menzionati è chiaro che la tempesta Vaia costituisce, a livello nazionale, l'evento che ha avuto maggior impatto sugli ecosistemi forestali mai registrato fino ad oggi (Chirici et al., 2019) ma, se confrontati invece con i dati europei, l'evento del 2019 non è che tra gli ultimi da annoverare negli ultimi 57 anni.

1.3. Gli effetti della tempesta Vaia in Trentino

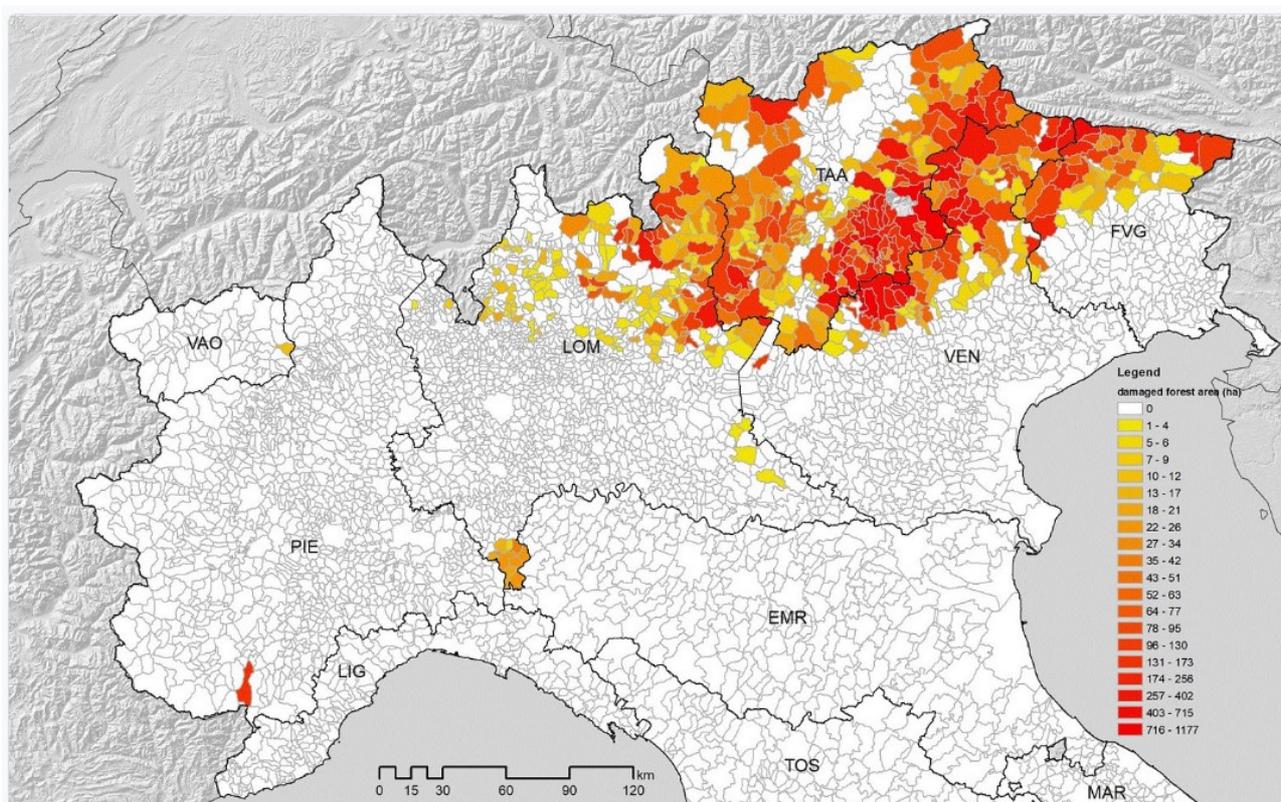


Figura 2: superficie forestale distrutta dalla tempesta Vaia (Chirici et al., 2019)

Per una piccola realtà come quella trentina, zona montuosa situata nel sud-est delle Alpi italiane che deve molto della propria cultura ed economia alla filiera del legno, l'evento Vaia ha causato enormi ripercussioni economiche ai proprietari forestali, soprattutto pubblici (Comuni). Il Servizio Foreste della Provincia Autonoma di Trento (di seguito indicato come Servizio o acronimo S.F.), nel quale è parzialmente incardinato il Corpo Forestale Trentino (C.F.T.), si è presto adoperato per una prima ricognizione dei danni causati: nei mesi immediatamente successivi si è proceduto ad una prima analisi quantitativa tramite stima per osservazione diretta delle aree schiantate sparse per tutta la provincia; poi, al fine di

giungere ad una caratterizzazione più precisa si è proceduto all'aggiornamento dei dati tramite foto interpretazione di immagini satellitari e, nel 2020, attraverso l'analisi dei monitoraggi delle utilizzazioni forestali (P.A.T. – A.Pro.Fo.D. – S.F., 2022).

Ciò ha potuto confermare l'entità del danno causato dagli schianti da vento della tempesta Vaia, il quale coinvolge una superficie forestale di 19.800 ha per un ammontare di più di 4 milioni di metri cubi di legname abbattuto, poco meno di circa 500.000 dei quali nei boschi di proprietà privata.

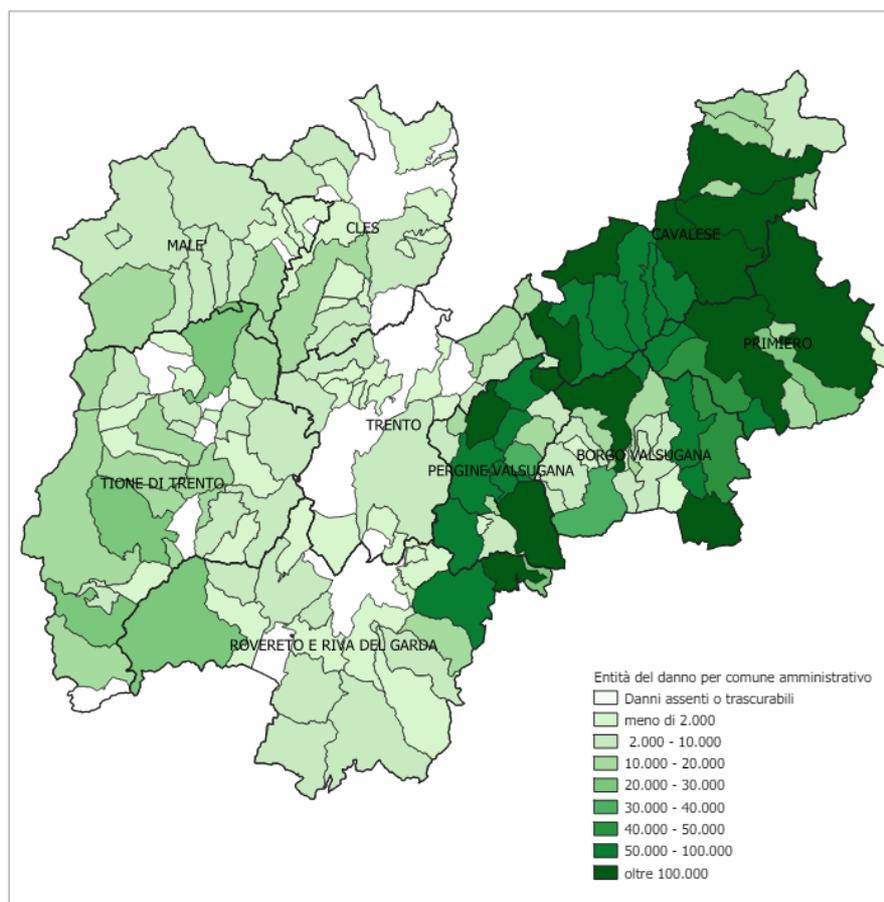


Figura 3: distribuzione del danno per comune amministrativo (m3 tariffari) - (P.A.T. - A.Pro.Fo.D. - S.F., 2020)

Il danno non si è verificato in modo costante ed omogeneo su tutta la superficie provinciale, ma si è concentrato in particolar modo nelle valli situate in sinistra orografica del fiume Adige (Figura 3).

Infatti, come si evince dalla Tabella 2, i territori degli Uffici Distrettuali Forestali (U.D.F.), in cui si articola il Servizio, maggiormente colpiti risultano essere quello di Cavalese con più di 1 milione di metri cubi, Pergine Valsugana con quasi 800.000 di metri

cubi e Primiero con quasi 500.000 di metri cubi, i quali appunto coprono le zone orientali della provincia di Trento (P.A.T. - A.Pro.Fo.D. - S.F., 2022).

Tabella 2: distribuzione del danno per UDF (P.A.T. - A.Pro.Fo.D. - S.F., 2022)

UDF	m ³ (lordi) tariffari	ripresa annua (m ³)	n. di riprese annue
Borgo V.	652.531	39.563	16,50
Cavalese	1.323.779	93.628	14,10
Cles	34.874	47.134	0,70
Malè	58.912	53.266	1,10
Pergine V.	767.013	36.973	20,70
Primiero	490.344	46.487	10,50
Rovereto	304.224	27.720	11,00
Tione	197.215	64.316	3,10
Trento	73.898	27.385	2,70
Demanio PAT	195.932	11.410	17,20
TOTALE	4.098.722	447.882	9,20

Ai fini di una migliore comprensione dei dati riportati si precisa che per metri cubi tariffari si intende il volume legnoso che viene definito dal “cormo” della pianta, ovvero il tronco privato sia dei rami che del cimale svettato ad un diametro pari a 7 cm, con corteccia. Esso viene dedotto sulla base delle “Tariffe di Cubatura del Trentino”, utilizzato anche per la quantificazione delle riprese nell’ambito dei Piani di Gestione Forestale (P.A.T. - A.Pro.Fo.D. - S.F., 2022). Si tratta di un sistema basato sulle tavole dendrometriche austriache costruite da Grundner – Schwappach e che, tramite una modellazione dei dati, offre per le sette specie di maggior interesse forestale a livello locale - ovvero Abete bianco, Abete rosso, Larice, Pino silvestre, Faggio, Pino cembro e Pino nero - la cubatura a doppia entrata (classe di diametro e classe di fertilità) e curve ipsometriche (Scrinzi G. et al., 2010).

1.4. Le conseguenze della tempesta Vaia: l'epidemia di *Ips typographus* in Trentino

La tempesta Vaia, a fronte di interi versanti di fusti sradicati e spezzati, ha messo a dura prova le utilizzazioni forestali, soprattutto per quanto riguarda l'organizzazione dei cantieri forestali con tutte le conseguenze sulla sicurezza per gli operatori in bosco e, non da meno, anche le infrastrutture -forestali e non- adibite al trasporto del legname raccolto. I lavori di recupero dello stesso si sono protratti fino a tutto il 2021 (P.A.T. – S.F., 2023) e molto probabilmente, per le difficoltà orografiche di alcune zone e, di conseguenza, difficoltà tecniche di esbosco, una parte di materiale stimabile intorno agli 800.000 metri cubi rimarrà sul letto di caduta. Dunque, per circa tre anni, enormi quantità di legno sono rimaste giacenti a terra permettendo alla popolazione dell'insetto scoltide corticicolo *Ips typographus*, chiamato comunemente bostrico, di passare dalla fase endemica a quella epidemica.



Figura 4: trappola a feromoni allestita in un'area colpita da bostrico (bosco di abete rosso sito sul monte Paganella, Sara Fait estate 2024)

Come spiegato nel primo paragrafo di questo capitolo, il bostrico fa normalmente parte delle peccete nelle quali, in una situazione di normalità, colpisce piante già indebolite da altri fattori abiotici causandone la morte. Nel dopo Vaia esso ha trovato una quantità di piante disponibili alla sua proliferazione tale da innescare una vera e propria pullulazione, che sta durando ancora oggi. Infatti, la colonizzazione delle piante atterrate da parte dell'insetto non è stata che una prima fase di avvio dell'epidemia, la quale poi è continuata sulle piante in piedi: dapprima colpendo quelle di margine delle aree schiantate già indebolite dalla tempesta, poi indistintamente interi popolamenti superstiti all'evento.

La Provincia Autonoma di Trento si è adoperata circa l'organizzazione degli interventi per la lotta fitosanitaria modificando la propria legge forestale (L.P. n.11/2007), introducendo l'articolo 98 bis "Disposizioni particolari per fronteggiare l'epidemia da bostrico". Esso prevede, da parte della provincia, la redazione di uno speciale "piano per l'organizzazione degli interventi di utilizzazione per la lotta fitosanitaria e di ricostituzione dei boschi danneggiati" ("Piano Bostrico"), il quale tra le altre cose fissa anche l'obiettivo di monitorare l'epidemia per poter dare indicazioni via via più precise man mano che essa avanza.

Il monitoraggio, partito già dalla primavera 2019, è stato eseguito predisponendo, in modo capillare sul territorio provinciale, 228 trappole tipo Theysohn (Figura 4) innescate con feromoni di aggregazione sintetici, poste prevalentemente ai margini delle aree colpite da Vaia e mantenute anche nel corso degli anni successivi (attualmente ancora attive). Esse forniscono molte informazioni riguardo la diffusione dello scolitide, il suo voltinismo (numero di generazioni per anno) e la fenologia per definire l'inizio di sfarfallamento e i picchi di volo per ogni anno.

Dalla Figura 5 in seguito riportata si evince che, come facilmente si poteva prevedere, le catture del 2019 sono state pressoché esigue rimanendo, nella maggior parte dei casi, al di sotto della soglia critica delle 8000 catture per trappola. Già dall'anno successivo, complice probabilmente un inizio annata caldo e asciutto che ha determinato lo sfarfallamento degli adulti già ad aprile 2020, l'infestazione si è manifestata subito innalzando il picco delle catture che sono risultate essere, in media su tutta la provincia, circa 8 volte maggiori rispetto all'anno precedente, con 26.753 individui/trappola. Il 2021 ha visto, invece, un'inversione del *trend* di pullulazione, a causa di una primavera particolarmente fresca che ha causato un ritardo nello sfarfallamento degli svernanti e di un'estate piuttosto piovosa, particolarmente nei mesi di maggio e luglio (Meteotrentino, 2022 – Analisi meteorologica 2021). In ogni caso, le catture medie attestata a 22.315 individui/trappola hanno confermato anche per l'anno 2021 la fase epidemica dell'insetto.

Così è stato anche per l'anno 2022, durante il quale si è visto un aumento delle catture rispetto all'anno precedente: in media sono state 26.248 individui/trappola, dimostrando che l'epidemia fosse ancora nel pieno del suo corso, favorite dall'estate calda che ha permesso il completo sviluppo di due intere generazioni dell'insetto.

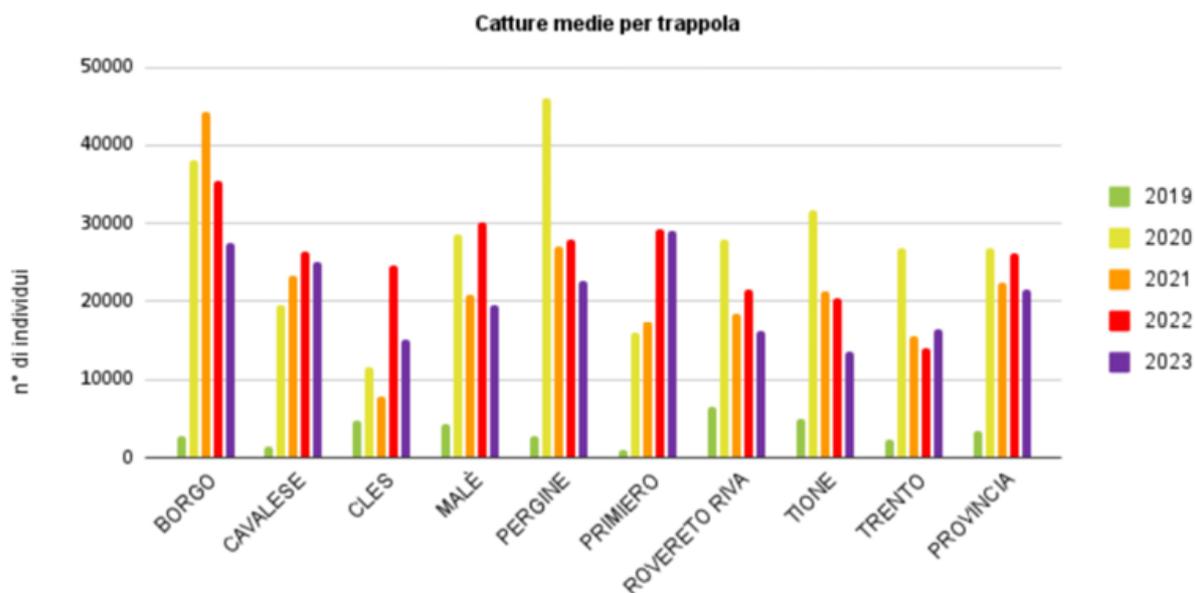


Figura 5: catture medie per trappola per UDF negli anni 2019-2023 (P.A.T. - S.F. - Piano bostrico, 2024)

Per quanto riguarda l'anno 2023, infine, questo è stato molto favorevole per le piante grazie alle precipitazioni al di sopra della media di maggio e luglio (da Meteotrentino, 2024: Analisi meteorologica – anno 2023) andando ad interrompere il lungo periodo di siccità durato da fine anno 2021; molto meno lo è stato per l'insetto scolitide in quanto le abbondanti piogge hanno interferito negativamente sul volo degli adulti. Le catture medie si sono ridotte a 21.436 insetti/trappola, valore che segna un calo rispetto al precedente anno del 18% e che stabilisce il limite inferiore da quando l'infestazione è esplosa, pur rimanendo, comunque, sopra la soglia epidemica.

Il "*Piano Bostrico*" finora riassunto, aggiornato con delibera della Giunta Provinciale della PAT nr. 1602 del 11 ottobre 2024, prova a dare una previsione per la fine dell'anno 2024 presentando i dati di cattura al 20 luglio 2024 (Figura 6). Essi mostrano un crollo in atto delle popolazioni, con catture medie pari a 3787 individui/trappola, inferiori addirittura del 79% rispetto agli stessi dati al 20 luglio 2023 (17.967). Ciò potrebbe riflettere il naturale decorso delle infestazioni, che dopo qualche anno dal loro inizio, tendono ad estinguersi a

causa sia dell'aumento della competizione intraspecifica che dell'impatto degli antagonisti naturali. In aggiunta, l'andamento meteorologico della primavera e dell'inizio estate, con temperature inferiori alla media e precipitazioni frequenti, ha ostacolato il volo degli svernanti, favorendo questo *trend* in diminuzione. Tutto questo lascia ben sperare, prevedendo meno generazioni all'anno e livelli di popolazione ancora in calo nell'ultima parte della stagione.

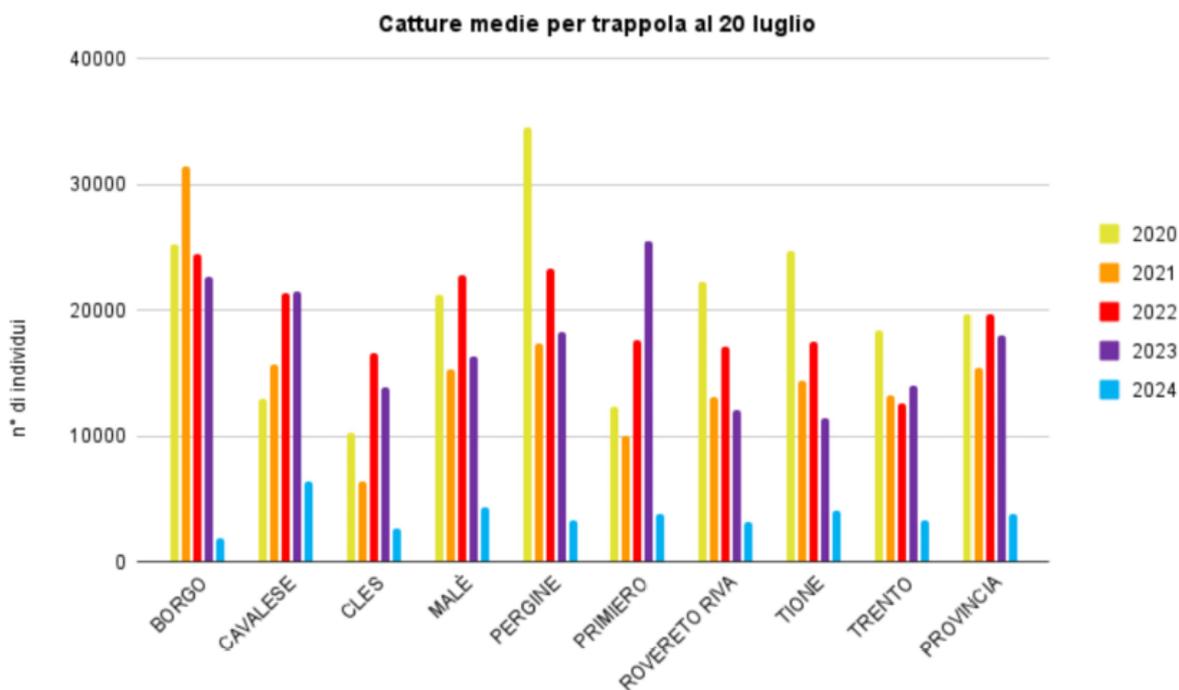


Figura 6: Catture medie per trappola per ciascun UDF al 20 luglio 2024 (P.A.T. - S.F. - Piano bostrico, 2024)

Se il monitoraggio delle trappole di cattura ha portato alla stima quantitativa dell'epidemia, il resoconto dei progetti di taglio redatti dai vari Uffici Distrettuali Forestali (distaccamenti periferici del S.F. della PAT) ha permesso di quantificare il danno causato dallo scoltide in termini di metri cubi di legname disseccati, i cui dati sono riportati nella sottostante Tabella 3.

I risultati sono in linea con i dati delle catture: nel 2019 si è manifestato in modo relativamente contenuto, con circa 50.000 metri cubi disseccati. Nei successivi anni il dato è via via più che raddoppiato, come si vede per l'anno 2022 che ha registrato più del doppio dei metri cubi danneggiati rispetto al 2021. Nel 2023, come mostrato dai dati delle catture, il dato è tornato a diminuire. In totale, quindi, al 2023 più di 2,5 milioni di metri cubi di danno. Si tratta di oltre la metà del danno in volume causato dal bostrico, in linea con quanto affermato in letteratura, secondo la quale il danno da *Ips typographus* conseguente ad un

disturbo come la tempesta Vaia può essere pari se non, addirittura, maggiore di quello causato dalla tempesta stessa.

Tabella 3: Volumi danneggiati dal bostrico sul territorio provinciale - anni 2019-2023 (P.A.T. - S.F. Piano Bostrico, 2024)

Ufficio Distrettuale Forestale	2019	2020	2021	2022	2023	TOTALE
	m³	m³	m³	m³	m³	m³
BORGO VALSUGANA	560	16.756	86.660	163.833	44.602	312.411
CAVALESE	9.712	71.041	225.172	562.502	291.971	1.160.398
CLES	282	3.473	4.675	15.531	9.080	33.041
MALE'	857	8.774	21.679	56.996	42.995	131.301
PERGINE VALSUGANA	26.000	35.643	43.000	106.833	40.849	252.325
PRIMIERO	393	10.644	98.056	270.161	108.289	487.543
ROVERETO E RIVA DEL GARDA	3.090	12.574	23.783	17.318	7.173	63.938
TIONE DI TRENTO	8.052	18.966	22.304	82.399	27.895	159.616
TRENTO	3.653	5.310	18.210	24.406	10.755	62.334
TOTALE PROVINCIA	52.599	183.181	543.539	1.299.979	583.609	2.662.907

2. I SERVIZI ECOSISTEMICI OFFERTI DALLE FORESTE

2.1. I concetti di “ecosistema” e “servizi ecosistemici”

Un ecosistema definisce il rapporto che si instaura tra gli organismi e l'ambiente abiotico in cui vivono. Esso, inoltre, è caratterizzato da quattro attributi principali: stabilità, diversità, resistenza e resilienza. Un ecosistema può essere definito stabile quando è in grado di mantenere inalterate le proprie caratteristiche a fronte di impatti esterni; è resistente quando mantiene intatta la propria struttura nonostante pressioni esterne; è resiliente quando è capace di rispondere alle alterazioni tornando al suo stato iniziale; la diversità, infine, detta anche biodiversità, è la componente che caratterizza maggiormente ogni ecosistema, donandogli una propria identità. Si tratta quindi dell'insieme degli organismi viventi che lo vivono, includendo sia diversità tra individui della stessa specie, sia diversità tra specie fino alla sua più grande concezione di, appunto, ecosistema. Biodiversità è inoltre sinonimo di ricchezza: ricchezza di diversità genetica, ma anche ricchezza di funzioni fornite dalle diverse specie che popolano l'ecosistema che, di conseguenza, genera quei servizi ecosistemici di cui anche l'uomo beneficia. Se, dunque, un ecosistema con un basso grado di biodiversità è considerato fragile, l'alta biodiversità di un altro ne garantisce forza e resilienza. Infatti, là dove sono presenti una moltitudine di specie tale da garantire specifiche funzioni (come, per esempio, la produttività o l'impollinazione), un impatto può essere mitigato poiché le funzioni di alcuni individui che vengono a mancare vengono comunque espletati da altri. Il presupposto si basa sul fatto che una specifica funzione è demandata a più specie e non solamente ad una, ciò assicura all'ecosistema stabilità e resilienza (Marini, 2023).

