



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI

Corso di Laurea in
Valorizzazione e Tutela dell'Ambiente e del Territorio Montano

Classe di Laurea
L-25 - Scienze e Tecnologie Agrarie e Forestali

TESI DI LAUREA

**Funzione protettiva
di una foresta di conifere in Valle Antigorio
nei confronti della caduta massi**

Relatore:
Prof. Giorgio VACCHIANO
Correlatore:
Dott. Sebastian BROCCO

Candidato:
Fabrizio SBRIGLIA
965274

Anno Accademico 2022/2023

A Chiara, a Lorenzo.

RIASSUNTO

La funzione protettiva è uno tra i diversi servizi ecosistemici che una foresta è in grado di fornire alla collettività. La protezione può essere esercitata sia indirettamente, mitigando i fenomeni di erosione del suolo (e le loro conseguenze), che direttamente, contrastando i pericoli naturali quali caduta massi, valanghe, lave torrentizie e scivolamenti superficiali, nel momento in cui questi rappresentino un fattore di rischio per l'incolumità di persone o beni ad esse riconducibili. Nelle dinamiche dei pericoli naturali è possibile identificare tre aree distinte quali la zona di distacco, la zona di transito e la zona di arresto, al cui interno può compiersi l'azione protettiva della foresta. La sua capacità di intervento è in funzione del tipo di pericolo e della zona in cui si localizza il popolamento forestale. Nel caso della caduta massi, l'efficacia protettiva si può verificare nella zona di distacco, ma soprattutto nella zona di transito, dove la foresta si interpone tra un potenziale pericolo e un potenziale danno a beni o persone. Al fine di implementare o mantenere questa capacità protettiva, la foresta deve essere sottoposta a trattamenti culturali mirati, indirizzati al raggiungimento di requisiti idonei allo scopo.

Nel presente elaborato si è valutata la capacità protettiva di un popolamento di conifere della Valle Antigorio, nella provincia del Verbano – Cusio – Ossola, attraverso l'elaborazione dei modelli spazio – temporali della caduta massi. Riproponendo il metodo applicato da Favillier et al. (2017) fondato sull'approccio dendogeomorfologico, si sono ricostruiti gli intervalli di ricorrenza (ossia i tempi di ritorno) degli impatti dei massi sui fusti di alberi appartenenti alle specie *Picea abies* e *Abies alba*. Gli impatti sono stati valutati grazie alla tecnica del conteggio delle ferite visibili sulle cortecce degli alberi, mappati in un'area rettangolare di 0.5 ha e ripartita virtualmente in cinquanta celle quadrate di lato pari a 10 m. In ogni cella è stato quindi calcolato il valore relativo all'intervallo di ricorrenza, definito dal rapporto tra l'età media delle piante e il numero di cicatrici osservate. Successivamente si è adeguato tale indice alla probabilità di impatto condizionale (CIP), parametro espresso in percentuale, utile a considerare nel calcolo anche i massi che non hanno impattato contro gli alberi (o che comunque non hanno cagionato ferite in seguito all'urto), definito

dal rapporto tra la lunghezza totale delle proiezioni dei cerchi d'impatto sul lato della cella parallelo alle isoipse e la lunghezza totale del lato stesso. Il valore del cerchio di impatto è definito dalla somma dei valori del raggio dell'albero e del raggio medio dei massi osservati. Tale metodo costituisce un'alternativa agli approcci dendrogeomorfologici tradizionali, basati sull'analisi microscopica delle anomalie di crescita negli anelli della pianta.

Lo studio si è articolato in diverse fasi. Inizialmente, si è mappata l'area rilevando la distanza e l'angolo di ogni pianta, rispetto a un punto di riferimento, mediante l'utilizzo di strumenti quali ipsometro e bussola galleggiante, traducendo successivamente i dati ottenuti in coordinate cartesiane. Gli stessi dati sono stati quindi elaborati tramite fogli di calcolo e un sistema GIS, convertendo le coordinate cartesiane in coordinate geografiche EPSG:3003. Durante i rilievi, sono state anche conteggiate le cicatrici visibili sulle piante, misurati i DBH (diametri a petto d'uomo) e prelevate carote incrementali (utilizzando la trivella di Pressler) per determinarne l'età. Attraverso modelli di regressione età - diametro è stata poi stimata l'età di ciascun esemplare. I dati raccolti sono stati quindi importati in software specifici come QGIS e R per la creazione di mappe e l'analisi dei dati. Infine, sono stati calcolati in R i due indici di intervallo di ricorrenza, semplice nel primo caso e adeguato al parametro di probabilità di impatto condizionale nel secondo caso (calcolato anch'esso in R, con il metodo delle matrici).

L'analisi dei risultati ha restituito un conteggio di 173 cicatrici osservate nelle cortecce di 127 alberi (su un totale di 228 esemplari mappati, rappresentati in gran parte dalla specie *Picea abies* e da una minor quantità di *Abies alba* e *Juglans regia*). Il rilievo dei DBH ha permesso di definire la struttura orizzontale della foresta, risultata essere tipica di una fustaia disetanea, mentre dagli anelli osservati sulle carote incrementali si sono ottenuti i modelli età - diametro, che hanno definito un'età media del popolamento pari a 53 anni.

La serie di dati raccolti ha permesso di rappresentare i valori degli intervalli di ricorrenza riferiti a ogni cella, geolocalizzati ed espressi nelle due forme precedentemente descritte, mettendo in evidenza in entrambi i casi l'esistenza di due direzioni preferenziali dei massi nella loro caduta. Dal confronto tra i due

indici è inoltre emersa la riduzione dei tempi di ritorno dovuta all'adeguamento dell'intervallo di ricorrenza al CIP (i cui valori non hanno superato in nessun caso la soglia del 47%), stimando quindi un numero maggiore di eventi in quelle celle: nel caso dell'indice non corretto, gli intervalli di ricorrenza calcolati variavano indicativamente da un minimo di 3 anni ad un massimo di 63, mentre con la correzione questi erano compresi all'incirca tra 1 e 23 anni. Ricorrendo al metodo Pearson si è infine accertata l'esistenza di una correlazione tra il numero di ferite osservate e il numero di alberi presenti: il calcolo in R di questo parametro ha restituito un valore di circa 0,49 che, in quanto positivo, ha confermato tale correlazione, dimostrando inoltre l'influenza del numero di alberi nella determinazione dell'indice CIP.

I risultati ottenuti sono stati in seguito confrontati con quelli relativi allo studio di riferimento, condotto da Favillier et al. (2017), e con quelli di un secondo studio (Žabota et al., 2020) avente lo stesso approccio. Questa comparazione ha fatto emergere numerose divergenze quali, ad esempio, l'influenza del tipo di popolamento sulla visibilità delle ferite (conifere nel caso in oggetto, latifoglie negli altri due casi), il numero di ferite osservate e la densità del popolamento stesso.