Per servizi ecosistemici (SE, in breve), invece, si intendono tutti quei beni materiali e immateriali offerti dai diversi ecosistemi presenti sul Pianeta Terra. Un'iniziativa delle Nazioni Unite intrapresa negli anni 2000, il *Millennium Ecosystem Assessment* (MA, in breve), ha cominciato a diffondere il termine con l'obiettivo di studiare prima le relazioni fra biodiversità, servizi ecosistemici e uomo, poi come sono cambiate queste relazioni nel corso del tempo e come cambieranno in futuro.

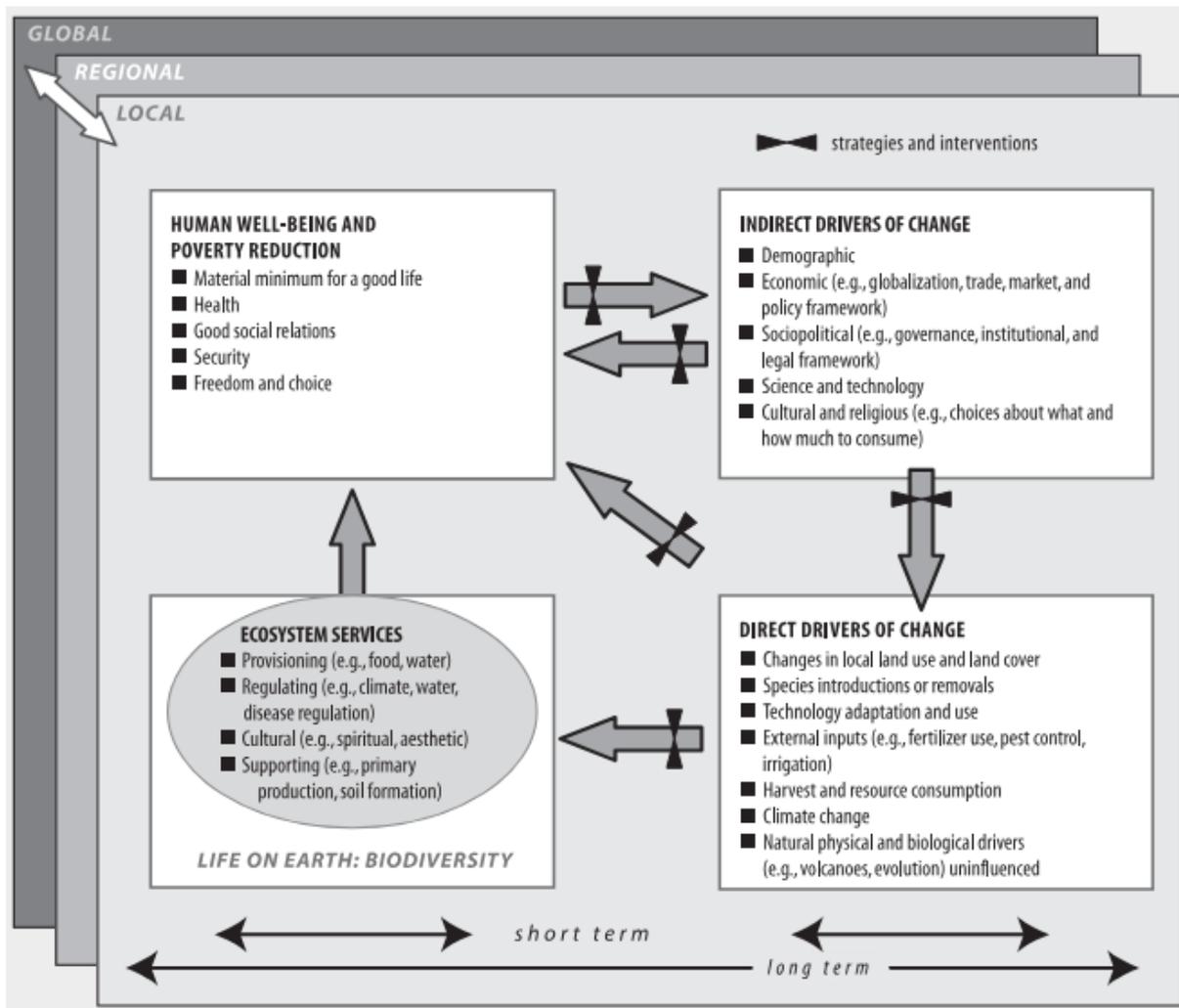


Figura 7: Classificazione e interazioni dei SE con il benessere umano. Fonte Millennium Ecosystem Assessment (2003) - *Ecosystem and Human Well-being: a Framework for Assessment*

Inoltre, come riportato in Figura 7, il MA vuole accrescere la conservazione e l'uso sostenibile degli ecosistemi proponendo una classificazione dei SE definendoli come "benefici multipli forniti dagli ecosistemi al genere umano" (MA, 2003:53):

- Servizi di approvvigionamento: forniscono beni materiali come acqua, legname, fibra, derrate alimentari;
- Servizi di regolazione: regolano il clima e le precipitazioni, i flussi d'acqua (per esempio le inondazioni), i rifiuti, la diffusione delle malattie, regolano la produzione primaria. Sono servizi di regolazione l'impollinazione, il controllo biologico (ad esempio la predazione) e il sequestro di carbonio nelle foreste;
- Servizi di supporto: comprendono la formazione del suolo, la fotosintesi, la dispersione dei semi e il ciclo nutritivo alla base della crescita e della produzione;

- Servizi culturali: sono sostanzialmente la bellezza, l'ispirazione e lo svago che contribuiscono al benessere spirituale dell'uomo.

2.2. I servizi ecosistemici forestali

Il complesso ecosistema foresta ricopre un duplice ruolo: biologico ed economico. Se in passato la funzione principale attribuita e maggiormente riconosciuta al bosco era la produzione del legname, già dagli anni '70 si è compreso che esso svolge un ruolo ancora più importante, di carattere ecologico e sociale. Con la pubblicazione del *Millennium Ecosystem Assessment* e successivamente il *FAO Global Forest Resources Assessment* sono stati riconosciuti i SE anche delle foreste, di conseguenza assestamento e selvicoltura hanno cominciato a tenerli in considerazione. Le foreste, d'altronde, hanno un ruolo essenziale per il mantenimento della stabilità ambientale: esse influenzano il ciclo dell'acqua, fissano anidride carbonica prevenendo l'ormai noto e temuto "effetto serra", contribuiscono alla protezione del suolo da erosione e frane. Tutti servizi, questi, di difficile valutazione economica rispetto a quelli più tradizionali come la produzione di legname e di legna da ardere, la raccolta di cibo e di prodotti non legnosi come i funghi, tartufi (talvolta di altissimo valore economico), frutti e le resine, per non parlare di tutte quelle attività collegate quali la caccia, la pesca, il turismo e l'educazione ambientale. Ancor più difficile, infine, è la definizione del valore della biodiversità delle foreste, considerandole sotto l'aspetto biologico (Pettenella, 2009; Gaglioppa et al., 2017).

Più che una valutazione dei SE sotto l'aspetto economico, questa tesi ha l'obiettivo di valutarne gli effetti. Quindi, di seguito, ne viene presentata una classificazione, secondo il MA e successivamente perfezionata nell'iniziativa della Commissione Europea chiamata CICES, a titolo di *excursus*, che individua tre macro categorie di servizi ecosistemici: servizi di approvvigionamento (ovvero legno, prodotti non legnosi e acqua potabile), di regolazione e mantenimento (come ricarica delle falde acquifere, assorbimento di CO₂ e protezione dell'erosione), e culturali (come turismo, paesaggio e spiritualità) (Gaglioppa et al., 2017 – Pettenella, 2019).

2.2.1. Servizi di approvvigionamento

I servizi di approvvigionamento forniscono i beni materiali, quindi tra i SE sono quelli più tangibili e facilmente quantificabili. La produzione è stata per secoli -e per alcune realtà lo è ancora oggi- un'attività primaria fornendo beni di prima necessità come legna da ardere e legname da opera. Per esempio, nell'Unione Europea le industrie del legno rappresentano il 21% delle imprese manifatturiere (EU, 2016a). Tuttavia, le foreste non producono solo legno: da non sottovalutare sono infatti i prodotti non legnosi: funghi, pregiati tartufi, castagne, pinoli, nocciole, miele e piccoli frutti vengono prodotti dai boschi dell'Unione Europea; resine, lattice nel resto del mondo.

2.2.2. Servizi di regolazione e mantenimento

Diversamente da quelli appena descritti, i servizi di regolazione non offrono prodotti visibili e facilmente quantificabili. Al contrario, offrono qualcosa di immateriale il cui beneficio è comunque deducibile: si tratta della difesa dei suoli dall'erosione e dei conseguenti dissesti idrogeologici, il controllo dunque anche del regime delle acque, la regolazione del clima e della purificazione dell'aria, intesa come sequestro di anidride carbonica.

Per quanto riguarda la difesa dei suoli, l'effetto diretto della copertura delle chiome nel diminuire la velocità e la quantità di pioggia che arriva al suolo è determinante per la salvaguardia dello stesso: l'acqua viene intercettata prima dai vari strati di foglie, poi dal fusto dove si incanala e arriva al terreno scivolando dolcemente. Ciò determina conseguentemente un minor scorrimento superficiale dell'acqua, proprio perché arrivando con minore velocità esso riesce ad assorbirla più efficientemente, e quindi l'erosione del suolo viene contenuta. Una seconda e ulteriore protezione viene offerta dall'apparato radicale delle piante che, come una fitta rete sotterranea, rinserra il suolo mitigando eventi franosi più facilmente verificabili su pendii privi di vegetazione. Ma non solo: le zone montuose presentano anche il rischio caduta massi e valanghe. Questi fenomeni gravitativi spesso possono costituire seri pericoli se a valle insistono abitazioni o infrastrutture. I cosiddetti "boschi di protezione" offrono la funzione di mitigazione verso questi due fenomeni, "frenando" i massi o le valanghe tramite l'impatto diretto con i tronchi. Non a caso la selvicoltura in Trentino, per esempio, mira a salvaguardare questa funzione proprio in quei boschi definiti tali dalla pianificazione forestale tramite precise disposizioni.

Per quanto riguarda invece la regolazione climatica, l'effetto delle foreste è quello del sequestro di anidride carbonica dall'aria. Per fisiologia le piante assorbono anidride carbonica attraverso l'apparato fogliare stoccando il carbonio all'interno dei propri organi di sostegno, "sequestrandolo" appunto e rilasciando ossigeno nell'aria. Il servizio dovrebbe aumentare in entità con la crescita delle foreste, o rimanere costante nel caso di foreste gestite dall'uomo che non "intaccano" il capitale, ovvero prelevando solo quello che viene definito come incremento (che consiste in uno dei principi della Selvicoltura Naturalistica). Invece, nel periodo 1990-2015, uno studio della Food and Agricultural Organization (FAO, 2016) riporta che il carbonio stoccato nelle diverse realtà mondiali è in calo nel continente africano, in Sud America e nel sud-est asiatico. Per quanto riguarda l'Europa, invece, il carbonio sottratto all'atmosfera è aumentato, come riportato nella sottostante Figura 8. Ciò potrebbe essere spiegato, verosimilmente, dal fatto che l'Europa negli ultimi 60 anni sta vivendo un periodo di aumento della superficie forestale: dal 1990 i boschi sono aumentati in superficie ad un tasso medio dello 0,4% a causa di rimboschimenti, abbandono dei terreni coltivati anche nelle zone di montagna ed alla successione naturale della vegetazione (Bucella P., 2014). Questo allargamento delle foreste, anche in latitudine, può essere visto sia positivamente in termini di aumento di provvigione legnosa e di riserva di carbonio, ma anche negativamente sotto l'aspetto della diminuzione dell'albedo terrestre per la conseguente diminuzione della superficie coperta da neve.

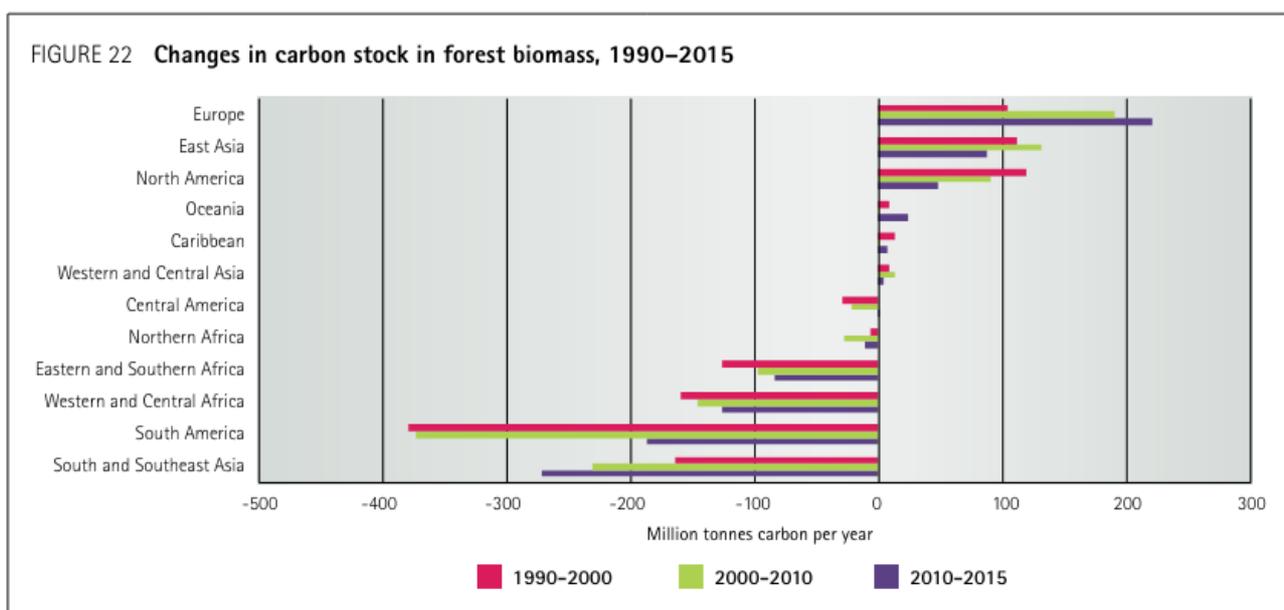


Figura 8: cambiamenti nella quantità di carbonio stoccata dalle foreste nel periodo 1990 – 2015 (fonte FAO, 2016)

2.2.3. Servizi culturali

Le foreste presentano una funzione che include benefici immateriali e non consumabili finché esse continueranno ad essere presenti: questa prende il nome di funzione culturale. Essa è legata allo stato fisico, mentale e percettivo delle persone che trovano beneficio nella contemplazione e nel vivere esperienze all'interno dei boschi e aree naturali in genere. Ciò è stato supportato anche da uno studio dell'Unione Europea, DG Ambiente (pubblicato su Notiziario Natura e biodiversità, Natura 2000 nr. 40, 2016), il quale ha evidenziato che passare del tempo in una zona naturale riduce lo stress e promuove l'attività fisica e, non di meno, incoraggia una maggiore coesione sociale.

Secondo il CICES, inoltre, in questa funzione sono riconosciuti due principali servizi: quelli simbolici e quelli intellettuali-ricreativi. I servizi simbolici sono legati al fatto che in molte culture alla natura vengono attribuiti valori storici, etici, religiosi e spirituali. Infatti, una foresta può essere un elemento di forte caratterizzazione per un territorio per il fatto di avere un'identità culturale per una data popolazione. È il caso, per esempio, della Foresta dei Violini in Val di Fiemme (Foresta demaniale di Paneveggio, Provincia Autonoma di Trento), dove tradizionalmente il famoso liutaio Stradivari selezionava il legname per i suoi strumenti musicali. O ancora la foresta è associata, nell'immaginario collettivo, ad un ambiente misterioso dove sono ambientate la maggior parte delle favole e leggende tramandate fino ai giorni nostri. I servizi intellettuali-ricreativi, invece, come facilmente deducibile dalla definizione, consistono in tutte quelle attività che si possono svolgere all'interno della foresta e che soddisfano una moltitudine di interessi diversi: la raccolta di prodotti non legnosi quali funghi, tartufi, frutti di bosco, la caccia, il turismo naturalistico e molto altro. Tutto ciò aumenta notevolmente il valore e di conseguenza l'importanza di conservare questi luoghi naturali. La foresta come paesaggio e come luogo simbolico viene infatti tutelata a livello normativo sia dalla Comunità Europea, eleggendo il sito a patrimonio UNESCO per la straordinaria bellezza, sia a livello nazionale con la legge numero 431 del 1985 (cosiddetta legge Galasso) che introduceva il vincolo paesaggistico, abrogata e sostituita poi dal successivo decreto legislativo numero 42 del 2004 (cosiddetto Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio) che regola, tra le altre cose, il rilascio dell'autorizzazione per opere in ambiti coperti dal vincolo paesaggistico.

3. LA FUNZIONE PROTETTIVA DEI VERSANTI

3.1. Il valore economico della funzione protettiva dei versanti

Da quanto finora riportato, risulta chiaro che le foreste in regioni montuose svolgono molteplici funzioni: una di tipo economico in quanto la filiera del legno trova mercato sia in termini di legname da opera sia energetici; una di protezione contro pericoli naturali quali per esempio la caduta massi, le valanghe e le frane; una di tipo turistico-ricreativo per le più svariate attività che possono essere svolte in bosco.

Tuttavia, successivamente ad eventi meteorologici estremi quale è stata la tempesta Vaia e il successivo attacco massivo del bostrico, la funzione produttiva può essere fortemente compromessa o addirittura annullata nei casi più gravi. Dal punto di vista patrimoniale questi danni sono stimabili considerando sia il valore della svalutazione del legname da opera dovuto alla grande quantità di legname improvvisamente disponibile sul mercato, sia considerando il mancato guadagno di tutte le riprese perse fino alla ricostituzione del soprassuolo a maturità. Per quanto riguarda la funzione protettiva i danni potrebbero anche essere maggiori. Diversi autori hanno proposto alcuni approcci per stimarne l'entità: Dixon et al. (2013) e Shabman & Batie (1978), per esempio, considerano il valore della funzione di protezione da caduta massi e di altri fenomeni gravitativi (valanghe, ecc.) come "costo di sostituzione". Questo costo può essere monetizzato considerando i costi di realizzazione di opere artificiali difensive in sostituzione alle foreste. Queste opere però devono rispettare alcuni requisiti in termini di funzionalità, costo e accettazione da parte della società.

Fuchs & McAlpin (2005) parlano invece di "danni evitati", considerando il valore protettivo della foresta come l'ammontare dei danni che essa previene agli elementi esposti a rischio. A titolo esemplificativo, in termini quantitativi, nel caso di boschi di protezione da caduta massi, Pettenella (2019) ha dato una stima pari a 400 euro ad ettaro per anno come valore medio in Italia di questa particolare funzione (Bruzzese S. et al., 2019).

3.2. La quantificazione del ruolo protettivo delle foreste

La funzione di protezione delle foreste può essere classificata in tre livelli. Nel primo, essa viene intesa nella sua più ampia concezione e viene svolta, in generale, da tutte le foreste: la prevenzione dell'erosione superficiale e la regimazione delle acque. Il secondo, espletato soprattutto da quei popolamenti cresciuti su versanti che superano una certa soglia di pendenza, consiste nella mitigazione di fenomeni quale la caduta massi, le colate detritiche e il distacco di valanghe. Il terzo livello infine viene svolto da quelle foreste che si trovano a monte di insediamenti umani o vie di comunicazione, esse fungono da protezione diretta (Schonenbergher 1998, Motta & Haudemand 2000 in Meloni et al., 2006).

Tuttavia, le funzioni che il bosco assolve non sono costanti nel tempo: alcune vengono espletate al massimo in alcune sue fasi evolutive, mentre vengono svolte meno efficacemente o completamente disattese in altre. In base a quanto detto finora possiamo affermare quindi che in una foresta non gestita, la funzione protettiva non viene svolta in modo continuativo (Motta & Haudemand 1999, Dorren 2002 in Meloni et al., 2006). Per esigenza umana, però, è necessario che essa venga espletata in modo costante: si rende quindi doverosa una gestione attiva e mirata a questo scopo, anche se purtroppo molte volte si rivela antieconomica soprattutto per le particolari caratteristiche topografiche in cui si trovano questi popolamenti e la loro limitata fertilità, che rendono tali operazioni spesso costose determinano macchiativi negativi (Meloni et al., 2006).

Il servizio ecosistemico di difesa contro i fenomeni gravitativi offerto dalle foreste è stato studiato da diversi autori i quali, tramite delle prove dirette di rotolamento massi da un pendio o tramite simulazioni con software specialistici, hanno tentato di quantificarlo. In uno studio in Francia (Bourrier et al., 2012) sono stati condotti degli esperimenti a scala reale prendendo in esame una parte di versante alpino compreso tra un'altitudine tra i 1200 e i 1400 m s.l.m. e una pendenza media di 38 gradi. Questo versante boscato, considerato di protezione contro la caduta massi, è stato soggetto a utilizzazioni boschive, le quali prevedevano di rilasciare a terra quattro piante tagliate in direzione ortogonale alla massima pendenza e legate con funi d'acciaio per compensare la temporanea diminuzione della densità delle piante in piedi (con la conseguente diminuzione della capacità di protezione offerta dalla foresta stessa). I risultati hanno mostrato che su cinquanta massi rilasciati a monte dell'area con i fusti atterrati, l'8,5% è stato fermato direttamente, mentre l'85,7% ha impattato sui fusti. Ciò ha potuto dimostrare la capacità dei fusti atterrati trasversalmente

alla massima pendenza di fungere da “barriera” contro il rotolamento dei massi poiché la loro energia veniva dissipata con l’impatto, ma ha portato anche alla luce il fatto che, se la roccia fosse riuscita comunque ad oltrepassare la struttura di protezione, questa avrebbe acquistato nuovamente velocità ed energia. L’esperimento di Bourrier, infine, suggerisce che per avere una maggiore ed efficace protezione contro questi fenomeni gravitativi sarebbero serviti un numero maggiore di piante abbattute rilasciate a terra.

Un altro studio condotto in Svizzera (Ringebach et al., 2022) ha ripetuto il rilascio di massi artificiali del peso di 45kg ciascuno su un versante di abeti rossi in tre distinti momenti durante un’utilizzazione boschiva: nello stato originale di foresta non utilizzata (definito stato ORG), dopo le operazioni di taglio con le piante ancora atterrate (quindi senza portare a termine l’esbosco del legname (definito stato DW) e dopo la loro rimozione (stato CLR). I risultati hanno evidenziato una sostanziale differenza con il precedente studio svolto in Francia: infatti solo il 3,6% delle rocce rilasciate è riuscito ad oltrepassare la zona in cui erano stati rilasciate le piante a terra, contro l’81% dello stato ORG e il 78,1% dello stato CLR delle rocce che sono state in grado di oltrepassare la suddetta area. Le differenze nella progettazione sperimentale e nei risultati tra i due studi hanno sottolineato, oltre a confermare la capacità delle piante intere atterrate di fungere da protezione contro la caduta massi, anche il presupposto che questa configurazione più naturale dei tronchi a terra abbia una maggiore efficienza rispetto al legno morto con contatto diretto con il suolo. Infatti, uno dei suggerimenti selvicolturali di Ringebach (2022) è proprio quello di considerare il rilascio di piante intere atterrate in modo trasversale al pendio a monte delle ceppaie e, eventualmente, parzialmente accatastate una sopra l’altra in modo tale da ottenere un rapporto diametro della roccia-tronchi utile a scongiurare sia la rottura della barriera che l’essere scavalcata dalle rocce in caduta. Tale accorgimento potrebbe essere applicato sia in quelle situazioni post-utilizzazioni boschive, come ipotizzato in questo studio, sia considerando l’integrazione della protezione naturale offerta da una foresta con ulteriori tronchi atterrati trasversali come soluzione economica e al contempo ecologica (Ringebach et al., 2022).

Successivamente ad un disturbo naturale a larga scala, come può essere stata la tempesta di vento Vaia, le attività volte al ripristino delle aree danneggiate possono acquisire un ruolo più significativo e delicato per la gestione delle foreste montane. Infatti, dopo un disturbo naturale, i tronchi atterrati possono mantenere o addirittura aumentare una moltitudine di servizi ecosistemici come, per esempio, la mitigazione del pericolo di erosione e conservazione della biodiversità grazie all’aumento della rugosità del terreno e, non di

meno, fornire protezione per la rinnovazione naturale. Tuttavia, la conservazione di questi servizi potrebbe andare contro le tradizionali pratiche selvicolturali di recupero di tutto il materiale legnoso atterrato, per salvarne il valore economico. Questo quesito è stato studiato da un altro autore in una foresta in provincia di Belluno (Costa et al., 2021), il quale ha sottolineato il ruolo attivo del rilascio delle piante atterrate dal vento nel prevenire pericoli gravitazionali, grazie al loro effetto barriera e riduzione dell'energia cinetica degli stessi, suggerendone il rilascio per mantenere la multifunzionalità del bosco durante le fasi di recupero post-evento. Lo studio è stato condotto non più con prove fisiche di rilascio di massi rotolanti, come è stato per i due precedenti studi riportati, ma tramite simulazioni eseguite con il software Rockyfor3D in tre diversi scenari: senza foresta, con rocce lasciate rotolare liberamente (NFOR); con bosco pre-evento (FPRE), simulando appunto la presenza del bosco di protezione; con foresta post-evento (FPOS), simulando la presenza di tronchi atterrati dal vento e lasciati sul posto. I risultati mostrano che, nel breve periodo successivo al disturbo naturale, l'efficienza protettiva del pendio è maggiore rispetto alla situazione antecedente. Ciò considerato che le caratteristiche della barriera naturale dipende strettamente dal tipo di disturbo che l'ha creata.

Riassumendo quanto riportato da questi tra autori, si può affermare che il ruolo protettivo delle foreste montane è confermato e che, successivamente a disturbi naturali, le scelte selvicolturali dell'uomo possono influenzarne il mantenimento nel breve periodo o annullarle completamente.

3.3. Una misura di mitigazione degli effetti negativi di Vaia e l'epidemia di bostrico in Provincia Autonoma di Trento

Dopo l'evento Vaia e la conseguente epidemia di bostrico tipografo, l'argomento finora discusso è risultato di evidente interesse per tutte quelle zone colpite che si trovano direttamente a monte di insediamenti umani e vie di comunicazione di tutti i tipi. La corsa al recupero delle ingenti quantità di legname abbattuto e/o danneggiato ha portato al denudamento di interi versanti con la conseguente necessità di costruire costose strutture di protezione quali reti paramassi o paravalanghe.

La Provincia Autonoma di Trento, come introdotto all'inizio di questo scritto, introducendo l'art.98 bis nella propria legge forestale (L.P. 23 maggio 2007, n.11) ha riconosciuto l'emergenza dovuta ai succitati eventi ed ha previsto, tra l'altro, un piano per l'organizzazione degli interventi di utilizzazione per la lotta fitosanitaria e di ricostituzione dei boschi danneggiati. Questo, oltre a consentire alla Giunta provinciale di delineare gli interventi e i criteri per il monitoraggio e l'utilizzazione dei boschi danneggiati, definisce anche quelli per l'identificazione delle situazioni critiche nonché le modalità e le priorità di intervento, focalizzando l'attenzione proprio su quei boschi che svolgono servizi ecosistemici di protezione o ambientali. L'obiettivo è quello di ricostruire soprassuoli più resilienti e articolati sotto il profilo compositivo e strutturale, più stabili ed ecologicamente equilibrati. Di qui la volontà della PAT di concedere dei contributi per la mitigazione degli impatti negativi e il ripristino delle aree colpite da bostrico, i cui criteri sono riportati nella delibera di giunta nr. 1303 del 20 luglio 2023. Le attività oggetto di premio rispecchiano quanto illustrato precedentemente dagli autori che hanno cercato di quantificare il ruolo protettivo dei versanti boscati, ovvero tagli direzionati perpendicolarmente alla massima pendenza in tre diverse modalità – totale, parziale 50% delle piante e parziale 20% delle piante – e rimboschimenti con almeno 2000 piantine ad ettaro. Lo scopo, si capisce, è proprio quello di aumentare la scabrezza dei versanti denudati da Vaia e dal bostrico e creare quelle strutture di barriera che hanno dimostrato la loro efficienza nel proteggere insediamenti e viabilità dai fenomeni gravitativi. L'incentivo ad utilizzare queste strategie è indirizzato ai grandi proprietari forestali, siano essi pubblici o privati, che altrimenti avrebbero un mancato guadagno per la perdita di materiale legnoso, rappresentando un'alternativa economica a quelle strutture di protezione artificiali costose e di forte impatto paesaggistico. Al contempo, i rimboschimenti con specie adatte al recupero funzionale degli ecosistemi forestali hanno lo scopo di diminuire il tempo di recupero, andando a ricostituire boschi misti più stabili. Il Servizio Foreste della PAT è stato incaricato di raccogliere le domande di contributo per le attività sopra riportate e di controllare che esse rispettino i criteri definiti della delibera, ai fini dell'erogazione del premio.

Il presente lavoro di tesi, quindi, si inserisce proprio nell'ambito di questa delibera, prendendo come area di studio due cantieri forestali per i quali sono stati richiesti gli aiuti per la realizzazione di opere di mitigazione.

4. OBIETTIVO DELLA TESI

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo quello di testare l'efficacia dei tagli direzionati come metodo di mitigazione dei danni causati dall'epidemia di bostrico che sta attaccando i boschi del Trentino.

In letteratura esistono risultati in supporto al concetto per il quale in un cantiere forestale il rilascio a terra di piante intere abbattute può, nel breve periodo, mantenere se non addirittura aumentare l'effetto di protezione dalla caduta massi del versante. Questo rilascio, quindi, è da preferire rispetto alla rimozione totale delle piante (cosiddetto *salvage logging*), soprattutto se l'obiettivo del cantiere non è solo quello di prelevare legname da opera, ma anche quello di conservare la capacità di protezione della foresta.

Lo studio di due cantieri forestali in Trentino mira proprio a verificare, tramite delle simulazioni virtuali, gli effetti dei tagli direzionati su tale capacità di protezione, rilasciando a terra una quantità del 20% sul totale delle piante assegnate al taglio. Questa quantità, nel primo caso, corrisponde a circa 48 piante per ettaro e un volume di 59 m³/ha, nel secondo caso invece 35 piante per ettaro e un volume di circa 51 m³/ha. Si vuole precisare che il volume rilasciato in entrambi i cantieri forestali, studiati in questo lavoro, vengono intesi in termini di piante intere, da sommarsi quindi al volume che rimarrebbe comunque in bosco successivamente alle utilizzazioni (ceppaie e residui di utilizzazione).

5. MATERIALI E METODI

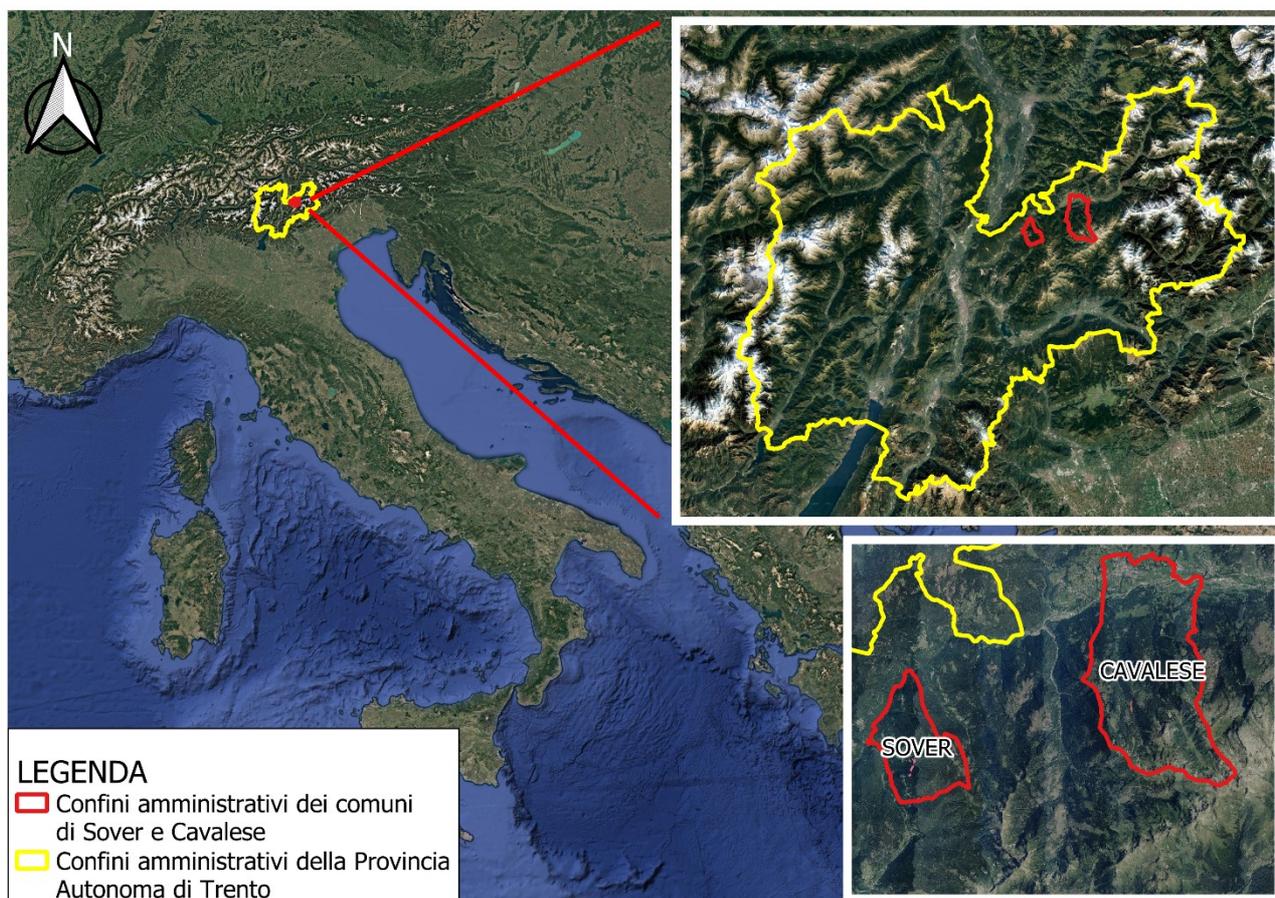


Figura 9: inquadramento dei Comuni di Sover e Cavalese, dove insistono i cantieri forestali studiati

5.1. Caratterizzazione delle aree studiate

Le aree studiate e confrontate coincidono, dunque, con due diversi cantieri forestali entrambi posizionati all'interno del territorio della Provincia Autonoma di Trento e più precisamente nella sua parte orientale, nel comparto montano della Catena del Lagorai, versante Nord. Il primo, sito a monte dell'abitato della frazione Montesover del comune di Sover in valle di Cembra; il secondo presso il Comune di Cavalese in Valle di Fiemme, sito nella trasversale Val Moena. Il cantiere di Montesover è stato progettato e successivamente seguito nelle varie fasi dal personale dell'Ufficio Distrettuale Forestale di Trento, mentre quello di Cavalese dal personale della Magnifica Comunità di Fiemme.

5.1.1. Il Cantiere di Montesover

Come precedentemente anticipato, il primo cantiere forestale preso in esame è quello sito a Montesover, località dell'alta valle di Cembra in sinistra orografica del torrente Avisio, confinante a Nord-Est con il territorio del comune di Valfloriana e a Sud-Est con il comune di Bedollo sull'altipiano di Pinè, e il comune di Segonzano. Il cantiere orograficamente si trova sul piano montano, trovandosi a quote comprese tra i 1100 m e i 1400 m s.l.m., su di una propaggine a matrice porfirica del gruppo montuoso del Lagorai, avendo alle spalle le cime dei Dossi, Venera, Cimati, Locca e Camoré.

L'area ricompresa nel cantiere forestale è costituita dal versante delimitato a valle, verso ovest, dalla strada provinciale SP 252 di Montesover; a monte, verso est, dalla strada forestale denominata "Mandre-Fratole"; a sud dall'impluvio del Rio Molino e a nord dal rio Sorgente Ventola. Il versante è molto inclinato, con pendenze medie comprese tra il 35 e il 50% e, in alcuni tratti, anche superiori. Il substrato, la cui roccia madre come anticipato è composta da formazioni silicee, principalmente rioliti, presenta affioramenti di clasti sciolti le cui dimensioni sono dell'ordine di alcune decine di centimetri. In alcuni punti si rilevano anche pareti di modesta altezza formate da rocce fessurate.

Le particelle forestali coinvolte sono la numero 12, 19, 20, 21, 52, 53, 54, 55 e 56, tutte appartenenti alla compresa A "Abietine e peccete secondarie del piano montano" del Piano di Gestione Forestale Aziendale del Comune di Sover (PGFA n.54). Il tipo forestale, costante su tutte le particelle, è infatti la pecceta secondaria a netta dominanza di abete rosso, con la sporadica partecipazione di larice e abete bianco, così come la struttura che appare ovunque coetaneiforme. È presente abbondante rinnovazione naturale in corrispondenza di aperture del piano dominante principalmente di abete rosso e faggio, la quale però, successivamente alla fine dei lavori di esbosco, potrebbe incontrare difficoltà nella colonizzazione delle aree coinvolte a causa del possibile aumento delle condizioni di xericità che si potrebbero creare, favorite, tra l'altro, dall'abbondante irraggiamento solare meridiano della zona. Il soprassuolo che popola questo versante è inoltre più vocato alla funzione protettiva piuttosto che produttiva, essendo classificato nel piano di gestione forestale aziendale come "Bosco di protezione da valanghe" e "Bosco di protezione da caduta massi".

Per quanto riguarda quest'ultima funzione, il popolamento oggetto di utilizzazione risulta, più precisamente, essere di protezione diretta con scenario frequente (tempo di

ritorno 30 anni), proprio in quanto lo stesso insiste a monte di una strada pubblica di interesse provinciale, come si evince in Figura 10 (appena a valle della linea gialla).

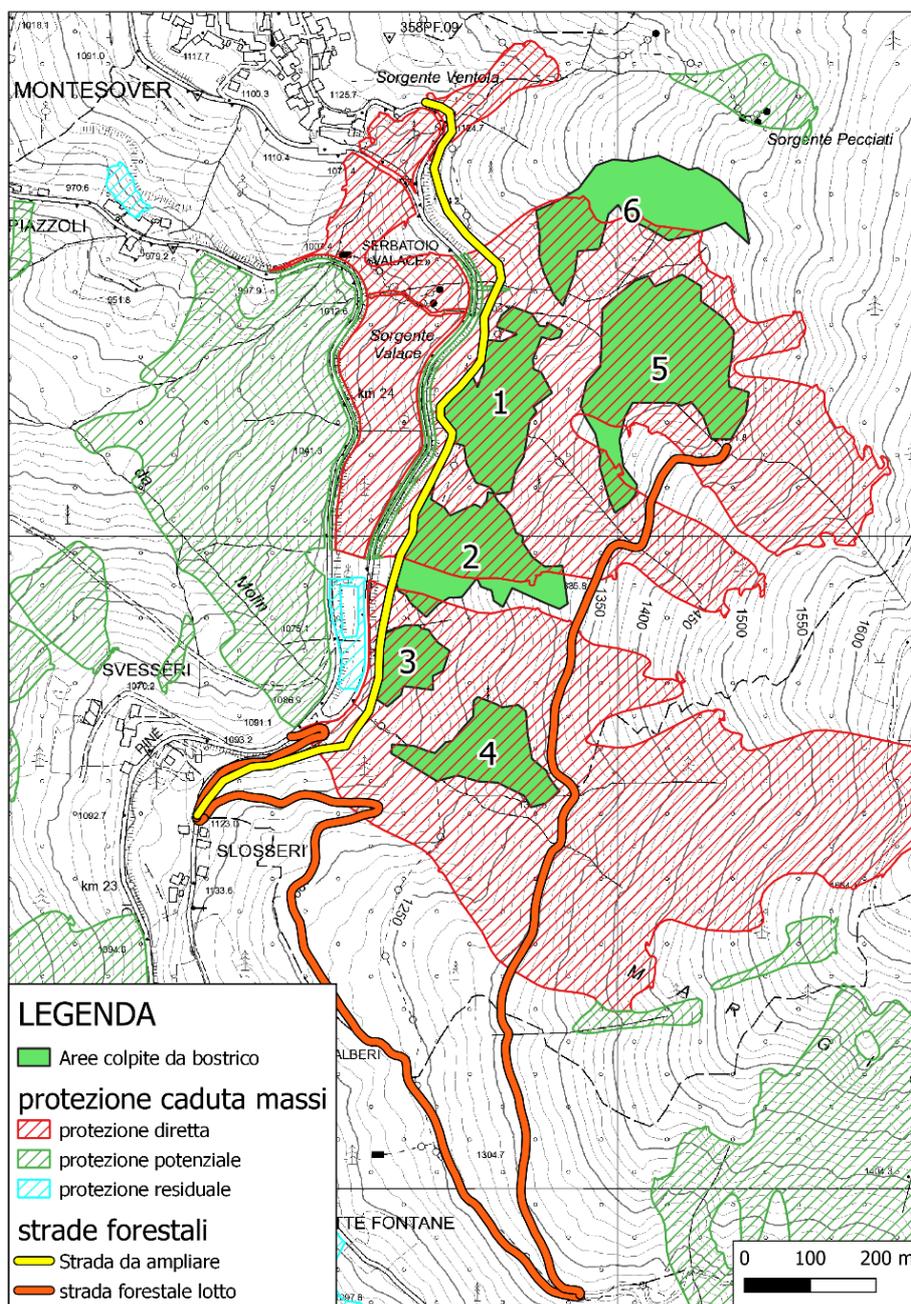


Figura 10: inquadramento del cantiere forestale di Montesover

L'intervento selvicolturale, in seguito all'epidemia di *Ips typographus*, mira all'utilizzazione delle piante morte in piedi e, primariamente, al mantenimento della funzione protettiva del bosco. Esso si cala, infatti, nell'ambito della delibera della giunta provinciale n.1303/2023 la quale prevede premi ad ettaro - appartenenti al fondo messo a disposizione

dallo Stato italiano con Legge 234 del 30/12/2022 - per mitigare gli effetti negativi di tale epidemia, nel rispetto di specifiche prescrizioni. Il cantiere, essendo appunto ubicato direttamente a monte della strada provinciale, in sede di progettazione è stato strettamente vincolato per quanto riguarda l'asportazione delle piante ai fini della mitigazione del rischio di caduta massi: alcune prescrizioni sono infatti il rilascio di almeno il 20% delle piante a terra, direzionate perpendicolarmente alla massima pendenza e il taglio delle ceppaie ad un'altezza di 0.80-1.00 m misurato a monte (T.Col.F. A. dott. Darra, 2023).

La superficie coinvolta dall'attacco del bostrico è di circa 17.6 ettari, divisi in 6 aree distinte (in verde in Figura 10) distribuite sul versante configurando il tipico attacco "a macchia di leopardo" dell'insetto scolitide, ma con danni in linea con lo stato epidemico in cui si trova, ovvero circa 5000 metri cubi tariffari totali.

Il cantiere è servito da viabilità forestale: una pista di esbosco (evidenziata in giallo in Fig.10) a valle delle aree 1, 2 e 3, e la strada forestale denominata "Mandre" (evidenziata in arancione in Fig.10) a monte delle aree 2, 4 e 5.

Durante i lavori, è stata prevista la messa in opera temporanea sulla pista di esbosco di reti ancorate alle piante o, in alternativa, l'accatastamento di tronchi sovrapposti a formare una barriera per la difesa della sottostante strada provinciale dal probabile rotolamento di massi movimentati dalle operazioni di utilizzazione. Queste ultime sono state eseguite tramite gru a cavo.

5.1.2. Il cantiere di Malga Caore

Il secondo cantiere forestale preso in esame, contrariamente al primo, non si trova direttamente sopra viabilità importante o centri abitati. Esso è ubicato presso la località "Malga Caore" in Val Moena, una piccola valle trasversale rispetto alla principale Valle di Fiemme, ai piedi del versante sud-ovest del monte "Cimon del To della Trappola" (Cermis), che culmina con la cima delle Stellune. Il cantiere, dunque, si trova in un comparto montano prettamente boscato, non stabilmente abitato, con funzione produttiva: è infatti ben servito da viabilità forestale a valle, lungo tutto il suo sviluppo, come si può notare in Figura 11 evidenziata dalla linea verde.

Tuttavia, la zona è frequentata non solo dagli addetti ai lavori di utilizzazione: qui sono presenti alcune baite e malghe di proprietà o affittate.

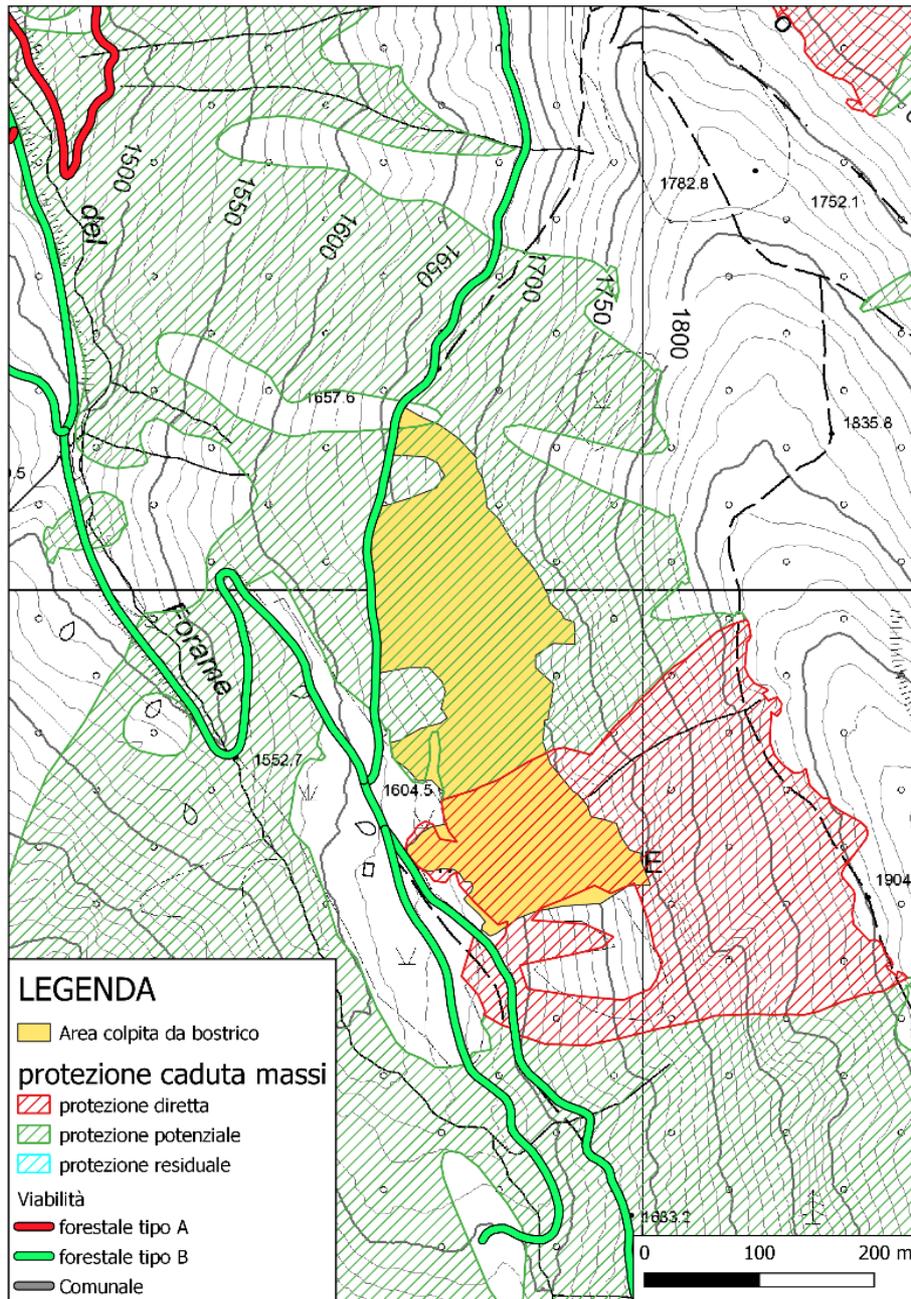


Figura 11: inquadramento del cantiere forestale di Malga Caore

Proprio per la presenza della struttura abitabile di Malga Caore direttamente a valle dell'area a cantiere, è stato deciso di attivare le stesse misure di mitigazione adottate per Montesover. Trovandosi su catasto di Cavalese ma di proprietà della Magnifica Comunità di Fiemme, anche questa amministrazione ha progettato l'intervento adottando alcuni accorgimenti nell'ottica di richiedere i premi previsti per le opere e interventi di mitigazione degli effetti negativi dell'epidemia di *Ips typographus* messi a disposizione dalla PAT.

L'area, situata ad una altitudine maggiore rispetto al precedente, ovvero tra i 1600 e i 1750 m s.l.m., è in parte classificata come bosco di protezione diretta contro la caduta massi trovandosi direttamente a valle di una falesia di circa 15 m di altezza interessata da potenziali crolli; la restante parte sinistra, caratterizzata da pendenze minori, è identificata come di protezione potenziale. La roccia di cui è formata la falesia è la stessa trovata sul cantiere precedente e, in generale, quella presente in tutta la zona del Lagorai e le relative propaggini: il porfido che degrada in massi con forma di parallelepipedo. A valle della falesia, nell'estrema parte destra del cantiere, è presente una pietraia con massi di dimensioni medie dell'ordine dei quaranta centimetri. Spostandosi verso sinistra nel cantiere, essa lascia il posto a suolo più strutturato con uno strato organico ben formato e per la maggior parte coperto da vegetazione erbacea (*Calamagrostis villosa*, *Galeopsis speciosa*, *Rubus spp.*, *Sambucus nigra e racemoso*, ecc.); le dimensioni dei massi visibili diminuisce. È presente anche un nucleo di rinnovazione di abete rosso nella parte sinistra, verso valle, la cui altezza media si aggira attorno a 1,5 m. A monte della falesia, il bosco ancora in piedi risulta morto a causa del bostrico.