L'analisi dei risultati, ha definito successivamente gli interventi selvicolturali necessari per indirizzare la foresta verso le esigenze minime richieste per l'espletamento della funzione protettiva (Berretti et al., 2006), consistenti principalmente nell'aumento della densità di popolamento nelle zone soggette ad una frequenza maggiore di eventi, oltre ad altre pratiche utili allo scopo. In tali aree si sono infatti contati 19 alberi, corrispondenti ad una densità di 254 piante/ha, inferiore al valore di 400 piante/ha richiesto dalle cure minime.

Infine, sono stati evidenziati gli aspetti positivi dell'approccio, quali ad esempio la praticità delle operazioni, il basso impatto economico e l'attendibilità dei risultati e, allo stesso tempo, si sono analizzati i limiti emersi, come ad esempio le sottostime e le sovrastime degli eventi determinati dalla visibilità delle ferite, dalla consistenza della corteccia e dall'energia e dal diametro dei massi.

INDICE

1. INTRODUZIONE – FORESTE DI PROTEZIONE DIRETTA.....	6
1.1. GENERALITÀ.....	6
1.2. PERICOLO NATURALE E RISCHIO.....	7
1.3. PERICOLI NATURALI.....	8
1.3.1. <i>Caduta massi.....</i>	<i>8</i>
1.3.2. <i>Scivolamenti superficiali.....</i>	<i>10</i>
1.3.3. <i>Valanghe e lave torrentizie.....</i>	<i>11</i>
1.4. FORESTE E STABILITÀ.....	12
1.4.1. <i>Pericoli naturali: esigenze di stabilità e selvicoltura.....</i>	<i>13</i>
1.4.1.1. <i>Caduta massi.....</i>	<i>13</i>
1.4.1.2. <i>Lave torrentizie e scivolamenti superficiali.....</i>	<i>14</i>
1.4.1.3. <i>Valanghe.....</i>	<i>15</i>
1.5. FORESTE DELLA REGIONE PIEMONTE.....	15
1.5.1. <i>Evoluzione storica.....</i>	<i>16</i>
1.5.2. <i>Aspetti normativi nazionali e regionali.....</i>	<i>17</i>
1.6. VALUTAZIONE DEL RUOLO PROTETTIVO DELLE FORESTE NEI CONFRONTI DELLA CADUTA MASSI.....	18
1.7. OBIETTIVI DELLO STUDIO.....	20
2. MATERIALI E METODI.....	22
2.1. SITO DI STUDIO.....	22
2.1.1. <i>Pendenza.....</i>	<i>24</i>
2.1.2. <i>Categoria e Tipo Forestale.....</i>	<i>24</i>
2.1.3. <i>Piano di Gestione Forestale.....</i>	<i>25</i>
2.1.4. <i>Suolo e substrato.....</i>	<i>28</i>
2.1.5. <i>Clima.....</i>	<i>29</i>
2.2. MATERIALI E STRUMENTI INFORMATICI.....	31
2.3. METODI.....	35
2.3.1. <i>Individuazione sito.....</i>	<i>35</i>
2.3.2. <i>Confinamento area totale.....</i>	<i>36</i>
2.3.3. <i>Confinamento celle.....</i>	<i>37</i>
2.3.4. <i>Mappatura alberi – Misura diametri – Conteggio ferite.....</i>	<i>38</i>
2.3.5. <i>Succhiellamenti e stima età.....</i>	<i>42</i>
2.3.6. <i>Stima dell'intervallo di ricorrenza.....</i>	<i>43</i>
2.3.7. <i>Calcolo della probabilità di impatto condizionale (CIP) e stima del tempo di ritorno.....</i>	<i>44</i>
2.3.8. <i>Modalità di calcolo e di stima degli indici.....</i>	<i>46</i>
3. RISULTATI.....	54
3.1. MAPPATURA.....	55
3.2. STIMA DELL'ETÀ.....	56
3.3. DESCRIZIONE DELLA STAZIONE FORESTALE.....	58
3.4. CADUTA MASSI E MODELLI SPAZIO – TEMPORALI.....	62
4. DISCUSSIONE.....	68
5. CONCLUSIONI.....	73
6. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	75
6.1. BIBLIOGRAFIA.....	75
6.2. SITOGRAFIA.....	77
RINGRAZIAMENTI.....	79

1. INTRODUZIONE – FORESTE DI PROTEZIONE DIRETTA

1.1. Generalità

La superficie forestale italiana, secondo l'indagine condotta nell'ultimo Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio (INFC), occupa il 36,7% del territorio nazionale (Gasparini et al., 2022). Nel 2015 la copertura forestale rilevata nell'inventario era infatti pari a 11.054.458 ha (di cui circa un terzo di proprietà pubblica), per la maggior parte caratterizzati da boschi e, in minor quantità, da terre boscate. A livello territoriale, i tassi di copertura maggiori ad opera di boschi si sono registrati in Liguria e nella Provincia autonoma di Trento, mentre quelli minori in Puglia.

Come tutte le foreste del pianeta, anche le foreste italiane si definiscono multifunzionali, in quanto fornitrici delle tre macrocategorie di servizi ecosistemici: fornitura di beni (alimenti, acqua, legno), di regolazione (clima, acque, inquinamento) e culturali (tempo libero, estetica, storia). Tra i servizi ecosistemici di regolazione si annovera la funzione protettiva svolta dalle foreste, in particolar modo quelle presenti nell'arco alpino, principalmente dai fenomeni di dissesto idrogeologico (Piusi e Alberti, 2015).

Il concetto di protezione, caratterizzato da diversi aspetti, può essere classificabile in due macrocategorie: la protezione generica e la protezione diretta (Piusi e Alberti, 2015). La protezione generica, o indiretta, viene svolta da tutte le foreste nei confronti del suolo: la presenza delle chiome garantisce infatti l'intercettazione delle precipitazioni, moderando l'intensità e l'apporto di acqua al suolo. Grazie all'intercettazione (Gisotti, 2020) si riducono, da un lato, i fenomeni di erosione superficiale; dall'altro, si garantisce un tasso di infiltrazione nel suolo tale da evitarne la rapida saturazione (saturazione che ha come conseguenza la formazione di deflussi superficiali, che possono dare origine a fenomeni di dissesto, più o meno intensi, oltre all'insorgere di scivolamenti superficiali).

La funzione di protezione diretta, invece, richiede la presenza simultanea di tre elementi caratteristici ben definiti (Berretti et al., 2006):

- un pericolo, di origine naturale, che può potenzialmente cagionare un danno
- la presenza umana (e tutto ciò ad essa legata, es. strade, abitazioni, infrastrutture, ecc.), oggetto del potenziale danno, cagionato dal pericolo naturale
- una foresta, che si interpone tra il pericolo naturale e l'obiettivo potenzialmente danneggiabile, con la funzione di mitigare e/o prevenire gli effetti del danno.