Il bosco è costituito da una pecceta subalpina pura allo stadio maturo, colpito dalla pullulazione di bostrico per una superficie di circa 5,3 ettari, per un volume tariffario stimato di 1346 m³. Essa interessa le particelle forestali nr. 20 e 21 del Piano di Gestione Forestale Aziendale della Magnifica Comunità di Fiemme (PGFA n.425). L'intervento, da progetto di taglio, prevede il taglio raso su tutta la superficie effettuando il taglio direzionato delle piante per circa il 20% di quelle assegnate e il rilascio di tutte le ceppaie tagliate all'incirca tra i 1,5 e i 2,0 metri di altezza dal suolo. Tuttavia, il rilascio delle piante a terra non è uniforme su tutta la superficie: l'approccio scelto, infatti, prevede di rilasciare una maggiore quantità di piante nella parte vicina alla zona di crollo (zona evidenziata in rosso in Fig. 11), diminuendo poi progressivamente il rilascio nella restante parte (Ilario dott. Cavada, 2023 a-c). Infine, è previsto il rimboschimento del solo sito a protezione diretta – il quale consta di circa 1,78 ha - con almeno 2000 piantine per ettaro. Esso verrà eseguito piantando, tutto attorno alle ceppaie, per collettivi piantine delle specie di *Larix decidua* per il 50%, *Picea abies* per il 40% e latifoglie alpine come *Sorbus aucuparia*, *Acer pseudoplatanus* e *Betula pendula* per la restante parte (Ilario dott. Cavada, 2023 b).

5.2. I software utilizzati

Per l'elaborazione dei dati raccolti in campo sono stati utilizzati tre principali programmi: Qgis, SAGA Gis e Rockyfor3D. L'impiego dei primi due ha avuto sostanzialmente lo scopo di effettuare una prima elaborazione cartografica per l'inquadramento delle due aree di studio, per preparare i file di input e per visualizzare i *raster* di output del terzo. Grazie a quest'ultimo è stato possibile svolgere l'elaborazione principale dei dati, effettuando le simulazioni di caduta massi.

RockyforD è un software che calcola e simula la traiettoria di caduta massi nelle tre dimensioni, appunto, sia a scala regionale, sia di versante che quella locale. Il modello su cui si basa combina algoritmi deterministici con approcci stocastici: pur basandosi su processi fisici per la descrizione della caduta massi, a causa delle incertezze connesse alla determinazione dei vari parametri, questi vengono definiti in maniera probabilistica, facendoli variare entro un intervallo di valori plausibili (Dorren & Simoni, 2014). In sintesi, il software simula la traiettoria di caduta dei massi con un vettore che memorizza i valori tridimensionali di posizione e velocità degli stessi, attraverso il calcolo di una sequenza di cadute libere dei sassi, descritte dalla legge di moto parabolico e di rimbalzi sulla superficie del pendio nonché urti contro alberi, che interessa appunto questo lavoro di tesi.

I dati di ingresso minimi richiesti dal programma consistono in un set di dieci file di tipo *raster* ASCII in formato ESRI (in modo tale da essere leggibili da tutti gli editor di testo) che definiscono la topografia e le caratteristiche della superficie del pendio (ovvero, sostanzialmente, la rscabrezza del terreno) e alcuni parametri che definiscono le condizioni di distacco. Essi devono, tuttavia, essere coerenti e rappresentativi della realtà studiata, accurati abbastanza da poterli confrontare con la scala di analisi utilizzata per lo studio che può essere, per esempio, quello del pericolo caduta massi a scala regionale o a scala comunale, oppure lo studio di dettaglio per un singolo versante.

5.2.1. I dati richiesti dal software Rockyfor3D

Come anticipato precedentemente, i dati di input minimi per il software Rockyfor3D consistono in dieci mappe *raster*, le quali devono avere stessa dimensione e risoluzione. Al diminuire della risoluzione (quindi dimensioni più ampie delle celle) corrisponde una

diminuzione sia della precisione spaziale delle mappe sia dell'accuratezza delle dinamiche cinematiche simulate.

Perciò, il manuale consiglia di scegliere una risoluzione compresa tra 2 m x 2 m e 10 m x 10 m (Dorren & Simoni, 2014): in questo lavoro di tesi è stata scelta la risoluzione 2x2. Poichè con questo *dataset* l'area studiata viene considerata "nuda", ovvero senza una copertura forestale, gli ostacoli che un masso può incontrare nelle simulazioni effettuate con questi dati sono sostanzialmente altri massi o tronchi abbattuti: in sintesi, solamente ciò che è appoggiato al suolo.

Di seguito viene riportata la tabella riassuntiva dei dieci *raster* richiesti.

Tabella 4: dieci raster minimi richiesti dal software Rockyfor3D (Dorren & Simoni, 2014)

Numero	Raster	Descrizione
1	dem.asc	Modello digitale del terreno (DEM). La mappa descrive la topografia del terreno; a partire da questa si possono derivare le pendenze e l'esposizione del versante studiato.
2	rockdensity.asc	Questa mappa descrive la densità dei massi in ogni cella sorgente, ovvero il punto dal quale può potenzialmente avvenire il distacco dei massi. Le celle con valore 0 non saranno considerate sorgente, mentre quelle con valore uguale alla densità (kg.m^{-3}) della roccia che caratterizza il sito studiato sì.
3	d1.asc	Queste tre mappe definiscono, per ogni cella, le dimensioni dei massi: altezza, larghezza e lunghezza espressi in metri. Se il valore di dimensione definito in una delle tre celle raster equivale a 0, quella cella non sarà considerata sorgente. Prima di ogni simulazione, i parametri dimensionali verranno variati, in egual modo per tutti e tre, in modo casuale secondo una predefinita percentuale. In questo modo si avrà una variazione random del volume del masso entro la percentuale scelta.
4	d2.asc	
5	d3.asc	
6	blshape.asc	Mappa raster che definisce per ogni cella sorgente la forma del blocco in caduta. I valori possono variare da 0 a 4: <ul style="list-style-type: none"> - 0: blocco senza forma/assenza di celle sorgenti definite; - 1: parallelepipedo; - 2: ellissoidale; - 3: sferico; - 4: discoidale (il diametro minore è massimo 1/3 degli altri due, che invece sono confrontabili in termini di grandezza).

7	rg70.asc	Queste tre mappe raster rappresentano la scabrezza (rugosità) del versante. Ciò non va inteso come la micro-topografia, come per esempio salti di roccia, ma gli ostacoli posti sul terreno alla traiettoria del masso in caduta. Tale dato è espresso in termini probabilistici: le tre mappe descrivono la probabilità che un masso ha di incontrare un ostacolo di una certa altezza lungo il suo percorso nel 70%, 20% e 10% dei casi. Varia tra 0 e 100 m.
8	rg20.asc	
9	rg10.asc	
10	soiltype.asc	<p>Questa mappa definisce la tipologia del suolo, con valori compresi tra 0 e 7. Viene qui rappresentata l'elasticità del terreno e deve essere mappata in campo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 0: fiume o palude, materiale in cui in masso può sprofondare completamente. R_n medio = 0; - 1: materiale fine con spessore >100cm. R_n medio = 0,23; - 2: materiale fine con spessore <100cm oppure sabbia/ghiaia mista. R_n medio = 0,28; - 3: detrito di falda (diametro <10cm), suolo compatto medio con piccoli massi; strade forestali. R_n medio = 0,33; - 4: detrito di versante (diametro >10cm), o suolo compatto con grandi massi. R_n medio = 0,38; - 5: substrato roccioso con materiale fine di degradazione meteorica. R_n medio = 0,43; - 6: substrato roccioso. R_n medio = 0,53; - 7: strade asfaltate. R_n medio = 0,35. <p>Nel modello, ogni tipo di suolo è collegato ad un valore di R_n, ovvero il coefficiente di riduzione normale.</p>

Il programma inoltre premette di effettuare degli studi sul fenomeno della caduta massi non solo sul suolo nudo ma anche con la presenza di copertura arborea effettuando quindi delle simulazioni con foresta. In questo caso il software permette di scegliere tra due opzioni. La prima prevede di raccogliere in campo le coordinate di ogni singolo albero e il relativo diametro del fusto preso ad un'altezza da terra pari a 1.30 m (a petto d'uomo). La seconda invece, quella scelta per questo studio, prevede di rappresentare la vegetazione utilizzando ulteriori quattro mappe *raster*:

Tabella 5: quattro ulteriori raster richiesti per le simulazioni con foresta (Dorren & Simoni, 2014)

Numero	Raster	Descrizione
11	nrtrees.asc	I valori delle celle rappresentano il numero di alberi per ettaro (valori da 0 a 10.000 ha ⁻¹)
12	dbhmean.asc	I valori delle celle rappresentano il diametro medio (valori da 0 a 250 cm)
13	dbhstd.asc	I valori delle celle indicano la deviazione standard del diametro medio (valori da 0 a 250 cm)
14	conif_percent.asc	I valori delle celle indicano la percentuale media di alberi di conifere.

Il vantaggio della seconda opzione è che questa meglio rappresenta la situazione attuale del bosco, andando a considerare anche quelle piante con diametro minore e non facenti parte del piano dominante della foresta che, tramite *laserscan*, non verrebbero rilevate. In questo modo, dal momento che gli strati dominati della vegetazione forestale sono costituiti da numerosi diametri di piccole dimensioni, la loro funzione di protezione va ad aggiungersi a quella offerta dal piano dominante, altrimenti non considerata.

Sulla base di questi quattro file *raster*, il modello assegna all'interno di ogni pixel (o cella) in modo casuale un dato numero di alberi aventi un certo diametro. L'assegno del diametro misurato a petto d'uomo è basato su una distribuzione "Gamma", definita dal valore medio e dalla deviazione standard in ogni cella. Anche in questo caso vale la regola che ogni file deve necessariamente avere la stessa dimensione e la stessa risoluzione del *raster* DEM.

Sono stati aggiunti infine tre *raster* che rappresentano delle reti paramassi virtuali poste in punti strategici scelti da chi effettua le simulazioni: esse fungono da "*checkpoint*" per i risultati delle simulazioni.

Attraverso le modalità di seguito descritte, i dati sono stati raccolti con lo scopo di effettuare 1000 simulazioni in Rockyfor3D per ogni scenario di seguito riportato:

- Senza foresta (suolo nudo, scenario di riferimento) – abbreviato **NF**;
- Con foresta intatta – abbreviato **F**;
- Con foresta e aree colpite dal bostrico nude, simulando l'esbosco totale del legname (*salvage logging*) – abbreviato **FNM**;
- Con foresta e aree colpite da bostrico sulle quali sono state rilasciate piante a terra, considerando l'effetto dei tagli direzionati – abbreviato **FM**.

5.3. Campionamento dei dati in campo

Per la raccolta dei dati in campo, sono state preventivamente eseguite 200 simulazioni in RockyFor 3D nello scenario senza foresta con l'intento di individuare le zone già interessate da un'alta probabilità di caduta massi.

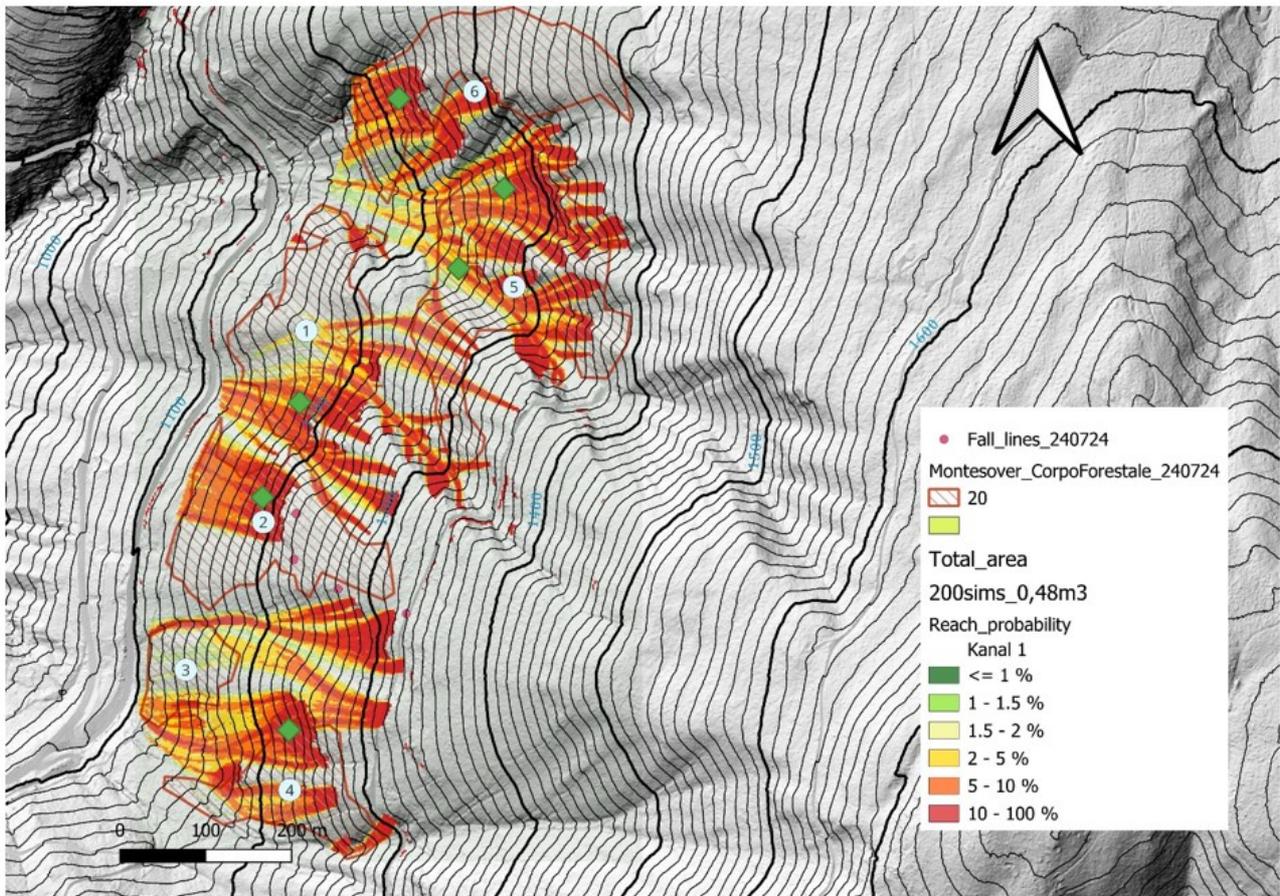


Figura 12: 200 simulazioni sul cantiere di Montesover con $RG_{70} = 0.05$; $RG_{20} = 0.08$; $RG_{10} = 0.1$; assenza di foresta. Lo stesso è stato fatto per entrambe le aree di studio. (Paul Richter, 2024)

Da qui, il software ha restituito delle mappe con colorazioni diverse, come riportato in Figura 12, a seconda della maggiore o minore probabilità di caduta massi: lì dove la probabilità risultava maggiore, sono stati individuati a tavolino i transetti da percorrere.

Una volta in campo, se nella zona prescelta le condizioni del versante e le caratteristiche del cantiere assicuravano un livello di sicurezza adeguato all'operatore, venivano percorsi i transetti da monte verso valle simulando la possibile traiettoria di un masso in caduta, raccogliendo i dati in più aree campione (di norma 3 o 4) con proprietà omogenee e di ampiezza 3 m x 3 m. All'interno di ognuna di loro venivano raccolti i valori

richiesti per ogni *raster* illustrato precedentemente, compilando la seguente scheda di campo:

Tabella 6: scheda di campo per la raccolta dei dati fornita dal manuale del software Rockyfor3D

Caratteristiche del poligono								
1. Caratteristiche del blocco (depositato nel poligono o potenzialmente caduta dalla zona di stacco)								
Forma del Blocco	<input type="checkbox"/> 1. blocco parallelepipedo	<input type="checkbox"/> 2. blocco ellissoidale	<input type="checkbox"/> 3. blocco sferico	<input type="checkbox"/> 4. blocco discoidale				
Dimensioni del blocco (d1, d2, d3): (m) x (m) x (m)								
Densità (kg.m ⁻³):								
2. Tipo di suolo								
Suolo	<input type="checkbox"/> Fiume; palude; materiale in cui un masso potrebbe penetrare completamente	<input type="checkbox"/> Materiale fine (spessore > ~100 cm)	<input type="checkbox"/> Materiale fine (spessore < ~100 cm) / sabbia/ghiaia a mista	<input type="checkbox"/> Detrito di falda (Ø < ~10 cm); suolo compatto medio con piccoli massi; strade forestali	<input type="checkbox"/> Detrito di versante (Ø > ~10 cm); o suolo compatto con grandi massi	<input type="checkbox"/> Substrato roccioso con materiale fine di degradazione meteorica	<input type="checkbox"/> Substrato roccioso	<input type="checkbox"/> Strade asfaltate
(soiltype) Valori per Rockyfor3D	0	1	2	3	4	5	6	7
3. Scabrezza della superficie inclinata								
MOH: altezza di un ostacolo (MOH) rappresentativa per il 70%, 20% e 10% della superficie senza una zona omogenea sul pendio. Il parametro deve essere misurato guardando il pendio verso valle, nella direzione di discesa del masso.				MOH 70% della superficie (rg70)		0 - 100 (m)		
				MOH 20% della superficie (rg20)		0 - 100 (m)		
				MOH 10% della superficie (rg10)		0 - 100 (m)		
Lying tree stems*	Altezza media=			m		Area covered =		%

La stessa scheda di campo veniva compilata due volte per ogni area campione: una volta per la raccolta dei dati nello scenario “senza foresta”, considerando quindi il suolo nudo; una seconda volta nello scenario “con i tagli direzionati”, considerando la presenza del materiale legnoso a terra.

I dati relativi alla scabrezza del terreno, che come già anticipato rappresentano la dimensione del materiale che ricopre il pendio (da non confondere con la micro-topografia) sono stati raccolti percorrendo il pendio da monte verso valle lungo la direzione di caduta di un ipotetico masso. In particolare, nello scenario senza foresta, il dato veniva raccolto misurando l'altezza da terra, presa a monte, dei massi presenti al suolo; mentre nello scenario con i tagli direzionati il dato veniva raccolto misurando l'altezza da terra a monte dei tronchi direzionati e delle ceppaie, se presenti all'interno dell'area campione.

Per alcune specifiche aree, come le strade forestali e grandi superfici rocciose, sono stati assegnati valori di scabrezza (RG10, RG20 e RG70) uguali a zero, in modo tale da ottenere dei file *raster* diversificati e rappresentativi del versante reale.

I dati relativi allo scenario “con foresta” utili alla creazione dei quattro *raster* in Tabella 5, sono stati invece estrapolati dai progetti di taglio redatti per ogni cantiere rispettivamente dall’Ufficio Distrettuale Forestale di Trento e dalla magnifica Comunità di Fiemme. Sia a Montesover che a Malga Caore, infatti, è stato eseguito il cavallettamento totale delle piante colpite da bostrico. Disponendo quindi del numero di piante per ogni classe diametrica per ogni particella forestale e della superficie in ettari coinvolta nei rispettivi cantieri, si è potuto calcolare il diametro medio, il numero di piante per ettaro, la percentuale di conifere ed infine la deviazione standard del diametro medio. Per spalmare i quattro dati su tutta la superficie del *raster*, che fino a questo passaggio erano riferiti ad ogni singola particella forestale, si è proceduto a calcolare una media matematica dei dati relativi al diametro medio e al numero di piante per ettaro delle nove particelle forestali coinvolte nel cantiere di Montesover e delle due del cantiere di Malga Caore, in quanto non differivano di molto tra una particella e l’altra. Il dato della percentuale di conifere, invece, è risultato essere sempre del 100% quindi non lo si è elaborato ulteriormente.

5.4. Elaborazione dei *raster* di output di Rockyfor3D

Una volta creati i *raster* di input sono state lanciate le simulazioni inserendo come ultimo parametro le dimensioni dei massi in caduta: 1,00 m x 0,5 m x 0,5 m sia per il cantiere di Montesover che per il cantiere di Malga Caore, con una variazione del dato del + o – 10% che il programma applica in modo casuale durante la simulazione. La scelta di tali dimensioni ha motivazioni per lo più prudenziali: analizzando i massi rinvenuti all’interno dei due cantieri forestali (Tabelle 9 e 14) e considerando che nella caduta essi possono essersi scomposti in frammenti più piccoli, si è optato per una misura che sottendesse quelle rilevate effettivamente in campo.

A seguito del processo, il programma restituisce una serie di *raster*, riassunti nella seguente Tabella 7, i cui dati vengono forniti per ogni rete virtuale (*checkpoint*) e per ogni scenario:

Tabella 7: Raster di output del software Rockyfor3D

1	E_mean.asc: media dei massimi valori di energia cinetica (di rotazione e di transizione) di tutti i blocchi simulati in quella cella [kJ]
2	E_95.asc: il 95 percentile di energia cinetica registrati in ogni cella [kJ]
3	Ph_mean.asc: media della massima altezza di passaggio (misurata in metri nella direzione normale alla pendenza della superficie) di tutti i blocchi che passano attraverso quella cella. [m]
4	Ph_95.asc: il 95 percentile di altezza di passaggio del blocco registrata in ogni cella. [m]
5	Nr_passages.asc: numero di blocchi passata in ogni cella. [-]
6	Nr_sourcecells.asc: numero di celle sorgenti che alimentano una data cella. [-]
7	Reach_probability.asc: mappa che mostra la probabilità che un blocco arrivi in una data cella. (Nr_passages*100)/(Nr_sourcecells*Nr_simulations_per_source_cell) [%]
8	Nr_deposited.asc: numero di blocchi depositati in ogni cella. Interessante per delineare le zone di arresto. [-]
9	Rvol_deposit.asc: massimo volume del blocco depositato per ogni cella. [m3]
10	Traj_time.asc: tempo minimo necessario per raggiungere una cella da quella sorgente. [s]
11	Tree_impact_heights.asc: Altezza massima di impatto sull'albero per cella. [m]
12	Nr_tree_impacts.asc: numero di impatti su di un albero per cella. [-]
13	V_max.asc: velocità massima simulate in valore assoluto per cella. (m/s)
14	EL_angles.asc: angoli minimi sottesi dalla linea dell'energia ricalcolata per cella. [°]

In seguito, i *raster* sono stati inseriti nel software Qgis per delle analisi grafiche visive, sovrapponendoli a ortofoto e DEM, grazie alle quali si possono apprezzare gli effetti dei quattro diversi scenari sulla caduta dei massi.

Inoltre, per quantificare e confrontare l'effetto di protezione (*Protection Effect PE*) contro la caduta massi degli scenari Foresta **F**, Foresta senza tagli direzionati **FNM** e Foresta con tagli direzionati **FM** sono stati calcolati degli indicatori definiti da Dupire et al. (2016 a), di seguito riportati in Equazioni 1, 2 e 3, tenendo lo scenario senza foresta **NF** (suolo nudo) come riferimento.

Assumendo che le foreste si comportano come barriere naturali contro la caduta massi e che gli alberi contribuiscono a fermarne il transito lungo un pendio, è stato definito, appunto, l'effetto barriera ("*BARrier effect Index*", quantificato con la seguente formula:

$$BARI(x) = 100 x \left(1 - \frac{Nrock_{forest}(x)}{Nrock_{NOforest}(x)} \right) \quad (1)$$

L'effetto barriera di una foresta su un versante di x metri di lunghezza, lungo la sua massima pendenza, è dato dal numero di massi che passano attraverso un dato *checkpoint* in uno degli scenari scelti ($NRock_{forest}(x)$) diviso il numero di massi che passano dallo stesso *checkpoint* nello scenario di riferimento senza foresta (ovvero suolo nudo $NRock_{NOforest}(x)$). $BARI(x)$ è quindi un indicatore di riduzione della frequenza del pericolo di caduta massi in quanto fornisce direttamente la percentuale di rocce fermate a causa della presenza di bosco su x metri lungo la direzione della massima pendenza.

Un secondo indicatore è stato utilizzato per definire la riduzione dell'intensità massima della caduta massi lungo un versante boscato di x metri di lunghezza, in direzione della massima pendenza ("*Maximum Intensity Reduction Index*"):

$$MIRI(x) = 100 x \left(1 - \frac{E95_{forest}(x)}{E95_{NOforest}(x)} \right) \quad (2)$$

Questo indice è definito dal novantacinquesimo percentile dell'energia cinetica di tutti i massi che sono passati da un dato *checkpoint* ottenuto dalla simulazione in uno dei tre scenari ($E95_{forest}(x)$), diviso per la stessa quantità ottenuta dallo scenario di riferimento senza foresta ($E95_{NOforest}(x)$).

Il terzo indicatore integra sia la percentuale di rocce fermate sia la riduzione energetica totale delle stesse dovuta alla presenza di foresta. Esso prende il nome di "protezione globale contro la caduta massi" ("*Overall Rockfall Protection Index*") e viene calcolato con la seguente formula:

$$ORPI(x) = 100 x \left(1 - \frac{E_{tot_{forest}}(x)}{E_{tot_{NOforest}}(x)} \right) \quad (3)$$

L'ORPI di un versante boscato di x metri di lunghezza viene calcolato dividendo l'energia totale di tutti i massi che passano da un determinato *checkpoint* in uno dei tre scenari con foresta $E_{tot_{forest}}(x)$ per la stessa quantità nello scenario senza foresta $E_{tot_{NOforest}}(x)$.