La funzione protettiva garantisce quindi all'uomo, da secoli, la possibilità di potersi insediare e di poter sviluppare le proprie comunità nelle aree poste a valle dei versanti montani, in particolare quelli alpini, garantendo protezione dai pericoli naturali (Motta e Haudemand, 2000).

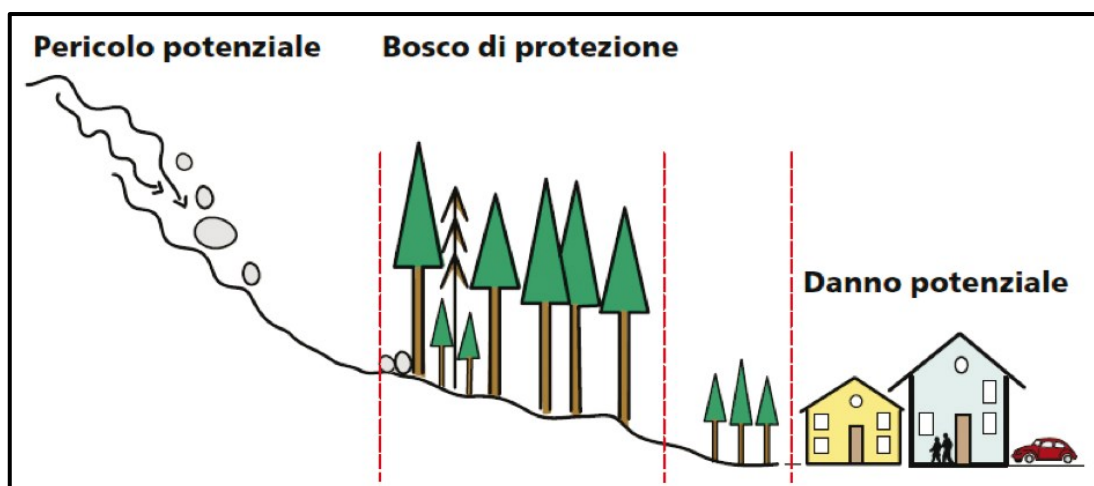


Figura 1 - Rappresentazione di una foresta di protezione, interposta tra un pericolo e un danno potenziale (fonte: Piussi e Alberti, 2015).

1.2. Pericolo naturale e rischio

Si definisce pericolo naturale un processo che può potenzialmente sviluppare conseguenze negative per l'uomo e per l'ambiente (Piussi e Alberti, 2015). Al pericolo naturale è strettamente connesso il concetto probabilistico di pericolosità, determinato da due fattori principali: un'area in cui il pericolo si può manifestare e una probabilità temporale, definita tempo di ritorno (Berretti et al.,

2006). Per tempo di ritorno si intende un intervallo di tempo medio all'interno del quale un evento di una determinata entità si manifesti una sola volta (Ferro, 2013).

Il pericolo, nel momento in cui viene a manifestarsi in aree dove è insediato l'uomo (o le sue attività), compromettendone l'incolumità, si trasforma in fattore di rischio (Berretti et al., 2006). Si definisce quindi il rischio come il prodotto tra la pericolosità e il potenziale danno atteso (vulnerabilità).

La funzione di protezione diretta delle foreste agisce sulla limitazione del rischio, con azioni preventive oppure di mitigazione: le prime impediscono che il pericolo si manifesti, mentre le seconde agiscono quando questo si è palesato, riducendone l'intensità o la durata.

1.3. Pericoli naturali

1.3.1. Caduta massi

Uno dei pericoli più frequenti che interessano le aree montane è rappresentato dalla caduta massi. Rocce affioranti o pareti rocciose, soggette all'azione di eventi atmosferici e naturali in genere, possono subire alterazioni morfologiche, con conseguente distacco di massi, i quali tenderanno a muoversi rotolando verso valle (Varnes, 1978).

Tra gli agenti naturali principali di queste alterazioni troviamo la pioggia, l'effetto gelo - disgelo e l'accrescimento radicale delle piante, oltre alle caratteristiche chimico - fisiche della roccia stessa.

Il fenomeno della caduta massi coinvolge tre aree ben definite (Dorren et al., 2007):

- Zona di distacco, dal quale i massi si originano separandosi da pareti o da rocce affioranti, con pendenze superiori a 30°. In quest'area, la funzione protettiva della foresta agisce a livello del suolo, mediante le radici, le quali svolgono un'azione di stabilizzazione delle rocce. In certi casi, però, sono le radici stesse a originare il movimento dei massi in quanto, a causa del loro accrescimento, tendono ad alterare la stabilizzazione che loro stesse contribuiscono a garantire.

- Zona di transito, l'area del versante caratterizzata da inclinazioni, anche in questo caso, superiori a 30° , dove i massi si muovono rotolando secondo le linee di pendenza. In caso di inclinazione superiore a 35° , non si verifica il rotolamento dei massi, ma questi tendono a rimbalzare con traiettorie poco prevedibili. La presenza di popolamenti forestali, insediati nella zona di transito, può costituire un ostacolo al movimento dei massi, intercettandone la traiettoria; il grado di intercettazione varia in funzione delle caratteristiche del popolamento (densità, distribuzione diametrica, struttura orizzontale, ecc.), del volume dei massi e del numero di urti subiti dalle piante nel tempo (che possono ridurre la resistenza della pianta stessa). A causa delle pendenze elevate, difficilmente nella zona di transito si verifica l'arresto del masso in movimento: nella maggior parte dei casi, la funzione della foresta è quella di dissiparne in parte l'energia cinetica posseduta, agendo sulla velocità, in maniera tale da farlo arrestare una volta raggiunte pendenze inferiori.
- Zona di deposito, caratterizzata da pendenze inferiori a $25^\circ - 30^\circ$, all'interno della quale i massi tendono a dissipare totalmente la propria energia cinetica, fino ad arrestarsi. In quest'area, i massi tendono ad accumularsi, costituendo a loro volta un ulteriore ostacolo per quelli che sopraggiungono successivamente. La scarsa energia posseduta dai massi in questo punto consente, anche a piante dal diametro contenuto, l'arresto di elementi aventi grandi dimensioni.