I tre indicatori (Eq. 1, 2 e 3) hanno un range di valori da 0 (nessun effetto protettivo) a 100 (alto effetto protettivo) e sono successivamente stati messi a confronto per

determinare l'efficacia dei tagli direzionati contro la caduta massi, in entrambi i cantieri forestali.

Per dare, infine, un giudizio di capacità di protezione dalla caduta massi (*Protection Effect* citato in precedenza) ai tre scenari studiati, è stata adottata la classificazione proposta da Dupire (2016, b), la quale prevede tre classi di efficacia:

- A valori di ORPI maggiori o uguali a 90, viene assegnata ALTO *PE*;
- A valori di ORPI compresi tra 50 e 90, viene assegnata MEDIO *PE*;
- A valori di ORPI inferiori o uguali a 50, viene assegnata BASSO *PE*.

6. RISULTATI E DISCUSSIONE

6.1. Dati utilizzati per Montesover e risultati

Come anticipato, il cantiere di Montesover è costituito da sei aree attaccate dal coleottero scoltide *Ips typographus* (si veda Fig. 10): la raccolta dei dati è avvenuta per transetti all'interno dei quali sono state individuate le aree campione. In seguito, se i dati raccolti non differivano di molto, è stata calcolata una media dei valori di Rg70, Rg20 e Rg10 da spalmare sull'intera area di cantiere; diversamente, se i dati non risultavano confrontabili, sono stati considerati entrambi e si è proceduto a inserirli all'interno dei *raster* dividendo l'area di cantiere coinvolta in "sotto-poligoni", come è stato fatto, per esempio, per l'area 4, divisa longitudinalmente in due parti (transetto destro e sinistro). I dati sono esposti nella sottostante Tabella 8.





Figura 13: foto da monte verso valle e da valle verso monte di aree diverse del cantiere di Montesover. Risulta evidente la copertura erbacea diffusa quasi ovunque. Sara Fait, luglio 2024.

Per quanto riguarda la densità del porfido, questa può variare a seconda dei tipi tra i 2400 a 2700 kg/m³. Per ottenere dei risultati prudenziali si è deciso di attribuire al porfido che caratterizza l'area di cantiere una densità di 2700 kg/m³, quindi il *raster* "rockdensity.asc" avrà questo valore nelle sole celle sorgente.

Per quanto riguarda invece la forma dei blocchi, raster "blshape.asc", essa è risultata essere il parallelepipedo in ogni area, in linea con la classica forma che acquisisce questa roccia quando degrada.

Tabella 8: dati raccolti presso il cantiere di Montesover

AREA 1	
Con tagli direzionati	Senza Foresta
1. Blocchi depositati di dimensioni 12x15x30 cm, 8x16x20 cm e 14x47x57 cm.	
2. Tipo di suolo 3	
3.	
Rg 70 = 0,03	Rg 70 = 0,01
Rg 20 = 0,05	Rg 20 = 0,03
Rg 10 = 0,27	Rg 10 = 0,10

AREA 2	
Con tagli direzionati	Senza Foresta
1. Due Blocchi depositati con dimensioni 10x15x28 cm, 15x20x35 cm	
2. Tipo di suolo 3	
3. Rg 70 = 0,01	Rg 70 = 0,01
Rg 20 = 0,06	Rg 20 = 0,05
Rg 10 = 0,35	Rg 10 = 0,10
AREA 4	
- Transetto destro	
Con tagli direzionati	Senza Foresta
1. Blocco depositato di dimensioni 10x12x18 cm.	
2. Tipo di suolo 3	
3. Rg 70 = 0,01	Rg 70 = 0,01
Rg 20 = 0,08	Rg 20 = 0,02
Rg 10 = 0,82	Rg 10 = 0,01
- Transetto sinistro	
Con tagli direzionati	Senza Foresta
1. Blocchi depositati di dimensioni: 30x35x56 cm, 13x17x30 cm	
2. Tipo di suolo 3	
3. Rg 70 = 0,02	Rg 70 = 0,01
Rg 20 = 0,20	Rg 20 = 0,02
Rg 10 = 1,02	Rg 10 = 0,05
AREA 5	
Con tagli direzionati	Senza Foresta
1. Nessun dato	
2. Tipo di suolo 3	
3. Rg 70 = 0,04	Rg 70 = 0,07
Rg 20 = 0,23	Rg 20 = 0,03
Rg 10 = 1,00	Rg 10 = 0,04
AREA 6	
Con tagli direzionati	Senza Foresta
1. Nessun dato	
2. Tipo di suolo 3	
3. Rg 70 = 0,08	Rg 70 = 0,07
Rg 20 = 0,19	Rg 20 = 0,19
Rg 10 = 0,90	Rg 10 = 0,05

AREA 1

Percorrendo il transetto si è notato che l'area, forse a causa della recente ultimazione delle utilizzazioni forestali, è caratterizzata da suolo molto sassoso sopra il quale, in modo discontinuo, insiste uno strato organico (orizzonte O) di circa 5-7 cm di spessore. Esso manca completamente lungo le linee di esbosco del legname. Anche la copertura erbacea è pressoché assente. Per le caratteristiche appena descritte, è stato possibile analizzare i diametri dei sassi che costituiscono il suolo in questa zona, osservandoli nella parte più a valle del transetto appena a monte della pista forestale:

- per il 70% sono dell'ordine dei 10 cm;
- per il 20% sono dell'ordine dei 40cm;
- per il 10% sono dell'ordine degli 80 cm.

AREA 2

Percorrendo i transetti è risultata evidente la copertura erbacea piuttosto diffusa su tutta l'area, costituita principalmente da *Rubus spp.*, *Calamagrostis villosa*, *Galeopsis speciosa*, *Solidago virgaurea* e *Solanum dulcamara*. Presente anche rinnovazione di abete rosso, in alcuni casi alta anche 0,70 m, in piccoli nuclei.

Interessante inoltre è stato notare, durante la risalita lungo il bosco integro a fianco di questa area di cantiere, che la maggior parte delle piante in piedi riportava, sul lato a monte del tronco, una lesione causata molto probabilmente da impatti con massi in caduta. Ne sono quindi state misurate le dimensioni su quelle piante che riportavano tali ferite, la cui altezza e larghezza in centimetri sono risultate rispettivamente: 56x41 – 73x21 – 100x34 – 60x27 – 16x13 ad un'altezza da terra di 55 cm.



Figura 14: ferita da impatto con massi su tronco di abete rosso, lato a monte. Sara Fait, Agosto 2024.

AREA 3

Quest'area, per la superficie di dimensioni ridotte così come la sua pendenza, non è stata campionata poiché ritenuta non importante per la difesa dalla caduta massi. Essa, comunque, si presentava molto simile alla precedente area, coperta nella sua totalità dalle stesse piante erbacee. Di conseguenza, per permettere al software Rockyfor3D di effettuare la simulazione, al poligono corrispondente sono stati assegnati gli stessi dati raccolti per l'area 2.

AREA 4

Per quest'area sono stati previsti due transetti, guardando da monte verso valle, uno nella parte destra dell'area e uno, più lungo, sulla sinistra. In seguito, durante l'elaborazione dei *raster* relativi alla scabrezza, sono stati creati due poligoni distinti dividendo l'area in senso longitudinale, nei quali infine sono stati inseriti i rispettivi dati (Tab.8).

La parte destra è caratterizzata dalla quasi assenza di piante direzionate, probabilmente a causa di un errore da parte della ditta utilizzatrice incaricata dei lavori. Anche in questa zona, il suolo è risultato coperto dalle stesse piante erbacee rinvenute in Area 2 e la scabrezza del terreno è sostanzialmente determinata dai residui di utilizzazione. Sono infine state rilevate le dimensioni di un masso fermato da una ceppaia: 10x30x60 cm.

La parte sinistra è risultata decisamente molto più pendente, con la presenza inoltre di due salti di roccia le cui altezze erano rispettivamente di uno e dodici metri. Per questo motivo il transetto non ha avuto andamento retto ma leggermente inclinato per poter evitare tali salti. Nella restante parte il suolo è risultato diffusamente coperto da piante erbacee e, dove queste mancano, costituito da rocce dell'ordine dei 10-15 cm, con una piccola percentuale di massi più grandi, circa 20-40 cm. Lungo la risalita attraverso il bosco integro a lato dell'area quattro, sono state misurate le dimensioni di un masso fermato in tempi non recenti: 45x45x80 cm, attorno al quale si poteva vedere l'accrescimento della pianta.

AREA 5 e 6

I dati relativi alle due seguenti aree sono stati forniti da Paul Richter. Queste due aree, per difficoltà di accesso e pendenze, sono risultate piuttosto pericolose da attraversare. Tuttavia, nell'ambito del suo progetto di dottorato, Paul è riuscito a raccogliere oltre ai dati necessari al suo studio, anche quelli di scabrezza utili al presente lavoro.

Durante questa fase di raccolta dati è evidente come il bosco di Montesover, considerandolo ancora integro, abbia una connotazione più che assodata di protezione dalla caduta massi. Oltre ai danni rinvenuti sul tronco, lato a monte, di diverse piante in piedi, ne sono inoltre prova i ventiquattro massi (Tab. 9) misurati lungo i transetti percorsi, i quali giacevano a monte di ceppaie alte lasciate dalle operazioni di utilizzazione, a monte di tronchi direzionati e a monte di piante ancora in piedi.



Figura 15: massi intercettati da piante in piedi nel bosco integro a fianco del cantiere di Montesover. Sara Fait, agosto 2024.

Di seguito si espone la distribuzione dei relativi diametri (altezza, lunghezza e profondità misurati in centimetri):

Tabella 9: dimensioni dei massi campionati a Montesover

Nr.	Altezza (cm)	Lunghezza (cm)	Profondità (cm)	Volume (cm ³)
1	16	25	28	11200
2	7	13	20	1820
3	10	30	60	18000
4	8	16	20	2560
5	15	17	30	7650
6	8	17	18	2448
7	5	20	40	4000
8	14	47	57	37506
9	8	20	24	3840
10	5	30	35	5250
11	12	20	30	7200
12	10	15	28	4200
13	4	8	12	384
14	36	84	100	302400
15	12	15	30	5400
16	15	20	35	10500
17	10	12	18	2160
18	30	35	56	58800
19	13	17	30	6630
20	45	45	80	162000
21	22	50	83	91300
22	7	20	30	4200
23	15	30	35	15750
24	10	15	3	4500

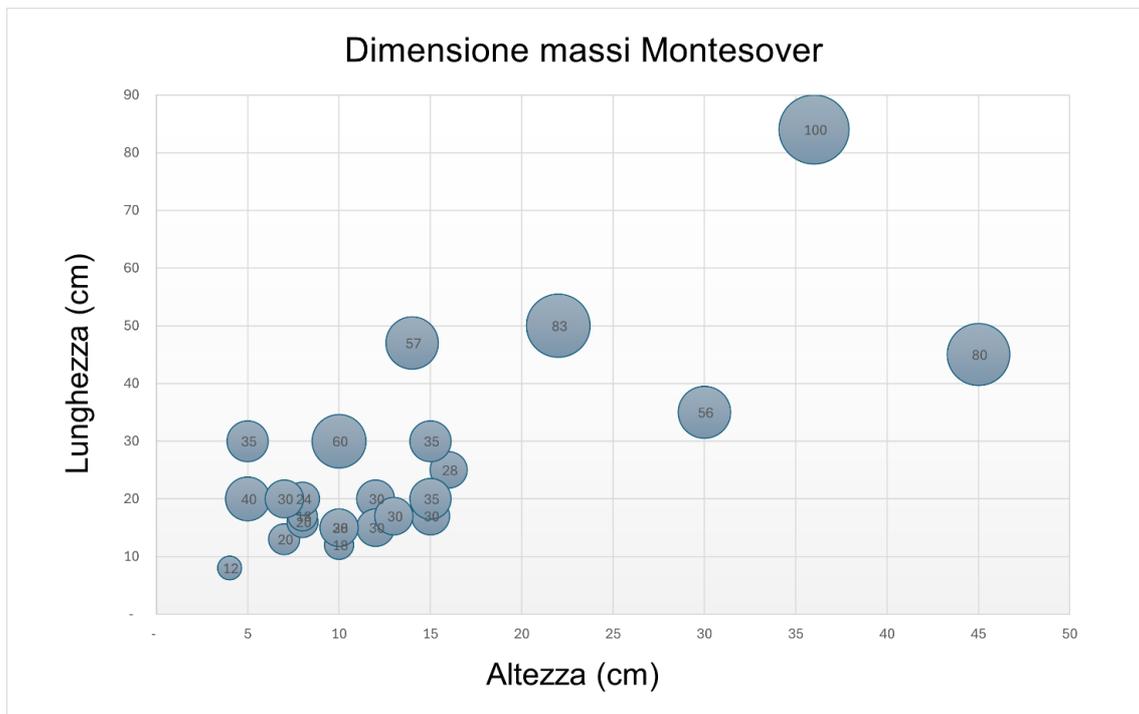


Figura 16: distribuzione delle dimensioni dei massi caduti e fermati all'interno del cantiere di Montesover. Le dimensioni delle bolle indicano la terza dimensione dei massi (profondità).

Inoltre, di seguito viene riportata una sintesi del numero di piante direzionate incontrate lungo i transetti percorsi:

Tabella 10: sintesi delle piante direzionate rilevate durante la raccolta dati presso Montesover

Area	Transetto	Nr. Piante direzionate	Diametro (cm)
1	Unico	9	30, 20, 27, 21, 32, 31, 20, 20, 20
2	Sinistro	8	25, 35, 15, 50, 15, 25
	Destro	10	medio 30
4	Destro	Assenza di tronchi	/
	Sinistro	10	20, 30, 27, 18, 25, 25, 18, 10, 25, 18

Per quanto riguarda, infine, i dati utili per le simulazioni nello scenario con foresta, questi sono stati ricavati dal progetto di taglio redatto dall'Ufficio Distrettuale Forestale di Trento, il quale, per ogni particella forestale coinvolta, ha effettuato il cavallettamento totale delle piante assegnate. In questo modo, si è potuto disporre del numero di piante per ogni particella e la relativa distribuzione in classi diametriche. Dividendo il numero totale di piante assegnate nella particella con la superficie (calcolata tramite il software QGis) dell'area di cantiere corrispondente, si è ottenuto il dato del numero di piante ad ettaro Nr.p./ha, mentre per il diametro medio Dm si è proceduto al calcolo della media ponderata dei diametri.

Si è ottenuto così un dato di Dm e un dato di Nr.p./ha per ogni particella: in virtù del fatto che essi non differivano di molto, si è scelto di farne una media aritmetica per avere un dato unico da spalmare sulla complessiva area di cantiere: si è così ottenuto il diametro medio di 36,19 cm e il numero di piante ad ettaro uguale a 242. Infine, è stata calcolata la deviazione standard del diametro medio. Questi dati hanno potuto inoltre dare una quantificazione più precisa rispetto alla percentuale del rilascio di piante a terra, che da prescrizione erano il 20% sul totale delle piante assegnate al taglio: in termini numerici, si tratta di circa 48 piante per ettaro e un volume di circa 59 m³ per ettaro, costituito dalle sole piante rilasciate a terra, al netto dei residui di utilizzazione.

Con questi dati, sono stati creati due differenti scenari: uno che avesse questi tre dati convertiti in tre file *raster* spalmati appunto sull'intera superficie studiata come per "ricostruire" la situazione ante-infestazione da bostrico, utile per le simulazioni con foresta; un secondo invece che avesse i tre dati sulla superficie a bosco ma non all'interno dei poligoni raffiguranti le sei aree di cantiere, in modo tale da rappresentare la situazione attuale del bosco, ovvero denudato lì dove sono state svolte le utilizzazioni.

Le simulazioni in Rockyfor3D sono state eseguite, come anticipato, con massi di dimensioni 1 x 0,5 x 0,5 m, con una variazione in aumento e in riduzione del 10%. Di seguito, vengono riportati i dati di output delle 1000 simulazioni:

Tabella 11: Risultati delle 1000 simulazioni per ogni scenario nel cantiere forestale di Montesover

	Checkpoint	Nr. passaggi	E tot	E_95	Ph_95	V_95
NF – riferimento	2	45601	6511822,8	142,8	1,1	16,6
	3	153379	23236918,5	151,5	1,2	17,2
	4	522511	85273795,2	163,2	1,8	16,9
	5	640534	32026700	50	0,5	9,8
	11	42550	5131530	120,6	0,4	14,6
F	2	18976	2461187	129,7	0,9	15,9
	3	77369	10607290	137,1	1,1	16,2
	4	90233	12822109	142,1	1,8	16,1
	5	80491	4346514	54	0,6	10,1
	11	4663	542773,2	116,4	0,5	14,4
FM	2	41702	3590542	86,1	0,6	12,8
	3	127961	13819788	108	1,1	14,6
	4	143575	20100500	140	1,8	15,9
	5	49956	2352928	47,1	0,6	9,6
	11	5294	556399,4	105,1	0,5	13,8
FNM	2	44203	6245884	141,3	1,1	16,4
	3	134065	19720962	147,1	1,2	16,7
	4	196850	26397585	134,1	1,6	15,5
	5	151879	8353345	55	0,6	10,3
	11	9061	1215080	134,1	0,6	16,1

In totale, sono state inserite undici reti virtuali, numerate da 1 a 11, posizionate in punti strategici a valle del cantiere, in particolare lungo le strade e all'interno degli impluvi. Durante la fase di analisi dei dati si è scelto di considerare solamente i *checkpoint* numero 2-3-4-5-11 poiché i dati ottenuti sono risultati essere maggiormente significativi. Essi si trovano lungo la pista forestale a valle del cantiere forestale, poco a monte della viabilità

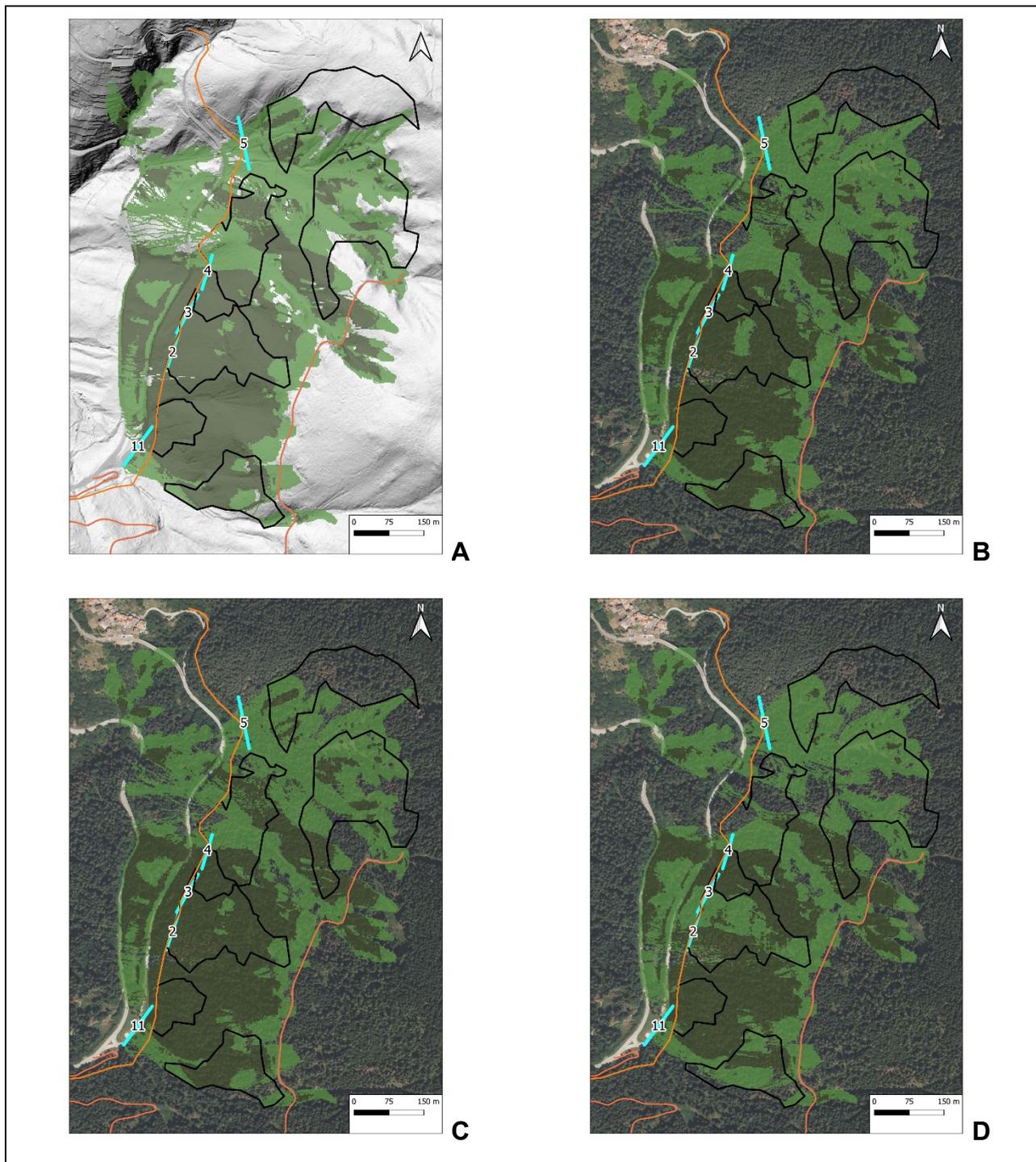
principale che porta all'abitato di Montesover, approssimativamente alla stessa quota e visibili come linee di colore azzurro in Figura 17-18-19.

Infine, sono stati calcolati i tre indici di Dupire, 2016 (a) tramite le Equazioni 1, 2 e 3, grazie ai quali si è potuto dare ad ogni *checkpoint*, per ogni scenario, una classificazione in termini di efficienza di protezione (PE – *Protection Effect*) (Dupire et al., 2016 b):

Tabella 12: indici di Dupire calcolati per ogni scenario e per ogni checkpoint nel cantiere forestale di Montesover

CHECKPOINT	SCENARIO	BARI (-)	MIRI (-)	ORPI (-)	CLASSIFICAZIONE
2	F	58,39	9,17	62,20	Medio PE
	FM	8,55	39,70	44,86	Basso PE
	FNM	3,06	1,05	4,08	Basso PE
3	F	49,56	9,50	54,35	Medio PE
	FM	16,57	28,71	40,53	Basso PE
	FNM	12,59	2,90	15,13	Basso PE
4	F	82,73	12,93	84,96	Medio PE
	FM	72,52	14,21	76,43	Medio PE
	FNM	62,33	17,83	69,04	Medio PE
5	F	87,433	-8,00	86,43	Medio PE
	FM	92,20	5,80	92,65	Alto PE
	FNM	76,29	-10,00	73,92	Medio PE
11	F	89,04	3,48	89,42	Medio PE
	FM	87,56	12,85	89,16	Medio PE
	FNM	78,70	-11,19	76,32	Medio PE

Nelle seguenti figure vengono riportati, visualizzati in mappa, i risultati delle simulazioni nei quali sono stati messi a confronto i quattro diversi scenari: A) **NF** scenario di riferimento, senza foresta (suolo nudo); B) **F** scenario con foresta intatta; C) **FNM** scenario con foresta senza tagli direzionati, quindi con suolo nudo all'interno delle aree di cantiere; D) **FM** scenario con foresta e con tagli direzionati all'interno delle aree di cantiere. In Figura 17 sono riportati i risultati relativi al novantacinquesimo percentile dell'energia cinetica dei massi; in Figura 18 sono rappresentati il numero di massi transitati e in Figura 19 la probabilità di transito dei massi.