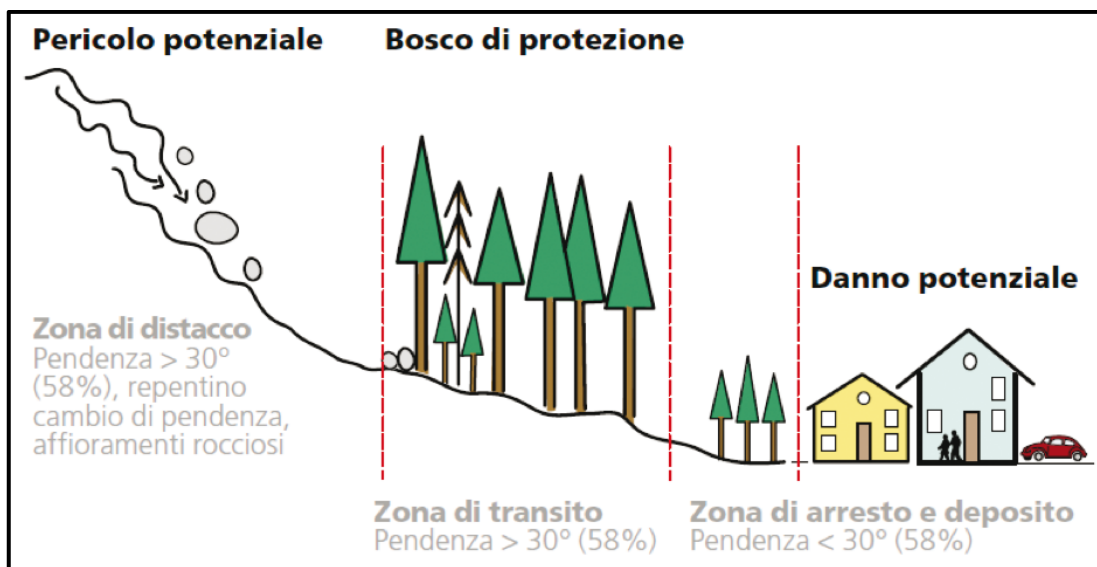


Figura 2 – Indicazione delle zone di distacco, transito e arresto/deposito con relative pendenze, riferite alla Figura 1 (fonte: Piussi e Alberti, 2015).

1.3.2. Scivolamenti superficiali

Lo scivolamento superficiale (Gisotti, 2020) consiste nello scorrimento di una parte di suolo che avviene al di sopra di un piano, detto appunto piano di scivolamento. Questo movimento si origina nel momento in cui si verifica la rottura dell'equilibrio esistente tra la componente della forza peso parallela alla pendenza, applicata sulla superficie, detta tensione di taglio, e la tensione che si oppone alla tensione di taglio.

Questo equilibrio è determinato dalla pendenza del versante, dalle sue caratteristiche pedologiche quali la forza peso esercitata, la coesione tra le particelle (determinata a sua volta dalla tessitura) e, infine, dalla pressione esercitata dall'acqua presente nei pori del suolo. È proprio in relazione a quest'ultimo aspetto che è possibile comprendere le modalità con cui la foresta garantisce protezione dagli scivolamenti superficiali. In occasione di una precipitazione, parte della pioggia sarà infatti intercettata dalle chiome, che riducono sia la quantità d'acqua che giunge al suolo, sia l'intensità della precipitazione al di sotto delle chiome stesse. L'acqua che si infiltra nel suolo tende ad occupare i pori disponibili, esercitando una pressione interstiziale tra le particelle. Questa pressione contribuisce a ridurre notevolmente la tensione resistente al taglio, favorendo la formazione degli scivolamenti.

La presenza di popolamenti forestali, grazie all'interazione tra il suolo e le radici degli alberi, determina un aumento della tensione resistente in quanto contribuisce ad aumentare la coesione delle particelle del suolo (coesione radicale) e riduce la quantità di acqua nei pori, grazie all'assorbimento radicale e alla successiva traspirazione.

Risulta evidente che, relativamente a questo tipo di pericolo, la foresta può esercitare la sua funzione protettiva principalmente nella zona di distacco, mentre nella zona di transito questa è meno efficace.

Per i piani di scivolamento che si localizzano negli strati più profondi del suolo, l'azione protettiva della foresta risulta essere inefficace, anche nella zona di distacco.

1.3.3. Valanghe e lave torrentizie

Si definisce valanga (Berretti et al., 2006) il movimento rapido di una massa nevosa, avente volume superiore a 100 m³ e lunghezza non inferiore a 50 m. Tra i fattori predisponenti le valanghe si possono individuare le caratteristiche fisiche, geo - pedologiche e morfologiche del versante e le caratteristiche del manto nevoso (spessore, struttura). Sul manto, nel momento in cui subisce alterazioni del suo equilibrio e in caso di pendenze maggiori di 30°, può formarsi la cosiddetta "linea di rottura", dando luogo al distacco di una massa nevosa consistente che, mettendosi in movimento, dà origine alla valanga.

Analogamente alla caduta massi, anche per le valanghe si individuano le stesse tre zone di interesse: distacco, transito e arresto. Le caratteristiche della foresta (densità, distribuzione diametrica, struttura orizzontale, ecc.) risultano efficaci per la funzione protettiva solo all'interno della zona di distacco, in quanto l'energia posseduta da una massa nevosa in movimento risulta essere molto maggiore rispetto alla capacità del bosco di dissiparla.

Le lave torrentizie (Wendeler, 2016) sono invece caratterizzate da colate detritiche, consistenti in una miscela di acqua e materiale solido che si mette in movimento.

I fattori determinanti le lave torrentizie sono rappresentati principalmente dall'intensità di precipitazione, dalla capacità di intercettazione della pioggia da

parte delle piante e dal grado di infiltrazione dell'acqua nel suolo. In caso di eccessivo o rapido apporto di acqua nel suolo, si può verificare una saturazione di questo: l'acqua defluisce quindi in superficie, inglobando potenzialmente materiale in quantità sempre maggiori, dando origine alla colata.

Il contributo della foresta (Berretti et al., 2006), in termini di protezione dalle lave torrentizie, si manifesta a livello di suolo (aumento di porosità e permeabilità superficiale), di stabilità dei versanti (coesione radicale) e di intercettazione diretta della colata ad opera dei fusti.

1.4. Foreste e stabilità

Come accade in qualsiasi ecosistema, anche le foreste di montagna sono esposte a cambiamenti, più o meno rapidi, in particolare per ciò che riguarda la struttura e la funzionalità. Questi cambiamenti sono determinati da eventi ampiamente dilazionati nel tempo, come il semplice accrescimento degli alberi o, come spesso accade, da disturbi repentini, di origine naturale come gli uragani, ma anche di origine antropica (Berretti et al., 2006). Questi eventi determinano il ciclo della foresta, costituito da un arco temporale più o meno ampio, che vede l'origine con il suo insediamento e la fine con il crollo della foresta stessa. È possibile definire la foresta montana un ecosistema stabile dal punto di vista ecologico, qualora i disturbi che subisce non siano di origine antropica o determinati da eventi naturali di notevole rilevanza.