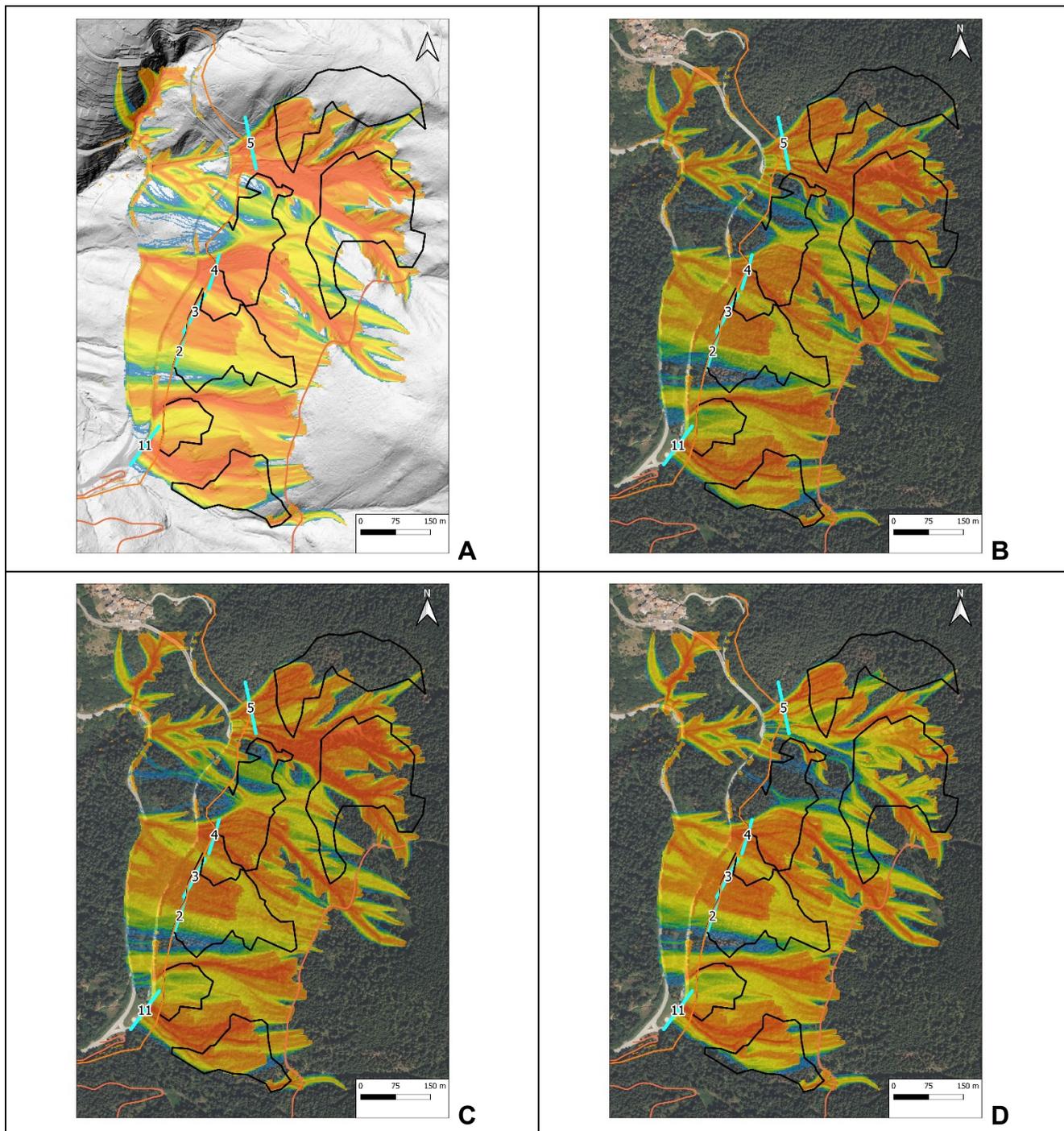


95° percentile dell'energia cinetica (kJ)

0-30 kJ	■
30-100 kJ	■
100-300 kJ	■
300-500 kJ	■
500-1000kJ	■
1000-2000 kJ	■

(A) scenario senza foresta, con suolo nudo, di riferimento
 (B) scenario con foresta intatta;
 (C) scenario con foresta senza tagli direzionati simulando l'esbosco totale del legname a terra
 (D) scenario con foresta e tagli direzionati che rappresenta la situazione reale. La linea nera indica il confine del cantiere forestale. Ortofoto da "Bing satellite"

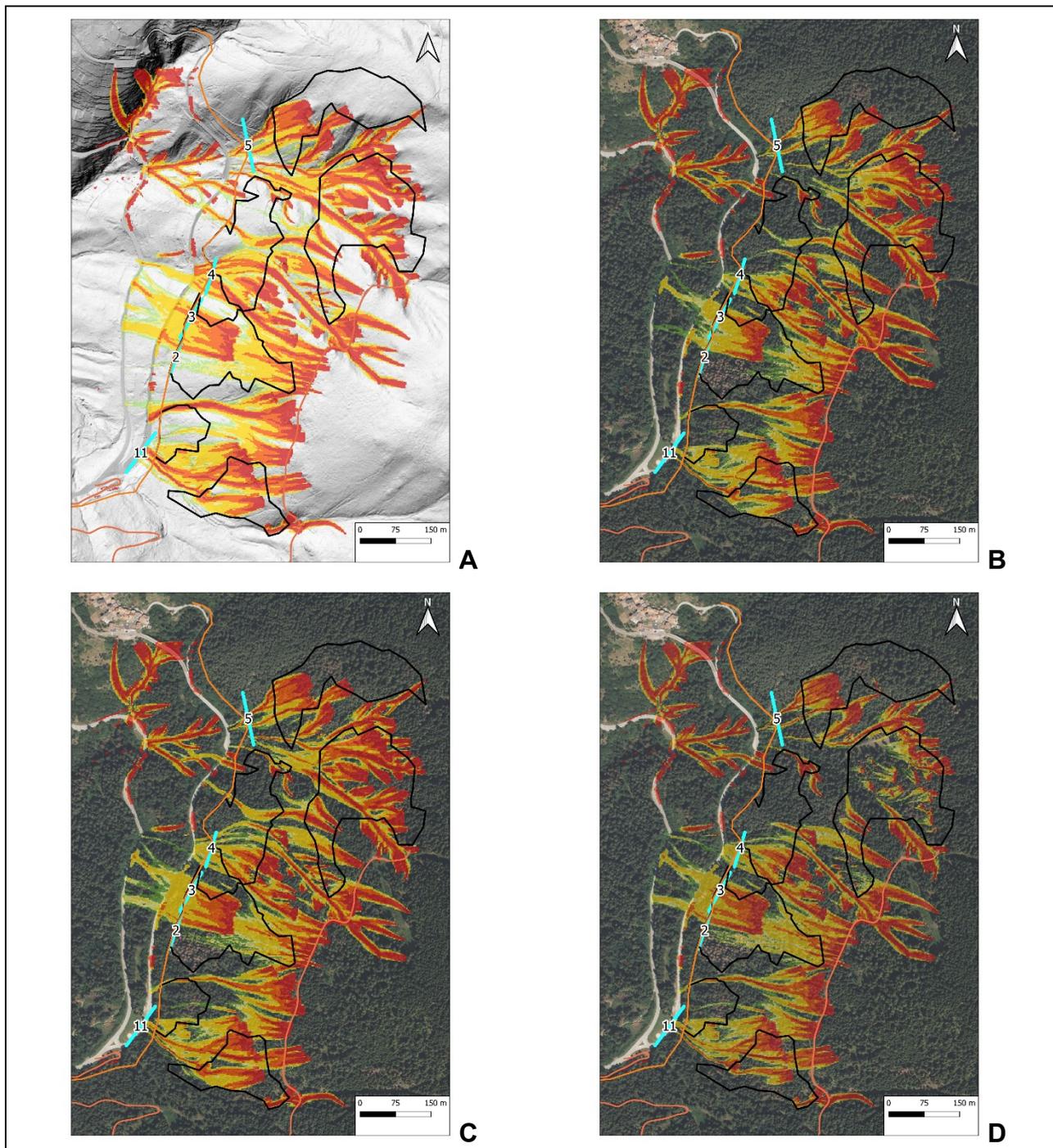
Figura 17: Risultati delle simulazioni per il cantiere forestale di Montesover. 95esimo percentile dell'energia cinetica dei massi espressa in kJ



numero di passaggi (nr)
 10.000
 1

(A) scenario senza foresta, con suolo nudo, di riferimento
 (B) scenario con foresta intatta;
 (C) scenario con foresta senza tagli direzionati simulando l'esbosco totale del legname a terra
 (D) scenario con foresta e tagli direzionati che rappresenta la situazione reale. La linea nera indica il confine del cantiere forestale. Ortofoto da "Bing satellite"

Figura 18: Risultati delle simulazioni per il cantiere forestale di Montesover: numero di passaggi dei massi all'interno delle celle del raster.



Probabilità di transito (%)

<= 1 %	■
1 - 1.5 %	■
1.5 - 2 %	■
2 - 5 %	■
5 - 10 %	■
10 - 100 %	■

(A) scenario senza foresta, con suolo nudo, di riferimento
 (B) scenario con foresta intatta;
 (C) scenario con foresta senza tagli direzionati simulando l'esbosco totale del legname a terra
 (D) scenario con foresta e tagli direzionati che rappresenta la situazione reale. La linea nera indica il confine del cantiere forestale. Ortofoto da "Bing satellite"

Figura 19: Risultati delle simulazioni per il cantiere forestale di Montesover: probabilità di transito dei massi all'interno delle celle del raster (%)

6.2. Dati utilizzati per Malga Caore e risultati

Per questo cantiere forestale non sono stati eseguiti transetti longitudinali, ma si è scelto di effettuarne uno trasversale per apprezzare meglio l'eterogeneità del rilascio delle piante che caratterizza questo cantiere.

Da progetto di taglio è stato previsto, appunto, il rilascio a terra del 20% delle piante in modo differenziato a seconda della zona, come anticipato precedentemente.



Figura 20: foto da valle verso monte del cantiere di Malga Caore. Sara Fait, Settembre 2024.

Inoltre, questa scelta è stata influenzata dal fatto che anche originariamente il bosco risultava eterogeneo poiché si trattava di area a pascolo: nell'ala sinistra (non visibile in Figura 20) il rilascio di piante è anche maggiore del 50%, dove è presente una catasta di tronchi alta 1,5 m; nella restante parte del cantiere, la concentrazione di tagli direzionati aumenta in corrispondenza delle vallette e diminuisce sui dossi. A destra, infine, in corrispondenza della pietraia, il rilascio aumenta nuovamente.

L'area a cantiere risulta inoltre coperta totalmente da vegetazione erbacea (*Calamagrostis villosa*, *Galeopsis speciosa*, *Rubus spp.*), tranne appunto nella parte destra dove è presente la pietraia.

Come per il cantiere di Montesover, nei *raster* che definiscono la forma e la densità della roccia è stato indicato, rispettivamente, il parallelepipedo e il dato di 2700kg/m³. Di seguito vengono riportati i dati raccolti nelle aree campione, che riflettono quanto detto precedentemente riguardo l'eterogeneità del rilascio di piante direzionate.

Tabella 13: Dati raccolti presso il cantiere di Malga Caore

Con tagli direzionati area campione 1 (Sx)	Senza foresta area campione 1
1. Nessun dato	
2. Tipo di suolo 4	
3. Rg 70 = 0,10	Rg 70 = 0,01
Rg 20 = 0,55	Rg 20 = 0,05
Rg 10 = 0,90	Rg 10 = 0,10
Con tagli direzionati area campione 2 (centro sx)	Senza foresta area campione 2
1. Nessun dato	
2. Tipo di suolo 4	
3. Rg 70 = 0,01	Rg 70 = 0,01
Rg 20 = 0,05	Rg 20 = 0,02
Rg 10 = 0,30	Rg 10 = 0,05
Con tagli direzionati area campione 3	Senza foresta area campione 3
1. Nessun dato	
2. Tipo di suolo 4	
3. Rg 70 = 0,95	Rg 70 = 0,01
Rg 20 = 0,30	Rg 20 = 0,07
Rg 10 = 1,50	Rg 10 = 0,15
Con tagli direzionati area campione 4 (dx vicino a pietraia)	Senza foresta area campione 4
1. Nessun dato	
2. Tipo di suolo 4	
3. Rg 70 = 0,10	Rg 70 = 0,10
Rg 20 = 0,70	Rg 20 = 0,24
Rg 10 = 0,70	Rg 10 = 0,40

Sono stati inoltre raccolti i dati delle tre dimensioni dei massi presenti sia all'interno delle aree campionate che lungo il transetto percorso trasversalmente al cantiere. Si tratta appunto di massi fermati da ceppaie e da tronchi a terra. Di seguito se ne riportano le tre dimensioni, in centimetri in Tabella 14 e una rappresentazione grafica della distribuzione (Figura 21).

Tabella 14: dimensioni dei massi campionati a Malga Caore

Nr.	Altezza (cm)	Lunghezza (cm)	Profondità (cm)	Volume (cm ³)
1	45	45	50	101250
2	45	65	67	195975
3	5	20	25	2500
4	10	15	20	3000
5	30	45	60	81000
6	43	60	60	154800
7	15	50	60	45000
8	23	60	65	89700
9	35	50	120	210000
10	5	20	25	2500
11	15	15	45	10125
12	7	10	35	2450
13	15	15	55	12375
14	15	30	85	38250
15	5	10	15	750

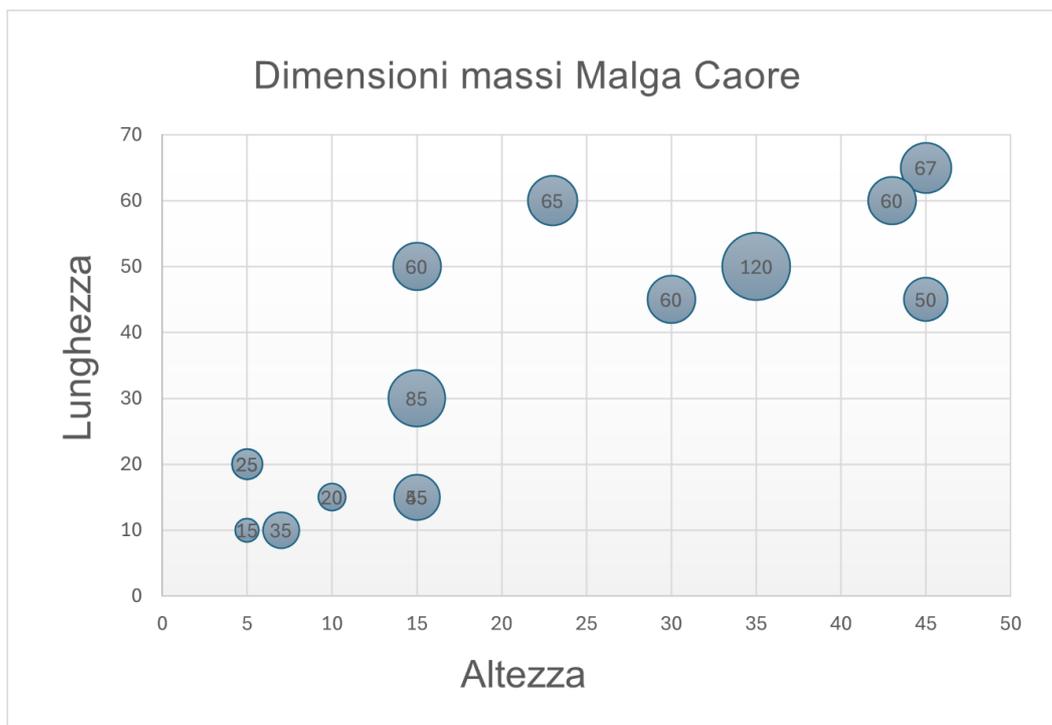


Figura 21: distribuzione delle dimensioni dei massi caduti e fermati all'interno del cantiere di Malga Caore. Le dimensioni delle bolle indicano la terza dimensione dei massi (profondità).

Per quanto riguarda, infine, i dati utili per le simulazioni nello scenario con foresta, questi sono stati derivati dal progetto di taglio redatto dalla Magnifica Comunità di Fiemme, la quale, durante le operazioni di assego delle piante bostricate, ha effettuato il cavallettamento totale delle piante delle due particelle forestali coinvolte. In questo modo, si è potuto disporre del numero di piante e la relativa distribuzione in classi diametriche.

Dividendo il numero totale di piante assegnate con la superficie totale del cantiere forestale si è ottenuto il dato del numero di piante ad ettaro Nr.p./ha, mentre per il diametro medio Dm si è proceduto al calcolo della media ponderata dei diametri.

Si è ottenuto così un dato di Dm uguale a 41,40 cm e un dato di Nr.p./ha uguale a 178. Infine, è stata calcolata la deviazione standard del diametro medio. Questi dati hanno potuto inoltre dare una quantificazione più precisa rispetto alla percentuale del rilascio di piante a terra, che da prescrizione erano il 20% sul totale delle piante assegnate al taglio: in termini numerici, si tratta di circa 35 piante per ettaro, per un volume di circa 51 m³ per ettaro, inteso come volume delle sole piante lasciate a terra.

Con questi dati, sono stati creati due differenti scenari, con le stesse modalità eseguite per il cantiere di Montesover: uno che avesse questi tre dati convertiti in tre file *raster* spalmati appunto sull'intera superficie studiata come per "ricostruire" la situazione ante-infestazione da bostrico, utile per le simulazioni con foresta; un secondo invece che avesse i tre dati sulla superficie a bosco ma non all'interno del poligono raffigurante l'area di cantiere, in modo tale da rappresentare la situazione attuale del bosco, ovvero denudato lì dove sono state svolte le utilizzazioni.

Le simulazioni in Rockyfor3D sono state eseguite, anche in questo caso, con massi di dimensioni 1 x 0,5 x 0,5 m, con una variazione in aumento e in riduzione del 10%. Inoltre, sono state inserite tre reti paramassi virtuali a valle del cantiere per ricavarne i dati di *output*, numerate da 1 a 3 e visibili come linee di colore azzurro nelle Figure seguenti 22, 23 e 24. Esse riportano i risultati delle simulazioni per quanto riguarda i parametri del novantacinquesimo percentile dell'energia cinetica dei massi (Fig. 22), del numero di massi caduti e transitati in ogni cella del raster (Fig. 23) e della probabilità di transito in ogni cella del raster (Fig. 24). Per ognuno dei tre parametri ne è stato studiato l'effetto nei quattro scenari considerati: A) **FN** senza foresta; B) **F** con foresta intatta, C) **FNM** con foresta e senza i tagli direzionati, come se il cantiere fosse stato trattato con l'esbosco totale delle piante danneggiate da bostrico; D) **FM** con foresta e con i tagli direzionati, ovvero lo scenario reale. In Tabella 15, invece, gli stessi vengono riportati in termini numerici.

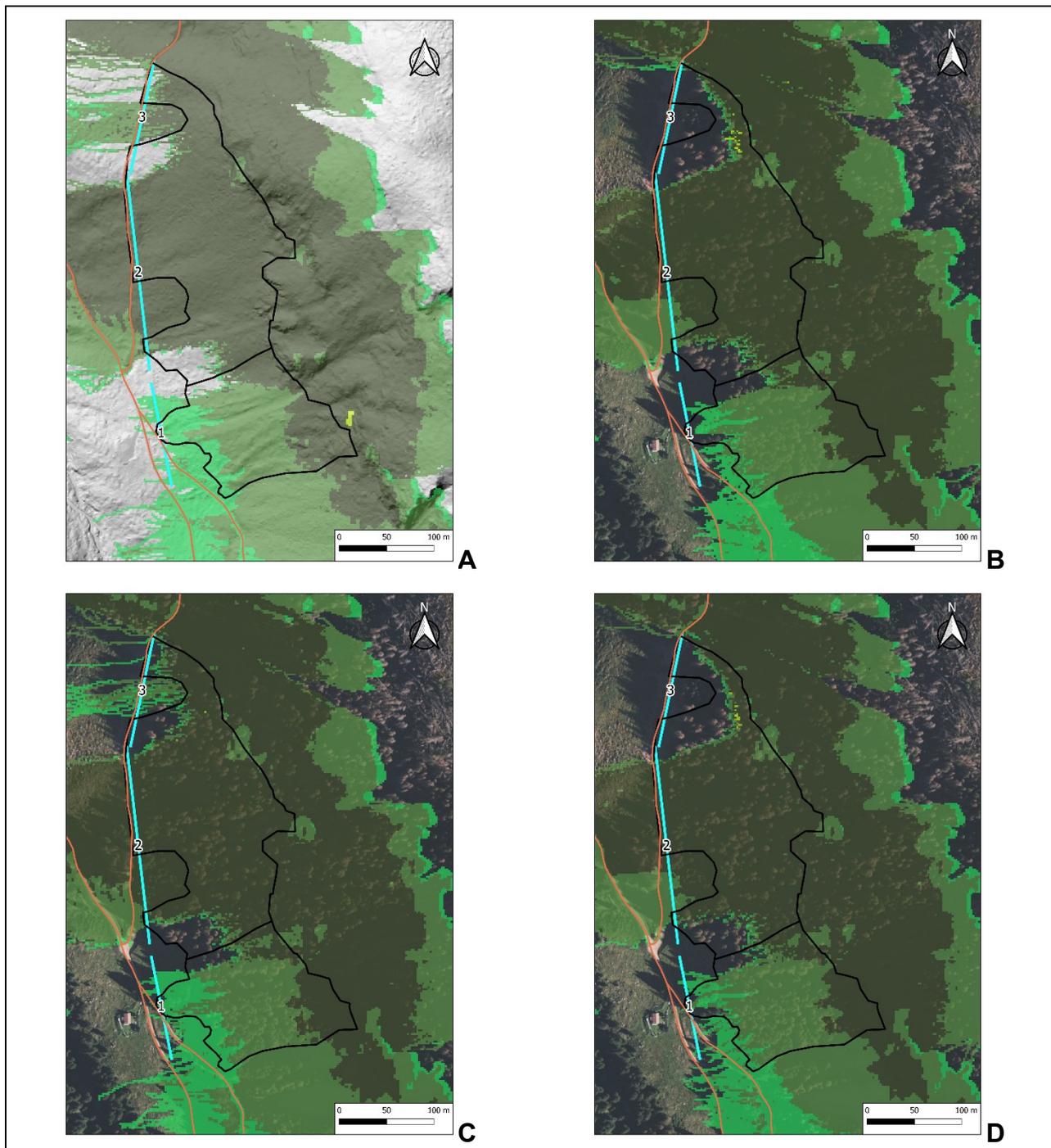
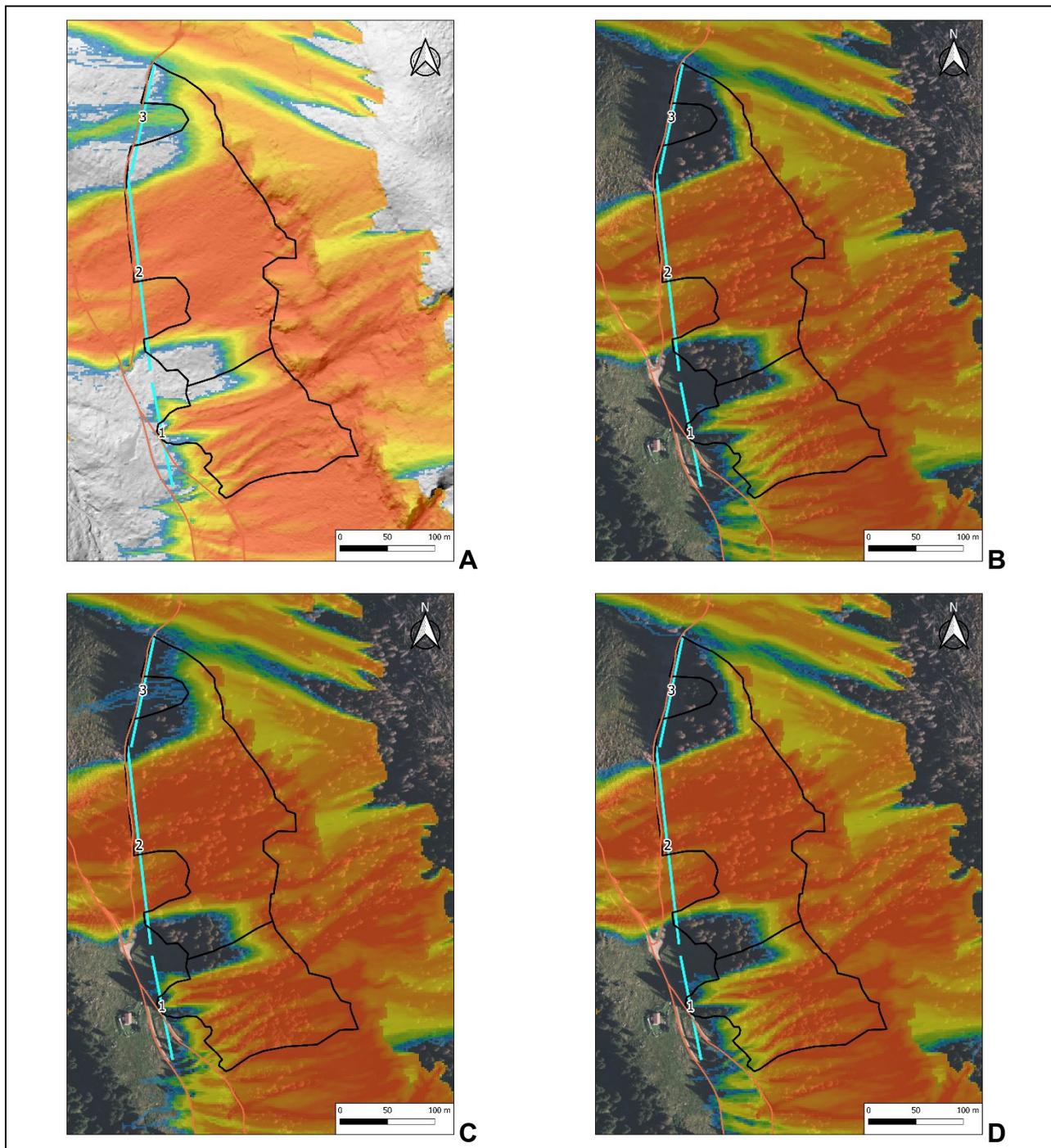