Il concetto di stabilità ecologica della foresta si riconduce a due aspetti fondamentali: la resistenza e la resilienza (Berretti et al., 2006). La prima consiste nella capacità della foresta di opporsi a un disturbo; la seconda, invece, si traduce nella sua capacità di riacquisire le caratteristiche possedute precedentemente al manifestarsi del disturbo. Disturbi naturali frequenti sono rappresentati da vento, neve, movimenti di massa (scivolamenti superficiali, caduta massi, lave torrentizie, ecc.) e, in maniera più localizzata, da incendi e pullulazione di insetti (xilofagi e/o fillofagi).

È opportuno specificare che la stabilità ecologica della foresta è sempre riferita ad un intero ecosistema, e non al singolo popolamento: quest'ultimo è infatti soggetto inevitabilmente a ciclici crolli causati dai disturbi naturali; se questi

sono circoscritti ad un singolo popolamento (o a poche unità), la stabilità complessiva dell'ecosistema non è alterata (Berretti et al., 2006).

1.4.1. Pericoli naturali: esigenze di stabilità e selvicoltura

Al fine di poter svolgere in maniera efficiente la funzione protettiva, è opportuno che la foresta posseda determinate caratteristiche, adeguate al tipo di pericolo per il quale è preposta a proteggere. Queste caratteristiche variano, non soltanto in base al pericolo stesso, ma anche a seconda della zona che interessa l'evento. Per raggiungere questi requisiti, definiti "esigenze minime", sono necessarie pratiche selvicolturali specifiche e puntuali, precedute da valutazioni generalmente eseguite per aree di saggio (Wasser et al., 1996; Berretti et al., 2006).

1.4.1.1. Caduta massi

Come anticipato nel paragrafo 1.3.1, l'azione delle radici nella zona di distacco può avere effetti sia positivi che negativi: se da un lato queste esercitano un'azione di stabilizzazione delle rocce, dall'altro possono essere causa di disgregazione delle stesse ad opera delle radici di maggiori dimensioni. Inoltre, sradicamenti di alberi possono innescare la messa in movimento di massi verso valle. Gli interventi selvicolturali (Berretti et al., 2006) nella zona di distacco sono quindi mirati alla rimozione delle piante instabili e di quelle aventi maggiori dimensioni. Nella zona di transito, sono di peculiare rilevanza il diametro minimo efficace, ai fini della dissipazione di energia posseduta dal masso in movimento, e il numero di piante presenti. Questi due aspetti sono influenzati dalla specie a cui appartengono le piante e da molteplici fattori quali pendenza del versante, forma e dimensione dei massi, tipo di suolo. Diametri di elevate dimensioni sono in grado di interferire con massi dal volume maggiore, mentre per massi meno voluminosi sono sufficienti diametri inferiori. Il diametro influenza anche la densità di popolamento, in quanto a diametri minori corrispondono densità maggiori. Relativamente alle pendenze, in caso di inclinazioni elevate ($>30^\circ$), è opportuno limitare l'apertura di buche di lunghezza consistente, per contenere l'accelerazione dei massi che verrebbero a trovarsi su un percorso in assenza di

ostacoli. Nella zona di transito, le operazioni selvicolturali sono quindi mirate all'aumento degli ostacoli per i massi che la attraversano; l'obiettivo è quello di aumentare i diametri delle piante, unitamente ad una gestione degli esemplari abbattuti, i quali vengono lasciati al suolo e disposti in posizione obliqua rispetto alle linee di pendenza, al fine di deviare e/o arrestare il movimento dei massi, aumentando al tempo stesso la rugosità del suolo.

Nella zona di arresto, infine, si possono considerare fattori analoghi a quelli descritti per la zona di transito; in questo caso, però, si registrano pendenze inferiori, motivo per il quale anche alberi dal diametro ridotto possono essere efficaci a ridurre l'energia cinetica posseduta dai massi. Le attività selvicolturali possono quindi essere indirizzate all'aumento della densità anche di alberi dal diametro ridotto (compresi i ricacci dalle ceppaie), e all'impiego di legname abbattuto e lasciato al suolo.

1.4.1.2. Lave torrentizie e scivolamenti superficiali

La protezione da questi dissesti (Berretti et al., 2006), ad opera dei boschi, è perseguibile principalmente nella zona di distacco grazie al grado di copertura delle chiome, il quale garantisce maggior intercettazione delle precipitazioni, favorendo una migliore infiltrazione nel suolo che limita lo sviluppo di deflussi superficiali. Un ulteriore contributo è fornito dagli apparati radicali, i quali aumentano il grado di porosità del suolo, evitandone la rapida saturazione. Inoltre, l'azione stabilizzante operata dalle radici si contrappone all'innesco degli scivolamenti superficiali, in particolar modo negli orizzonti prossimi alle superfici; a profondità maggiori, l'azione protettiva della foresta risulta inefficiente allo scopo.

Gli interventi selvicolturali (Berretti et al., 2006) sono quindi mirati, innanzitutto, a favorire una struttura verticale pluristratificata in superfici limitate, con un'alta copertura da parte delle chiome, in modo da ottenere una stratificazione anche a livello radicale. Un altro intervento rilevante riguarda la rimozione di piante di elevate dimensioni (in quanto maggiormente soggette a schianti), che può considerarsi soluzione perseguibile qualora non determini aperture troppo elevate, atte a favorire la formazione di deflussi superficiali o la rapida

saturazione del suolo. Inoltre, una simmetria delle chiome il più possibile regolare contribuisce ad una maggiore stabilità degli alberi (questo aspetto è funzionale, in generale, per tutti i tipi di pericolo). Di notevole importanza è la rimozione delle piante atterrate nei pressi dell'alveo di torrenti, anche effimeri, in quanto costituenti un potenziale ostacolo al normale flusso dell'acqua in caso di eventi meteorici intensi, oltre a rappresentare una fonte di possibile alimentazione della lava torrentizia. Opportuno favorire, infine, gli interventi selvicolturali a protezione delle sponde, come la messa a dimora di specie flessibili, quali i salici.

1.4.1.3. Valanghe

Nel paragrafo 1.3.3 si è precisato che il ruolo protettivo della foresta nei confronti di valanghe si espleta esclusivamente nella zona di distacco. Nel caso in cui la zona di distacco sia localizzata oltre il limite superiore del bosco, è necessario ricorrere all'installazione di strutture quali paravalanghe e treppiedi oppure, laddove possibile, valutare eventuali rimboschimenti.

Al fine di limitare la possibilità che la linea di rottura del manto nevoso si generi all'interno della foresta, è opportuno valutare diversi fattori quali lo spessore dello strato di neve, l'irraggiamento del sole, la velocità del vento e l'eventuale presenza di legname al suolo (Berretti et al., 2006). Risulta necessario, quindi, indirizzare la foresta verso una composizione specifica mista, con maggior presenza di conifere ad aghi persistenti, mantenendo una discreta copertura, limitando le aperture e collocando al loro interno le eventuali piante abbattute, disposte in diagonale rispetto alla pendenza (Berretti et al., 2006). Alberi aventi chiome profonde garantiscono, infine, maggior stabilità in termini di ancoraggio.