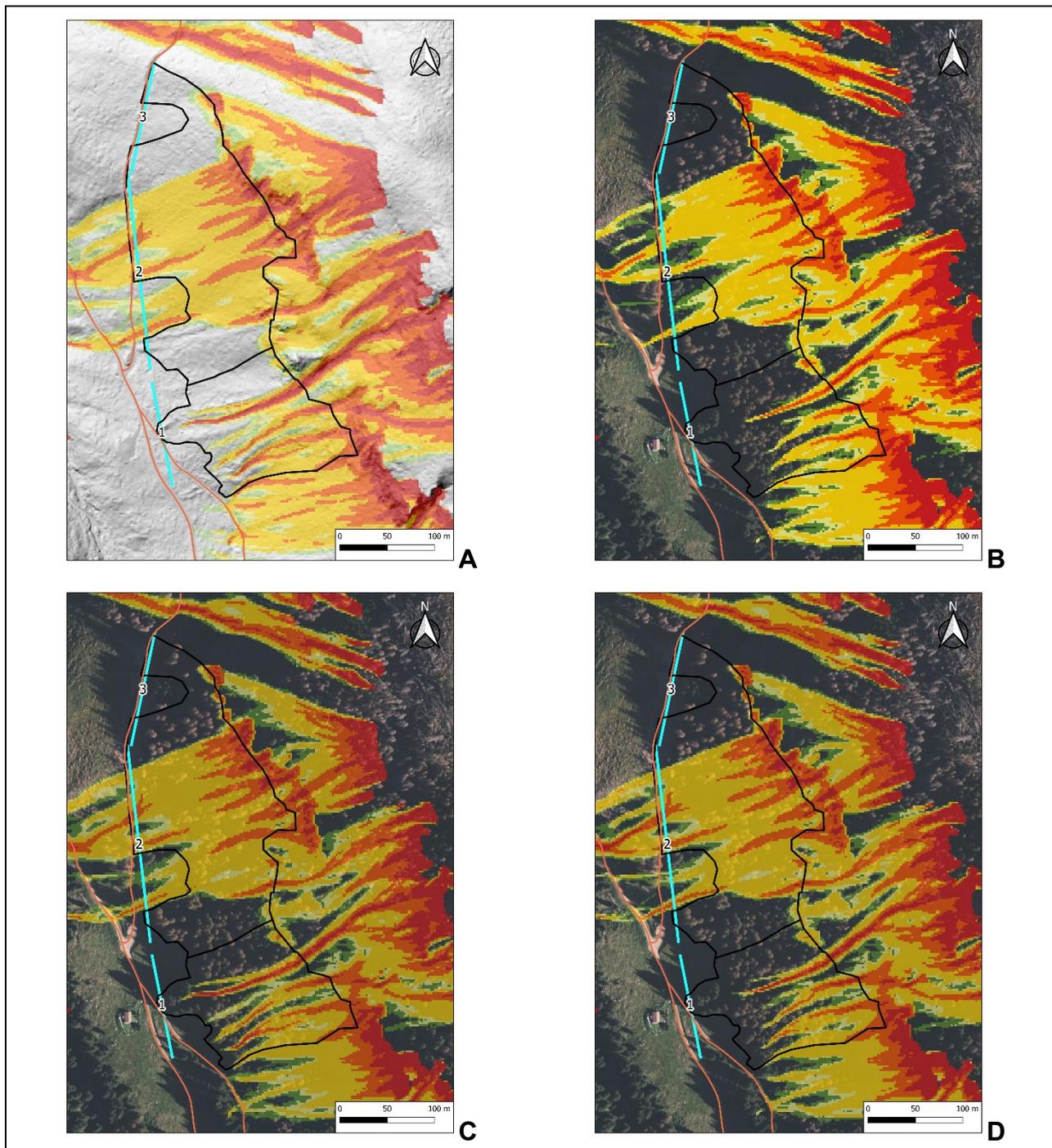
Figura 22: Risultati delle simulazioni per il cantiere forestale di malga Caore: 95esimo percentile dell'energia cinetica dei massi espressa in kJ.



numero di passaggi (nr)
 10.000
 1

(A) scenario senza foresta, con suolo nudo, di riferimento
 (B) scenario con foresta intatta;
 (C) scenario con foresta senza tagli direzionati simulando l'esbosco totale del legname a terra
 (D) scenario con foresta e tagli direzionati che rappresenta la situazione reale. La linea nera indica il confine del cantiere forestale. Ortofoto da "Bing satellite"

Figura 23: Risultati delle simulazioni per il cantiere forestale di malga Caore: numero di passaggi dei massi all'interno delle celle del raster.



Probabilità di transito (%)

<= 1 %
 1 - 1.5 %
 1.5 - 2 %
 2 - 5 %
 5 - 10 %
 10 - 100 %



(A) scenario senza foresta, con suolo nudo, di riferimento
 (B) scenario con foresta intatta;
 (C) scenario con foresta senza tagli direzionati simulando l'esbosco totale del legname a terra
 (D) scenario con foresta e tagli direzionati che rappresenta la situazione reale. La linea nera indica il confine del cantiere forestale. Ortofoto da "Bing satellite"

Figura 24: Risultati delle simulazioni per il cantiere forestale di malga Caore: probabilità di transito dei massi all'interno delle celle del raster (%)

Tabella 15: Risultati delle 1000 simulazioni per ogni scenario nel cantiere forestale di Malga Caore

	Checkpoint	Nr. passaggi	E tot	E_95	Ph_95	V_95
NF – riferimento	1	315	4.756,5	15,1	0,4	5,1
	2	735.485	1,27E+08	173	1,5	17,9
	3	194	27994,2	144,3	1,2	17,6
F	1	1	4,7	4,7	0,4	2,7
	2	299.513	34.144.482	114	1	14,6
	3	9	1.567,8	174,2	0,8	19
FM	1	16	403,2	25,2	0,4	6
	2	582765	74.593.920	128	1,2	15,5
	3	5	1.158,5	231,7	0,7	22,2
FNM	1	128	1.932,8	15,1	0,4	4,9
	2	596.028	101.920.788	171	1,5	17,8
	3	26	1.770,6	68,1	0,4	12,3

Infine, sono stati calcolati i tre indici di Dupire, 2016 (a) con le stesse modalità utilizzate per il cantiere di Montesover e riportati nella sottostante Tabella 16:

Tabella 16: indici di Dupire calcolati per ogni scenario e per ogni checkpoint nel cantiere forestale di Malga Caore

Checkpoint	Scenario	BARI (-)	MIRI (-)	ORPI (-)	Classificazione
1	F	99,68	68,87	99,90	<i>Alto PE</i>
	FM	94,92	-66,89	91,52	<i>Alto PE</i>
	FNM	59,36	0	59,36	<i>Medio PE</i>
2	F	59,28	34,10	73,16	<i>Medio PE</i>
	FM	20,76	26,01	41,37	<i>Basso PE</i>
	FNM	18,96	1,16	19,90	<i>Basso PE</i>
3	F	95,36	-20,72	94,40	<i>Alto PE</i>
	FM	97,43	-60,57	95,86	<i>Alto PE</i>
	FNM	86,60	52,81	93,67	<i>Alto PE</i>

6.3. Discussione

I risultati del presente lavoro di tesi, i quali hanno sottolineato il ruolo di protezione dalla caduta massi delle foreste che crescono su versanti montani, sono, complessivamente, in linea con quelli presenti in letteratura.

Infatti, in questo lavoro, è stato possibile osservare e quantificare la riduzione del numero di passaggi dei massi lungo il versante dovuto in alcuni casi alla presenza dei tagli direzionati, mentre in altri la riduzione è risultata minima o addirittura assente. Grazie, infatti, all'utilizzo degli indici dell'effetto di barriera (BARI e ORPI) è stato possibile confrontare come essi variavano tra i diversi scenari studiati. Per quanto riguarda la riduzione dell'energia cinetica dei massi, espressa dall'indice MIRI, questa ha mostrato risultati non sempre significativi, suggerendo che i tagli direzionati forniscono probabilmente un effetto barriera piuttosto che una riduzione dell'energia cinetica dei massi. Preme precisare, a tal proposito, che l'indice MIRI è soggetto ad una "forzatura matematica" per la quale può risultare negativo: questo accade perché i *checkpoint* negli scenari F, FM e FNM catturano i dati di quei massi che effettivamente li attraversano, mentre quelli di dimensioni inferiori, e con energia cinetica minore, non li attraversano arrestando la loro corsa più a monte per effetto delle piante in piedi o per i tronchi a terra. Nello scenario NF, invece, tutti i massi di ogni dimensione arrivano al *checkpoint*, che di conseguenza registrerà i dati di molti più massi rispetto agli scenari precedenti, facendo risultare perciò l'indice negativo.

I risultati qui esposti possono aiutare a capire se l'applicazione dei tagli direzionati, come metodo di mitigazione del rischio di caduta massi in un cantiere forestale nel quale si è proceduto al taglio raso per motivi fitosanitari, può essere considerato efficiente e conveniente.

In particolare, come precedentemente anticipato, questo studio ha considerato un rilascio a terra di piante direzionate pari al 20% del totale delle piante assegnate. Questo significa, per il cantiere di Montesover, un rilascio per ettaro di circa 48 piante per un volume di 59 metri cubi; mentre per Malga Caore un rilascio per ettaro di circa 35 piante per un volume di 51 metri cubi. Il volume, inoltre, è da considerarsi al netto del volume della necromassa che verrebbe comunque rilasciata in seguito alle utilizzazioni, ovvero ceppaie e ramaglie, che non contribuiscono in alcun modo all'effetto barriera né all'aumento della scabrezza del versante. Confrontando i dati sopra riportati, risulta che sul primo cantiere il

rilascio di piante a terra è maggiore rispetto al secondo: in termini numerici è del 13,6% e in termini volumetrici del 27,08%, differenze non trascurabili.

IL CANTIERE DI MONTESOVER

I risultati dello scenario F mostrano chiaramente che esiste un effetto operato dalla foresta nella riduzione dell'attività di caduta massi: esso è particolarmente eloquente confrontando il numero di passaggi con lo scenario di riferimento NF, riportati in Tab.11, confermato ulteriormente dagli indici BARI e ORPI in Tab.12, dove il *Protection Effect* risulta in tutti i *checkpoint* classificato come medio. Tale effetto (PE), nello scenario FM, aumenta alla classe più alta in un caso, rimane invariato in due casi e in altri due casi diminuisce invece alla classe più bassa, sul totale dei cinque *checkpoint* considerati.

I risultati degli scenari FM e FNM mostrano una generale diminuzione dell'effetto barriera e della funzione protettiva rispetto allo scenario precedente, ad eccezione del *checkpoint 5* il quale mostra per lo scenario FM un valore di ORPI maggiore rispetto allo scenario F e del *checkpoint 11* nel quale questo valore è del tutto simile tra i due scenari. Nei *checkpoint 2 e 3*, invece, si nota un crollo decisivo sia dell'indice BARI che ORPI nello scenario FNM; diversamente, lo scenario FM mostra sì un brusco calo dell'effetto barriera ma analizzando la funzione complessiva di protezione si vede che risulta nettamente maggiore rispetto a quella dello scenario FNM. Infine, il *checkpoint 4* non mostra grandi differenze confrontando i tre scenari: qui l'effetto protettivo complessivo risulta sempre medio, mostrando comunque una leggera diminuzione, dello stesso ordine di grandezza, passando dallo scenario F a quello FM e FNM.

Le osservazioni sopra riportate suggeriscono che nel cantiere di Montesover, il rilascio a terra di 48 piante ad ettaro per un volume corrispondente di circa 59 metri cubi hanno mantenuto l'effetto protettivo della foresta originale nelle aree di cantiere 4-5-6 che corrispondono sostanzialmente ai *checkpoint 5 e 11*. Diversamente, negli altri *checkpoint* che corrispondono alle aree di cantiere 2-3 i tagli direzionati non hanno avuto effetti significativi contro la caduta massi. Osservando la Figura 19, si nota che le aree in cui i tagli direzionati hanno sortito gli effetti migliori si trovano nella parte più a monte del cantiere, a valle delle quali rimane una "zona cuscinetto" di foresta integra anche in seguito alle utilizzazioni boschive. Contrariamente, le aree che non hanno mostrato risultati positivi si trovano direttamente a monte della pista forestale e presentano una lunghezza del versante utile alla riduzione del rischio di caduta massi, nettamente minore. Questo fatto è in linea

con quanto dimostrato negli esperimenti di Costa et al. (2021), secondo i quali l'effetto protettivo della foresta è influenzato molto dalla lunghezza del versante considerato.

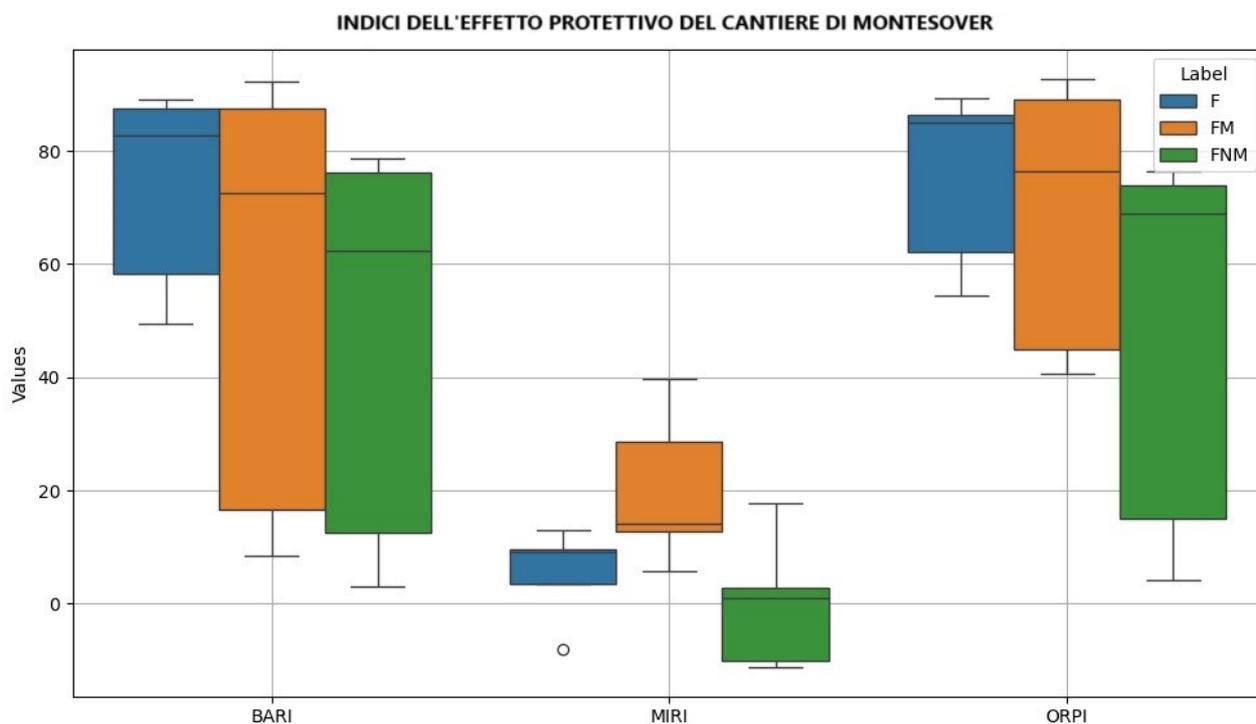


Figura 25: Boxplot relativo agli indici BARI, MIRI e ORPI del cantiere di Montesover calcolati per i tre diversi scenari studiati (F foresta integra, FM foresta con tagli direzionati; FNM foresta senza tagli direzionati).

Se lo scopo del rilascio a terra del 20% sul totale delle piante assegnate al taglio in questa realtà progettuale era quella del mantenimento dell'effetto protettivo originale, nelle aree di cantiere 4-5-6 esso risulta atteso. Diversamente nelle restanti aree, per compensare l'insufficiente quantità di piante rilasciate a terra difficilmente modificabile post-intervento, si può considerare un rimboschimento ulteriore, diminuendo i tempi di rinnovazione della foresta di protezione.

Se lo scopo era invece quello di aumentare, nel breve periodo, la funzione di protezione del versante, per contrastare la sua naturale diminuzione a causa della degradazione del legno morto, i risultati del presente studio mostrano che il rilascio del 20% di piante direzionate non basta per questo sito di studio.

Nel complesso, infine, i risultati relativi a quest'area sembrerebbero confermare l'effetto dei tagli direzionati sulla mitigazione del rischio di caduta massi. Tuttavia, essi suggeriscono la necessità di differenziare la percentuale di rilascio di piante a terra considerando, in fase progettuale, l'ubicazione dell'area di intervento sul versante:

- se essa si trova direttamente a monte di insediamenti o infrastrutture importanti senza un'adeguata "zona cuscinetto" di foresta integra, occorre considerare una percentuale più alta di rilascio a terra, non escludendo la possibilità di rilasciare addirittura tutto il materiale legnoso a terra;
- se si trova invece ad alte quote sul versante, lontano comunque da insediamenti od opere infrastrutturali importanti a monte dei quali vi è una "zona cuscinetto" di foresta integra piuttosto importante, il rilascio a terra può attestarsi su percentuali minori.

IL CANTIERE DI MALGA CAORE

I risultati dello scenario F mostrano, così come per il sito precedentemente analizzato, che anche presso Malga Caore il bosco presenta buone capacità di protezione contro la caduta massi. Confrontando infatti il numero di passaggi con lo scenario NF in Tab. 15, si può notare come la diminuzione sia importante nei tre *checkpoint* analizzati, ulteriormente confermato dagli indici BARI e ORPI in Tab. 16, dove il *Protection Effect* dello scenario F è alto nei *checkpoint* 1-3 e medio nel 2. Tale effetto (PE), nello scenario FM, viene mantenuto su due *checkpoint* su tre totali, mentre in un caso diminuisce alla classe inferiore.

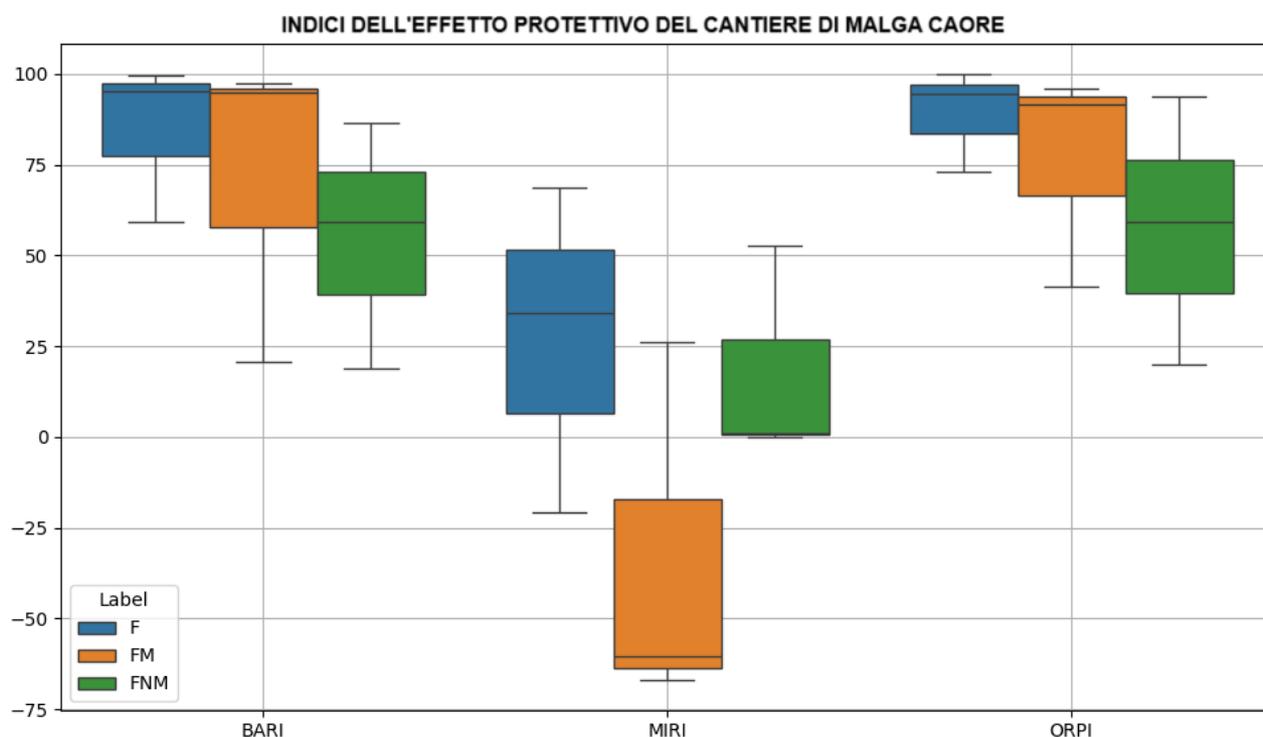


Figura 26: Boxplot relativo agli indici BARI, MIRI e ORPI del cantiere di Malga Caore calcolati per i tre diversi scenari studiati (F foresta integra, FM foresta con tagli direzionati; FNM foresta senza tagli direzionati).

I risultati degli scenari FM e FNM mostrano differenze nell'effetto barriera: nel primo *checkpoint*, corrispondente al lato destro del cantiere confinante con la pietraia, gli indici BARI e ORPI non subiscono riduzioni importanti nello scenario FM come invece accade per lo scenario FNM; nel secondo la riduzione di entrambi gli indici è importante nei due scenari, per i quali l'effetto protettivo risulta basso sia nel caso in cui vengano rilasciati i tagli direzionati sia nel caso in cui il materiale venga esboscato completamente; nel terzo, infine, si registra un piccolo aumento negli indici BARI e ORPI per lo scenario FM, anche se nel complesso l'effetto protettivo è alto in tutti gli scenari.

Queste osservazioni suggeriscono che, nel cantiere di Malga Caore, l'effetto protettivo dei tagli direzionati ha mantenuto quello offerto dalla foresta originale nei *checkpoint* 1 e 3, mentre nel *checkpoint* 2 non sembrano aver sortito l'effetto desiderato. Osservando la Figura 24, si nota che l'area nel quale i tagli direzionati hanno avuto i risultati più significativi corrisponde al lato destro del cantiere, direttamente a monte della struttura abitabile della malga, coincidente con la zona classificata di protezione diretta. Ciò comporta un buon risultato in quanto l'obiettivo di protezione, in questa parte di cantiere, sembrerebbe raggiunto. In Figura 23, invece, risulta più apprezzabile l'effetto dei tagli direzionati sul *checkpoint* 3, lato sinistro del cantiere: è possibile notare come l'effetto della piccola "zona cuscinetto" di foresta risparmiata dall'attacco del bostrico viene integrato a quella dei tagli direzionati soprastanti annullando, si può dire, il passaggio dei massi in caduta lungo il versante. Non può essere affermato altrettanto per l'area soprastante il *checkpoint* 2, per il quale i risultati mostrano che l'effetto protettivo della foresta non è stato mantenuto e che, quindi, il rilascio di piante a terra per una percentuale del 20% non è stato sufficiente a questo scopo.

Tuttavia, osservando le stesse figure sopra indicate si può notare che la sorgente dei massi in caduta e che arrivano ai *checkpoint* 1 e 3 risulta molto più a monte rispetto a quelli in transito nell'area centrale, per i quali la sorgente sembrerebbe coincidere proprio con la falesia a monte del cantiere. Considerando questo fatto, dunque, risulta chiaro, ancora una volta, che la lunghezza del versante gioca un ruolo decisivo nel determinare l'effetto protettivo di una foresta (Costa et al., 2021), così come osservato per il cantiere di Montesover.

Infine, si può affermare che, se l'obiettivo di protezione oggetto di questo cantiere coincideva con la struttura della malga, lo scopo è stato raggiunto. Per quanto riguarda invece la sua parte centrale, alla luce dei risultati ottenuti e considerando la limitata lunghezza del versante sotteso alla zona sorgente, il rilascio a terra del 20% delle piante

assegnate al taglio non è stato sufficiente. Si potrebbe integrare l'intervento con un ulteriore rimboschimento in questa zona, in modo tale da accelerare la rinnovazione forestale e il conseguente recupero dell'effetto protettivo della foresta. Considerando però che la località in cui si trova il cantiere non presenta insediamenti stabili né infrastrutture importanti se non la viabilità forestale, tali decisioni possono essere rimandate all'amministrazione che potrebbe valutarne la convenienza in base all'entità della fruizione da parte dei portatori di interesse e dell'affluenza turistica della zona.

I risultati dei cantieri forestali analizzati nel presente studio sono stati ottenuti creando i *raster* di input per il software Rockyfor3D relativi alla rugosità del terreno (RG 70, RG 20 e RG 10) con i dati raccolti in campo tramite campionamenti. Lo studio di Costa et al. (2021) ha dimostrato invece che da *raster* creati a partire da dati di scabrezza derivati da LiDAR si ottiene una maggiore precisione riguardo il numero e la posizione dei tagli direzionati e conseguenti risultati delle simulazioni più attendibili.

Quindi, in conclusione, sarebbe auspicabile che in futuri studi mirati alla valutazione dell'effetto dei tagli direzionati sulla protezione dalla caduta massi, condotti tramite l'utilizzo del software di simulazione Rockyfor3D, si consideri la possibilità di utilizzare questa tecnologia per la definizione del parametro della *roughness*.

In effetti, potrebbe essere presa in considerazione l'opportunità di ripetere questo studio estraendo alcuni parametri, utili alle simulazioni, dalle nuove acquisizioni fatte tramite drone e sensore Lidar, disponibili per Malga Caore, e sensore fotogrammetrico disponibili per Montesover. Tali acquisizioni sono state eseguite sia in precedenza che in seguito alle utilizzazioni forestali in entrambi i cantieri. Inoltre, sarebbe interessante approfondire l'effetto della diversificazione dell'intervento sulla sua efficacia complessiva, considerando:

- la lunghezza del versante coinvolto;
- la posizione del cantiere rispetto all'intero versante;
- la presenza di "aree cuscinetto" con foresta ancora intatta;
- il rilascio di una maggiore quantità di piante a terra.

7. CONCLUSIONI

Con questo studio è stata testata l'influenza dei tagli direzionati sul fenomeno gravitativo della caduta massi in due cantieri forestali del Trentino, nei quali è stato applicato il taglio a raso delle piante colpite dall'epidemia di *Ips typographus*, conseguente alla tempesta Vaia. Dopo un disturbo naturale, l'efficienza della funzione protettiva di una foresta può cambiare radicalmente e, in base alla severità dell'evento, essere addirittura annullata. Nel cantiere di Montesover, l'efficienza protettiva (PE) della foresta originale è stata classificata media, mentre nel cantiere di Malga Caore è stata classificata alta nelle due estremità e media al centro dell'area trattata.

Complessivamente, la classe del *Protection Effect* nello scenario FM non è variata rispetto allo scenario F nella maggior parte dei casi in entrambi i cantieri. Infatti, è stato osservato che il rilascio a terra del 20% delle piante assegnate al taglio (48 piante per ettaro e 59 metri cubi a ettaro nel primo caso e 35 piante a ettaro per 51 metri cubi a ettaro nel secondo) è risultato essere sufficiente alla conservazione della funzione di protezione della foresta originale là dove l'area di cantiere era posta molto a monte rispetto al versante e dove vi era presente una zona cuscinetto di foresta ancora intatta tra il cantiere e le opere da proteggere. Dove invece l'area di versante trattata con i tagli direzionati si trovava direttamente a monte delle opere da proteggere e la sua lunghezza rispetto alla zona sorgente dei massi in caduta risultava troppo corta, il rilascio del 20% non è risultato sufficiente al mantenimento della funzione protettiva associata alla foresta originale.

Comunque, il ruolo che i tagli direzionati possono avere nella mitigazione della perdita della funzione protettiva di una foresta dopo un disturbo è stato confermato. Inoltre, dai risultati ottenuti e dalle premesse sopra riportate, è emerso che, all'occorrenza, in fase progettuale valutare di differenziare l'entità del rilascio all'interno del cantiere potrebbe assicurare una maggiore omogeneità dell'effetto di protezione post-intervento.

In conclusione, da un punto di vista operativo, si può affermare che evitare le tradizionali pratiche selvicolturali di rimozione totale del materiale legnoso (il cosiddetto *salvage logging*) in favore dei tagli direzionati, può considerarsi un metodo efficace e naturale per conservare anche altri servizi ecosistemici, quale la protezione dalla caduta massi, che vengono a mancare in seguito agli attacchi massivi del bostrico.

BIBLIOGRAFIA

- BATTISTI, A.**, 2020. Il danno di domani: l'attacco degli insetti. Atti Accademia Galileiana di Scienze Lettere ed Arti in Padova, incontro del 30/01/2019, in *Stampa*.
- BATTISTI, A.**, 2020. Vaia e il rischio bostrico. La situazione sulle Alpi centro orientali nel primo anno dai crolli. *Sherwood* 245. pp.17-21
- BOURRIER F.**, Dorren L., Berger F. 2012. Full scale field tests on rockfall impacting trees felled transverse to the slope. 12th Congress INTERPRAEVENT – Grenoble / France. Conference Proceedings. pp.643-650.
- BOURRIER, FRANCK, L.** Dorren, e F. Berger. 2012. Full Scale Field Tests on Rockfall Impacting Trees Felled Transverse to the Slope. to the slope. 12th Congress INTERPRAEVENT – Grenoble / France. Conference Proceedings. pp.643-650.
- BRUZZESE, S.**, Accastello C., Blanc S., Comini B., Amato G., Masiero M., Brun F., 2019. La valutazione del servizio di protezione: un modello economico per le foreste montane. Conferenza Finale Italiana RTA – Trento, 19/12/2019.
- BUCELLA, P.** 2014. L'importanza della multifunzionalità delle foreste in Europa. L'Italia forestale e montana, 69(3), pp.161-171.
- CHIRICI, G.** et al., 2019. Stima dei danni della tempesta “Vaia” alle foreste in Italia. *Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology* 16(1):3. doi: 10.3832/efor3070-016.
- COMMISSIONE EUROPEA DG AMBIENTE.** 2016. Notiziario natura e biodiversità Natura 2000, I benefici di biodiversità e natura per la salute, Ufficio delle Pubblicazioni, Lussemburgo, numero 40, pp.6-9.
- COSTA, M.**, Betetto, C., Zeni, F., & Lingua, E. 2020. Utilizzo di uno strumento di simulazione caduta massi per la quantificazione del ruolo protettivo di due foreste alpine. *DENDRONATURA*, 1(Anno 41), pp.34-45.
- COSTA, M.**, Marchi, N., Bettella, F., Bolzon P., Berger, F., e Lingua, E. 2021. Biological Legacies and Rockfall: The Protective Effect of a Windthrown Forest. *Forests* 12(9):1141. doi:10.3390/f12091141.
- DIXON, JOHN**, et al. *Economic analysis of environmental impacts*. Routledge, 2013.
- DORREN LKA.** 2002. Mountain Geocosystem. GIS model ling of rockfall and protection forest structure. University of Amsterdam, Amsterdam UvA.
- DUPIRE, S.**, Bourrier, F., Monnet, J. M., Bigot, S., Borgniet, L., Berger, F., & Curt, T.

- (2016a). Novel quantitative indicators to characterize the protective effect of mountain forests against rockfall. *Ecological Indicators*, 67. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.02.023. pp.98-107.
- DUPIRE, S.**, Bourrier, F., Monnet, J. M., Bigot, S., Borgniet, L., Berger, F., & Curt, T. (2016b). The protective effect of forests against rockfalls across the French Alps: Influence of forest diversity. *Forest Ecology and Management*, 382, doi:10.1016/j.foreco.2016.10.020. pp. 269-279.
- EUROPEAN UNION (EU)**, (2016a) Agriculture, forestry and fishery statistics, Publications Office of the European Union, Lussemburgo, pp.181-186. Disponibile su: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/7777899/KSFK-16-001-EN-N.pdf/cae3c56f-53e2-404a-9e9e-fb5f57ab49e3> (consultato il 28/06/2024).
- FACCOLI, M.**, A. Andriolo, I. Bernardinelli, A. Ducoli, C. Salvadori, e A. Battisti. 2020. Vaia e il rischio bostrico: la situazione sulle Alpi centro orientali nel primo anno dai crolli. *Sherwood* n. 245. pp.17-21.
- FACCOLI, M.**, Stergulc F., 2004. Ips typographus (L.) pheromone trapping in south Alps: Spring catches determine damage thresholds». *Journal of Applied Entomology* 128. doi: 10.1111/j.1439-0418.2004.00848.x. pp.307-311.
- FUCHS, S.**, and M. Ch McAlpin. 2005. "The net benefit of public expenditures on avalanche defence structures in the municipality of Davos, Switzerland." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5.3. pp.319-330.
- GAGLIOPPA, P.**, Guadagno R, Marino D, Marucci A, Palmieri M, Pellegrino D, Schirpke U, Caracausi C, 2017. L'assestamento forestale basato su servizi ecosistemici e pagamenti per servizi ecosistemici: considerazioni a valle del progetto LIFE+ Making Good Natura. *Forest@*. doi:10.3832/efor2235-014.
- GARDINER, B.**, Blennow K., Carnus J., Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicoll B., Orazio C., Peyron J., Reviron M., Sschelhaas J., Schuck A., Spielmann M. e Usbeck T., 2013. *Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts*.
- LIEUTIER, F.**, Day K.R., Battisti A., Gregoire J-C., Evans H.F., 2004 – *Bark and wood boring insects in living trees in Europe*, a synthesis. Kluwer, Dordrecht.
- LOUSTAU, D.** (ed) 2010. *Forests, Carbon Cycle and Climate Change*, Series Update Sciences & Technologies, Quae, ISBN-13-978-2-7592-0384-0, ISSN 1773-7923. 2010.
- MARINI, L.**, 2023. Appunti delle lezioni di "Biodiversità e servizi ecosistemici". Università degli Studi di Padova.
- MCCARTHY, J.**, 2001. Gap dynamics of forest trees: a review with particular attention to boreal forests. *Environmental Reviews - ENVIRON REV* 9:1-59. doi: 10.1139/er-9-1-1.

- MELONI, F.**, Lingua E., Motta R. 2006. Analisi della funzione protettiva delle foreste: l'esempio della "Carta delle foreste di protezione diretta della Valle d'Aosta". *Forest@ 3*: 420-425. - doi:10.3832/efor0388-0030420.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (PROGRAM)**, a c. di. 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press.
- MILLENNIUM ECOSYSTEMS ASSESSMENT (MA)**, (2003), *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*, Island Press, Washington D.C - Disponibile su: http://pdf.wri.org/ecosystems_human_wellbeing.pdf (consultato il 20/06/2024).
- MOTTA R.**, Haudemand JC. 2000. Silvicultural planning in protective forests in the European Alps: an example of planning in the *Aosta Valley*. *Mountain Research and Development* 20. pp.74-81.
- MOTTA, R.**, Haudemand JC. 1999. Selvicoltura nelle foreste di protezione diretta delle Alpi. Il bosco "Ban de Ville" di Courmayeur (AO). *Monti e boschi* 50: pp.5-14.
- PETTANELLA, D.**, and Giorgia Bottaro. 2019. "Pagamenti per i servizi ecosistemici." *I contributi della Gestione Forestale Sostenibile* .
- PETTANELLA, D.**, 2009 Le nuove sfide per il settore forestale. Mercato energia, ambiente e politiche. Edizioni Tellus, Roma, pp.11-60. Disponibile su: http://www.darte.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/598_20_10_233_7_872.pdf (consultato il 28.06.2024).
- PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO**, Agenzia Provinciale delle Foreste Demaniali, Servizio Foreste. 2020. Supplemento n.2 a *Sherwood – Foreste ed Alberi Oggi* n.248 – Anno 26 n.5 Settembre/Ottobre 2020. Piano d'azione Vaia: l'evento, gli interventi, i risultati.
- PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO**, Agenzia Provinciale delle Foreste Demaniali, Servizio Foreste, 2022. Stato di attuazione del Piano d'Azione per la gestione degli interventi di esbosco e ricostituzione dei boschi danneggiati dalla Tempesta Vaia – Report finale. Provincia Autonoma di Trento.
- PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO**, Dipartimento di Protezione Civile, Foreste e Fauna, Servizio Foreste, 2023. Piano per l'organizzazione degli interventi di utilizzazione per la lotta fitosanitaria e di ricostruzione dei boschi danneggiati. Aggiornamento anno 2024. Provincia Autonoma di Trento.
- PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO**, Servizio Foreste e Fauna, Scrinzi G. et al., 2010. I nuovi modelli dendrometrici per la stima delle masse assestamentali in provincia di Trento.
- PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO**. 2007. Legge Provinciale della Provincia Autonoma di

Trento 23.5.2007 n.11. Legge provinciale sulle foreste e sulla protezione della natura. Governo del territorio forestale e montano, dei corsi d'acqua e delle aree protette. Supplemento n. 2 al Bollettino del 05 giugno 2007, n. 23.

PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO. 2023-S044-00143 Delibera della Giunta Provinciale nr. 1303 del 20 luglio 2023 – Criteri e modalità per la concessione di premi ad ettaro per la realizzazione di attività di mitigazione degli effetti negativi del bostrico, in particolari situazioni critiche, ai fini dell'utilizzo del fondo per le misure di tutela del territorio e prevenzione delle infestazioni fitosanitarie per le zone interessate dall'epidemia dell'insetto *Ips typographus* di cui alla L. 30 dicembre 2021. n. 234.

RINGENBACH, A., Stihl E., Buhler Y., Bebi P., Bartelt P., Rigling A., Christen M., Lu G., Stoffel A., Kistler M., Degonda S., Simmler K., Madler D., Caviezel A. 2022. Full-scale experiments to examine the role of deadwood in rockfall dynamics in forests. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22(7):2433–43. doi:10.5194/nhess-22-2433-2022.

SCHELHAAS, M.J., 2008a. Impacts of natural disturbances on the development of European forest resources: application of model approaches from tree and stand levels to large-scale scenarios. *Dissertationes Forestales* 56, Alterra Scientific Contributions 23. doi:10.14214/df.56.

SCHELHAAS, M.J., Nabuurs, G.J., Schuck, A., 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* 9(11). doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x. pp.1620-1633.

SCHÖNENBERGER W. 1998. Adapted silviculture in mountain forests in Switzerland. IUFRO Inter-Divisional Seoul Conference: "Forest Ecosystem and Land Use in Mountain Areas". Seoul, Korea, pp.142-147.

SHABMAN, LEONARD A., and Sandra S. Batie. 1978. Economic value of natural coastal wetlands: a critique. *Coastal Management* 4.3. doi:10.1080/08920757809361777. pp.231-247.

THE FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 2015. Global Forest Resources Assessment 2015. FAO, Rome Italy.

THE FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). 2016. Global Forest Resources Assessment 2015. How are the world's forests changing? Second Edition, Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, pp.15-43. Disponibile su: <http://www.fao.org/3/a-i4793e.pdf> (consultato il 28/06/2024).

TORREGGIANI L., 2019. Schianti da Vento. I principali eventi europei e italiani dal 1950 ad oggi. *Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi* 238. pp.16-18.

ALTRA DOCUMENTAZIONE

TENENTE COLONNELLO FORESTALE ANDREA DOTT. DARRA (direttore UDF Trento). Comune di Sover: Progetto di Mitigazione a seguito infestazione di bostrico sul versante a monte della SP 252 di Montesover. Relazione tecnica. Agosto 2023. UDF Trento, Servizio Foreste della PAT.

ILARIO DOTT. CAVADA. Magnifica Comunità di Fiemme. Attività di mitigazione degli effetti negativi del bostrico in particolari situazioni critiche in loc. Malga Caore (C.C. Cavalese). Relazione tecnica. 25 settembre 2023(a).

ILARIO DOTT. CAVADA. Magnifica Comunità di Fiemme. Attività di mitigazione degli effetti negativi del bostrico in particolari situazioni critiche in loc. Malga Caore (C.C. Cavalese). Progetto di rimboschimento. 2023 (b).

ILARIO DOTT. CAVADA. Magnifica Comunità di Fiemme. Progetto di taglio n. 425/2023/20132. Anno 2023 (c).

UFFICIO DISTRETTUALE FORESTALE TRENTO. Progetto di taglio n. 54/2023/8. Anno 2023

PIANO DI GESTIONE FORESTALE AZIENDALE DEL COMUNE DI SOVER. Codice Piano: 54

PIANO DI GESTIONE FORESTALE AZIENDALE MAGNIFICA COMUNITÀ DI FIEMME III/A DISTRETTO. Codice Piano: 425

PROGRAMMI PER COMPUTER

QGIS ver. 3.40.0, Beaverton: Open-Source Geospatial Foundation

SAGA GIS ver. 7.0, Hamburg and Göttingen: Department for Physical Geography

ROCKYFOR 3D ver. 5.1, Ginevra: ecorisQ - International Association for Natural Hazard Risk Management

SITI WEB

- Anon. s.d.-a. «<https://Cices.Eu/>». Recuperato 12 novembre 2024 (<https://cices.eu/>).
- Anon. s.d.-b. «Metetrentino». Recuperato giugno 2024 (<https://www.meteotrentino.it/index.html#!/content?menuItemDesktop=169>).
- Anon. s.d.-c. «Millennium Ecosystem Assessment». Recuperato giugno 2024 (<https://www.millenniumassessment.org/en/index.html>).
- Anon. s.d.-d. «Rockyfor3D (V5.1) rivelato Descrizione trasparente del modello 3D di caduta massi». - Recuperato giugno 2024 (<https://www.ecorisq.org/>).
- Infotn. s.d. «Piano d'azione Vaia: l'evento, gli interventi, i risultati». Ufficio Stampa Provincia Autonoma di Trento. Recuperato giugno 2024 (<https://www.ufficiostampa.provincia.tn.it/Comunicati/Piano-d-azione-Vaia-l-evento-gli-interventi-i-risultati>).

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1: DANNI TOTALI CAUSATI DA DISTURBI NELLE FORESTE EUROPEE (SCHELHAAS, 2008A)	15
FIGURA 2: SUPERFICIE FORESTALE DISTRUTTA DALLA TEMPESTA VAIA (CHIRICI ET AL., 2019)	18
FIGURA 3: DISTRIBUZIONE DEL DANNO PER COMUNE AMMINISTRATIVO (M3 TARIFFARI) - (P.A.T. - A.Pro.Fo.D. - S.F., 2020).....	19
FIGURA 4: TRAPPOLA A FEROMONI ALLESTITA IN UN'AREA COLPITA DA BOSTRICO (BOSCO DI ABETE ROSSO SITO SUL MONTE PAGANELLA, SARA FAIT ESTATE 2024).....	21
FIGURA 5: CATTURE MEDIE PER TRAPPOLA PER UDF NEGLI ANNI 2019-2023 (P.A.T. - S.F. - PIANO BOSTRICO, 2024)	23
FIGURA 6: CATTURE MEDIE PER TRAPPOLA PER CIASCUN UDF AL 20 LUGLIO 2024 (P.A.T. - S.F. - PIANO BOSTRICO, 2024)	24
FIGURA 7: CLASSIFICAZIONE E INTERAZIONI DEI SE CON IL BENESSERE UMANO. FONTE MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2003) - ECOSYSTEM AND HUMAN WELL-BEING: A FRAMEWORK FOR ASSESSMENT	27
FIGURA 8: CAMBIAMENTI NELLA QUANTITÀ DI CARBONIO STOCCATA DALLE FORESTE NEL PERIODO 1990 – 2015 (FONTE FAO, 2016)	30
FIGURA 9: INQUADRAMENTO DEI COMUNI DI SOVER E CAVALESE, DOVE INSISTONO I CANTIERI FORESTALI STUDIATI	38
FIGURA 10: INQUADRAMENTO DEL CANTIERE FORESTALE DI MONTESOVER	40
FIGURA 11: INQUADRAMENTO DEL CANTIERE FORESTALE DI MALGA CAORE.....	42
FIGURA 12: 200 SIMULAZIONI SUL CANTIERE DI MONTESOVER CON RG 70 = 0.05; RG 20 = 0.08; RG 10 = 0.1; ASSENZA DI FORESTA. LO STESSO È STATO FATTO PER ENTRAMBE LE AREE DI STUDIO. (PAUL RICHTER, 2024).....	48
FIGURA 13: FOTO DA MONTE VERSO VALLE E DA VALLE VERSO MONTE DI AREE DIVERSE DEL CANTIERE DI MONTESOVER. RISULTA EVIDENTE LA COPERTURA ERBACEA DIFFUSA QUASI OVUNQUE. SARA FAIT, LUGLIO 2024.....	55
FIGURA 14: FERITE DA IMPATTO CON MASSI SU TRONCO DI ABETE ROSSO, LATO A MONTE. SARA FAIT, AGOSTO 2024.....	57
FIGURA 15: MASSI INTERCETTATI DA PIANTE IN PIEDI NEL BOSCO INTEGRO A FIANCO DEL CANTIERE DI MONTESOVER. SARA FAIT, AGOSTO 2024.....	59
FIGURA 16: DISTRIBUZIONE DELLE DIMENSIONI DEI MASSI CADUTI E FERMATI ALL'INTERNO DEL CANTIERE DI MONTESOVER. LE DIMENSIONI DELLE BOLLE INDICANO LA TERZA DIMENSIONE DEI MASSI (PROFONDITÀ).	60
FIGURA 17: RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PER IL CANTIERE FORESTALE DI MONTESOVER. 95ESIMO PERCENTILE DELL'ENERGIA CINETICA DEI MASSI ESPRESSA IN KJ.....	64
FIGURA 18: RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PER IL CANTIERE FORESTALE DI MONTESOVER: NUMERO DI PASSAGGI DEI MASSI ALL'INTERNO DELLE CELLE DEL RASTER.....	65
FIGURA 19: RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PER IL CANTIERE FORESTALE DI MONTESOVER: PROBABILITÀ DI TRANSITO DEI MASSI ALL'INTERNO DELLE CELLE DEL RASTER (%)	66
FIGURA 20: FOTO DA VALLE VERSO MONTE DEL CANTIERE DI MALGA CAORE. SARA FAIT, SETTEMBRE 2024.	67
FIGURA 21: DISTRIBUZIONE DELLE DIMENSIONI DEI MASSI CADUTI E FERMATI ALL'INTERNO DEL CANTIERE DI MALGA CAORE. LE DIMENSIONI DELLE BOLLE INDICANO LA TERZA DIMENSIONE DEI MASSI (PROFONDITÀ).	69
FIGURA 22: RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PER IL CANTIERE FORESTALE DI MALGA CAORE: 95ESIMO PERCENTILE DELL'ENERGIA CINETICA DEI MASSI ESPRESSA IN KJ.....	71
FIGURA 23: RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PER IL CANTIERE FORESTALE DI MALGA CAORE: NUMERO DI PASSAGGI DEI MASSI ALL'INTERNO DELLE CELLE DEL RASTER.....	72

FIGURA 24: RISULTATI DELLE SIMULAZIONI PER IL CANTIERE FORESTALE DI MALGA CAORE: PROBABILITÀ DI TRANSITO DEI MASSI ALL'INTERNO DELLE CELLE DEL RASTER (%)	73
FIGURA 25: BOXPLOT RELATIVO AGLI INDICI BARI, MIRI E ORPI DEL CANTIERE DI MONTESOVER CALCOLATI PER I TRE DIVERSI SCENARI STUDIATI (F FORESTA INTEGRA, FM FORESTA CON TAGLI DIREZIONATI; FNM FORESTA SENZA TAGLI DIREZIONATI).	77
FIGURA 26: BOXPLOT RELATIVO AGLI INDICI BARI, MIRI E ORPI DEL CANTIERE DI MALGA CAORE CALCOLATI PER I TRE DIVERSI SCENARI STUDIATI (F FORESTA INTEGRA, FM FORESTA CON TAGLI DIREZIONATI; FNM FORESTA SENZA TAGLI DIREZIONATI).	78

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1: PRINCIPALI TEMPESTE DAGLI ANNI '60 AD OGGI (TORREGGIANI L., 2019 - ADATTATO).....	17
TABELLA 2: DISTRIBUZIONE DEL DANNO PER UDF (P.A.T. - A.Pro.Fo.D. - S.F., 2022).....	20
TABELLA 3: VOLUMI DANNEGGIATI DAL BOSTRICO SUL TERRITORIO PROVINCIALE - ANNI 2019-2023 (P.A.T. - S.F. PIANO BOSTRICO, 2024).....	25
TABELLA 4: DIECI RASTER MINIMI RICHIESTI DAL SOFTWARE ROCKYFOR3D (DORREN & SIMONI, 2014)	45
TABELLA 5: QUATTRO ULTERIORI RASTER RICHIESTI PER LE SIMULAZIONI CON FORESTA (DORREN & SIMONI, 2014).....	47
TABELLA 6: SCHEDA DI CAMPO PER LA RACCOLTA DEI DATI FORNITA DAL MANUALE DEL SOFTWARE ROCKYFOR3D.....	49
TABELLA 7: RASTER DI OUTPUT DEL SOFTWARE ROCKYFOR3D	51
TABELLA 8: DATI RACCOLTI PRESSO IL CANTIERE DI MONTESOVER.....	55
TABELLA 9: DIMENSIONI DEI MASSI CAMPIONATI A MONTESOVER.....	60
TABELLA 10: SINTESI DELLE PIANTE DIREZIONATE RILEVATE DURANTE LA RACCOLTA DATI PRESSO MONTESOVER.....	61
TABELLA 11: RISULTATI DELLE 1000 SIMULAZIONI PER OGNI SCENARIO NEL CANTIERE FORESTALE DI MONTESOVER.....	62
TABELLA 12: INDICI DI DUPIRE CALCOLATI PER OGNI SCENARIO E PER OGNI CHECKPOINT NEL CANTIERE FORESTALE DI MONTESOVER.....	63
TABELLA 13: DATI RACCOLTI PRESSO IL CANTIERE DI MALGA CAORE	68
TABELLA 14: DIMENSIONI DEI MASSI CAMPIONATI A MALGA CAORE.....	69
TABELLA 15: RISULTATI DELLE 1000 SIMULAZIONI PER OGNI SCENARIO NEL CANTIERE FORESTALE DI MALGA CAORE.....	74
TABELLA 16: INDICI DI DUPIRE CALCOLATI PER OGNI SCENARIO E PER OGNI CHECKPOINT NEL CANTIERE FORESTALE DI MALGA CAORE.....	74