1.5. Foreste della Regione Piemonte

Secondo il rapporto redatto dalla Regione Piemonte disponibile sul sito istituzionale, nel 2016 la superficie regionale coperta da foreste corrispondeva a circa il 37% della superficie totale, in linea con quanto rilevato dall'inventario INFC (Gasparini et al., 2022) che quantificava in 890.433 ha la superficie forestale, escludendo le aree boscate. Di questi, circa 588.260 si collocavano nelle

aree situate oltre i 500 m di altitudine, per la maggior parte nella catena alpina occidentale e, in minima parte, nella frazione appenninica. Le categorie maggiormente presenti erano riconducibili a castagneti e faggete (circa 280.770 ha assieme), seguiti dai lariceti - cembrete (circa 80.060 ha, in gran parte costituiti da *Larix decidua*). Circa 65.179 ha erano costituiti dall'insieme di peccete, abetine e altre categorie riferite a conifere. Per ciò che concerne la destinazione funzionale, è emerso che a solamente 8.710 ha era attribuita la funzione esclusivamente protettiva, sia diretta che indiretta. Dal punto di vista della gestione si è infine riscontrato che 469.206 ha erano governati a fustaia e 322.639 ha a ceduo.

1.5.1. Evoluzione storica

Le foreste montane, nel corso della storia, hanno sempre influenzato la vita dell'uomo nelle aree alpine piemontesi, in quanto fondamentali per la fornitura di numerosi servizi, come ad esempio la funzione produttiva (legname da ardere, da opera o impiegata in attività artigianali), il pascolo e, chiaramente, la protezione dai pericoli naturali.

Nonostante l'intenso sfruttamento delle foreste da parte dell'uomo, che ne ha cagionato un'alterazione delle caratteristiche fondamentali quali estensione, composizione specifica e struttura orizzontale, l'importanza della funzione protettiva non è mai stata considerata secondaria; risalgono infatti al periodo medievale le prime disposizioni legislative a tutela del ruolo protettivo delle foreste (Berretti et al., 2006). Si trattava principalmente di documenti, bandi e editti in cui si disponeva il divieto di taglio nelle foreste alle quali era attribuita una funzione protettiva, limitandone talvolta anche il pascolamento. Nei secoli successivi, a causa dell'eccessiva deforestazione di superfici da destinare all'agricoltura, si iniziarono a definire le prime mappe tematiche, le quali identificavano le aree forestali "bandite", destinate alla funzione protettiva, distinguendole dalle aree forestali impiegate per scopi produttivi.

Sotto il dominio dei Savoia, con le Regie Patenti del 1822, venne istituita in Piemonte l'Autorità Forestale, il cui compito era quello di vigilare a livello territoriale, al fine di proteggere i boschi banditi, dettando vincoli e norme molto

restrittive, anche per i boschi appartenenti a privati (Berretti et al., 2006). Con i successivi atti normativi, i vincoli divennero meno restrittivi, determinando un maggiore sfruttamento delle foreste, che si protrasse fino agli anni seguenti la Seconda Guerra Mondiale, allo scopo di massimizzare la produzione di legname, seppur mediante l'impiego di criteri selvicolturali (Berretti et al., 2006). A causa di questa modalità di gestione, anche il ruolo protettivo delle foreste subì notevoli alterazioni.

Nei decenni successivi al conflitto bellico si è sviluppato un approccio gestionale che ha garantito una minor pressione antropica sulle foreste, anche grazie all'introduzione di modelli elaborati dagli enti preposti in materia. In senso opposto, lo sviluppo territoriale delle aree montane (in termini di infrastrutture di vario genere) ha attribuito, di fatto, un ruolo protettivo a quelle foreste che in precedenza non lo possedevano, la cui gestione avveniva (e avviene tutt'ora) con modalità non idonee al mantenimento del ruolo stesso (Berretti et al., 2006).

1.5.2. Aspetti normativi nazionali e regionali

Dal punto di vista normativo, fino al 2018 non esisteva una legge aggiornata per il settore forestale, essendo il Regio Decreto 3267 del 1923 l'unico riferimento in vigore (c.d. Legge "Serpieri"). All'interno del decreto si individuava un vincolo per scopi idrogeologici, che finì per comprendere anche altri scopi quali la protezione da pericoli naturali (massi, valanghe, ecc.) riconoscendo e normando, di fatto, il ruolo protettivo delle foreste.

Con il D.P.R. 11/1972 e il D.P.R. 616/1977, le competenze in materia di foreste vennero trasferite dallo Stato alle Regioni, le quali istituirono le strutture preposte alla loro gestione, con i relativi modelli.

Di rilevanza nel settore forestale sono stati la legge 752/1986 e il Decreto Legislativo 227/2001: la prima ha permesso la redazione del Piano Forestale Nazionale (separandolo da quello Agricolo), incrementando la considerazione del bosco ai fini protettivi; il secondo ha recepito, invece, gli accordi europei in ambito forestale, definendone una gestione sostenibile, a tutela della biodiversità e della pubblica incolumità.

La modifica del Titolo V della Costituzione (L. Cost. 3/2001) ha conferito la competenza legislativa alle regioni per tutti gli ambiti non attribuiti allo Stato, tra cui il settore forestale.

L'entrata in vigore del Decreto Legislativo 34/2018 ("Testo unico in materia di foreste e filiere forestali") ha sancito, per la prima volta dal 1923, un radicale cambiamento dal punto di vista normativo per il settore forestale nazionale, diventando lo strumento legislativo di riferimento. Nel decreto, il bosco di protezione diretta viene definito nell'articolo 3, comma 2, lettera r).

r) bosco di protezione diretta: superficie boscata che per la propria speciale ubicazione svolge una funzione di protezione diretta di persone, beni e infrastrutture da pericoli naturali quali valanghe, caduta massi, scivolamenti superficiali, lave torrentizie e altro, impedendo l'evento o mitigandone l'effetto;

Figura 3 - Estratto G.U. 92 - 20/04/2018 pag. 3 - Definizione di bosco di protezione diretta

Nella Regione Piemonte, infine, oltre alla legge nazionale, si fa riferimento alla Legge Regionale 4/2009 ("Gestione e promozione economica delle foreste") e al regolamento attuativo del relativo articolo 13 (D.P.G.R. 8R/2011). La legge, all'articolo 8, individua tre livelli di pianificazione: Regionale (PFR – Piano Forestale Regionale), Territoriale (PFIT – Piano Forestale di Indirizzo Territoriale, ex PFT) e Aziendale (PGF – Piano di Gestione Forestale, ex PFA – Piano Forestale Aziendale). In particolare, nel Piano Forestale di Indirizzo Territoriale (PFIT), viene riconosciuta e sottolineata l'importanza della funzione protettiva e le norme tecniche per la salvaguardia e il mantenimento della stessa.

1.6. Valutazione del ruolo protettivo delle foreste nei confronti della caduta massi

L'analisi del ruolo protettivo operato dalle foreste, in particolare nei confronti della caduta massi, è oggetto di numerose valutazioni, ognuna delle quali basata su differenti approcci e metodologie.

Una modalità frequentemente utilizzata nella valutazione di questo pericolo, ma generalmente in molti pericoli naturali, è quella relativo alla relazione

probabilistica esistente tra la magnitudo e la sua frequenza di accadimento (Varnes, 1984). Tale relazione si basa sui dati storici di eventi dello stesso tipo accaduti nel passato (Hungar et al., 1999; Dussauge-Pessier et al., 2002), spesso però non riportati nella loro completezza all'interno dei registri disponibili (Sass e Oberlechner, 2012), motivo per cui, nel tempo, si è fatto ricorso ad approcci alternativi. Tra questi possono essere citate le analisi effettuate con l'ausilio della tecnologia di scansione laser (Abellán et al., 2010; D' Amato et al., 2015) o la derivazione delle frequenze di insorgenza da osservazioni visive a lungo termine delle pareti rocciose (Matsuoka, 2008; Hantz et al., 2014).

Un metodo ritenuto affidabile e soddisfacente, dal punto di vista dei risultati, è quello dendrogeomorfico (Stoffel et al., 2013); l'approccio si basa sul principio che le piante, in conseguenza degli urti subiti dai massi, sviluppano risposte nella loro crescita (Alestalo, 1971; Shroder, 1978), rilevabili dall'esame degli anelli di crescita (Stoffel e Bollschweiler, 2008; Stoffel et al., 2010;). I primi studi in tale direzione erano caratterizzati da tecniche invasive, basate sull'analisi della sezione intera del fusto, principalmente effettuate su specie di conifere (Gsteiger, 1989, 1993; Schweingruber, 1996; Stoffel, 2005a, 2005b, 2006; Stoffel e Perret, 2006); nel corso degli anni successivi le ricerche hanno invece proposto modalità differenti, fondate sullo studio delle carote incrementali, tecniche meno invasive e con approcci analitici più accurati ed estesi, che hanno consentito, inoltre, l'applicabilità a foreste maggiormente estese in termini di superficie e quantità di alberi presenti (Stoffel et al., 2005). Tuttavia, il metodo basato sull'analisi degli anelli, seppur estremamente puntuale, è risultato essere dispendioso in termini di risorse e di tempo.

Una valida alternativa, caratterizzata anch'essa da un approccio dendrogeomorfico ed emersa soltanto in tempi recenti (Šilhán et al., 2013; Trappmann et al., 2013, 2014), è rappresentata dal metodo del conteggio delle cicatrici visibili sul fusto degli alberi, cagionate dall'impatto dei massi in caduta. Il primo studio (Trappmann et al., 2013), condotto in Austria su specie di *Picea abies* e *Fagus sylvatica*, ha quindi avuto come obiettivo il calcolo dell'intervallo di ricorrenza degli impatti dei massi sui fusti, definito anche tempo di ritorno, utilizzato per la valutazione di gran parte dei rischi naturali e rappresentante il

tempo medio che intercorre tra due eventi di pari entità. Tale metodo, benché meno preciso rispetto alle modalità basate sull'analisi degli anelli, si è rivelato essere sufficientemente attendibile e, allo stesso tempo, meno impegnativo dal punto di vista dell'impiego di risorse e di tempo (Trappmann et al., 2013).

Sulla base del metodo del conteggio delle ferite, Favillier et al., (2017) hanno condotto uno studio in una foresta localizzata nella regione Auvergne Rhône-Alpes sulle Alpi Francesi, soggetta a frequenti eventi geomorfologici. La conseguente pubblicazione, denominata "*Dendrogeomorphic assessment of rockfall recurrence intervals at Saint Paul de Varces, Western French Alps*", ha avuto lo scopo di valutare le stime relative agli intervalli di ricorrenza degli impatti dei massi sugli alberi, in un'area delimitata e suddivisa in celle, posta all'interno di un popolamento forestale di latifoglie, composta principalmente da specie quali *Quercus pubescens* e *Acer opalus*. Nello studio, sono stati confrontati due indici di intervallo di ricorrenza, stimati in maniera differente: un primo metodo, ponendo in relazione l'età media degli alberi di una cella e la somma del numero di ferite osservate sugli stessi; in un secondo metodo è stato invece adeguato lo stesso indice con l'applicazione del parametro della probabilità di impatto condizionale (Moya et al., 2010b), al fine di considerare anche la quantità di massi che non avevano impattato contro gli alberi, in grado quindi di attraversare la foresta. Approcci analoghi sono stati successivamente applicati da Žabota et al. (2020) in una faggeta localizzata sulle Alpi Giulie, in territorio sloveno.

1.7. Obiettivi dello studio

Nel presente elaborato si è riproposta l'applicazione del metodo di Favillier et al., (2017) all'interno di un'area rettangolare di 0,5 ha, suddivisa virtualmente in 50 celle, individuata e delimitata in un popolamento di conifere (*Picea abies* e *Abies alba*), localizzata nel territorio comunale di Crodo, provincia del Verbano – Cusio – Ossola.

Lo studio ha avuto come obiettivo la ricostruzione dei modelli spazio – temporali relativi al fenomeno della caduta massi all'interno del sito, caratterizzati da una mappatura degli indici di intervallo di ricorrenza (tempo di ritorno), definiti per

ogni cella interna all'area. In un primo momento si è stimato un indice semplice, mettendo in relazione l'età media delle piante costituenti la cella e il numero totale delle ferite osservate sui fusti degli alberi interni alla cella stessa (cagionate dall'impatto dei massi). Successivamente è stato ricalcolato lo stesso indice considerando nella relazione anche la quota parte di massi che, a causa di non - impatti (o comunque di impatti non sufficientemente energici), non hanno lasciato ferite visibili su fusti nella loro discesa. Tale adeguamento è stato perseguito facendo ricorso all'impiego di un ulteriore indice, costituito dalla probabilità di impatto condizionale (CIP) e definito dal rapporto della lunghezza totale delle proiezioni dei cerchi di impatto sul lato della cella rivolto verso valle e la lunghezza del lato stesso.

2. MATERIALI E METODI

Il caso di studio descritto nel presente elaborato ha visto il proprio sviluppo realizzarsi in diverse fasi. La prima serie di operazioni si è tenuta in campo, con l'individuazione del sito e la definizione dei suoi confini, il rilievo dei dati relativi alla localizzazione degli alberi e ai rispettivi diametri, il conteggio delle ferite e, infine, l'estrazione delle carote incrementali. Lo step successivo si è tenuto in laboratorio, dove si sono processate le carote incrementali per rendere visibili gli anelli. Infine, nell'ultima fase, si sono eseguite attività di elaborazione digitale dei dati, mediante l'impiego di software di calcolo e di rilievo del territorio.

2.1. Sito di studio

Il sito di studio (Figura 4) è localizzato in una foresta di proprietà demaniale facente parte del territorio comunale di Crodo, in località "Miniera" (46°13'40.3"N 8°19'00.7"E). Il comune di Crodo è ubicato all'ingresso della Valle Antigorio, nella provincia del Verbano – Cusio – Ossola, ai piedi del versante italiano delle Alpi Lepontine. L'area di studio è interessata dalla caduta di massi di modeste dimensioni che ha origine da un punto di distacco posto a monte della stessa. La stessa area è inoltre soggetta ad un secondo fenomeno di caduta di massi, originato dal cedimento di muretti a secco in stato di abbandono (carenti in manutenzione), costituenti antichi terrazzamenti.

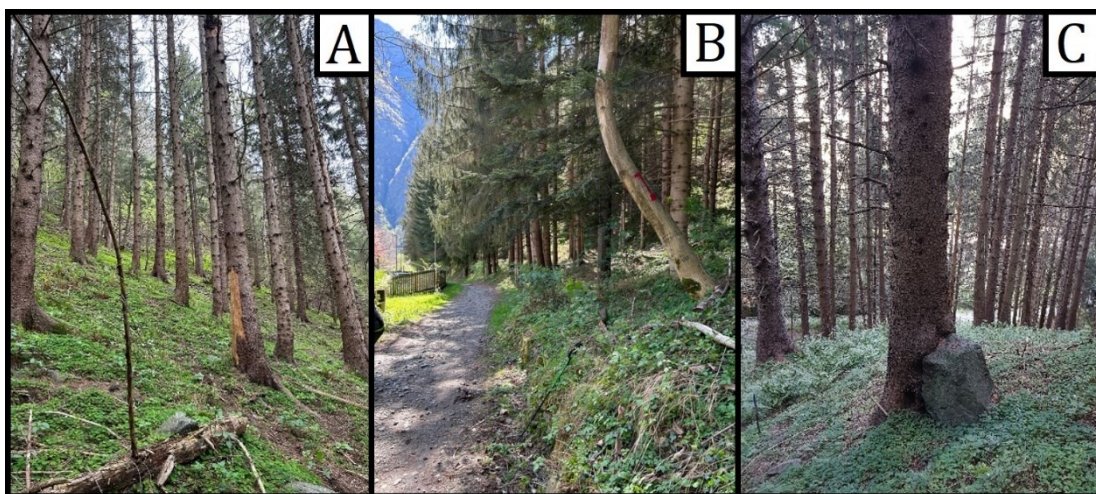


Figura 4 (A-B-C) - A) Sito di studio; B) Strada agrosilvopastorale posta nella zona di arresto/deposito; C) Masso arrestato su fusto di *Picea abies* a seguito di impatto.

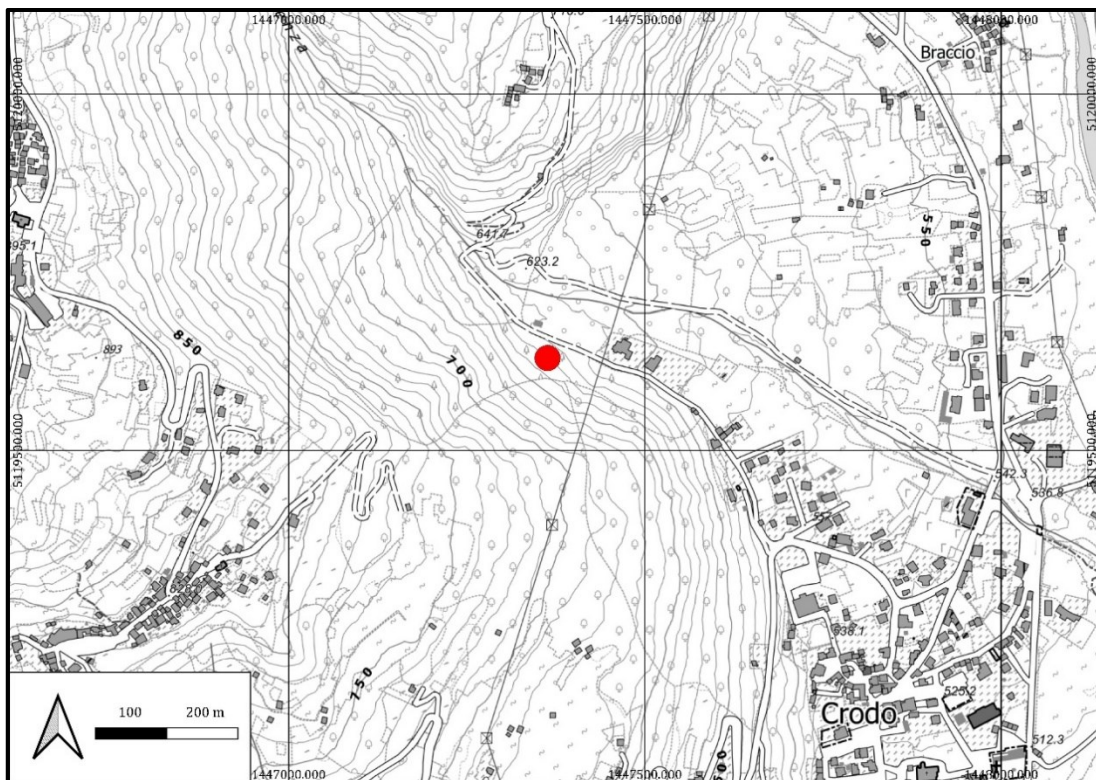


Figura 5 - Base Cartografica di Riferimento Annuale – 2023 (raster b/n 1:10.000 – WMTS). Il cerchio rosso indica il sito di studio (fonte WMS Geoportale Piemonte - <https://www.geoportale.piemonte.it/>).



Figura 6 - Figura 5 - Foto aerea del territorio comunale di Crodo e localizzazione dell'area di studio (fonte - <https://earth.google.com/>)

2.1.1. Pendenza

L'area di studio individuata è posta in prossimità del fondovalle, ai piedi di un versante appartenente al gruppo del Monte Cistella, ad una quota pari a 630 m s.l.m., esposta a Nord - Est e con una pendenza massima di circa 32.5°.

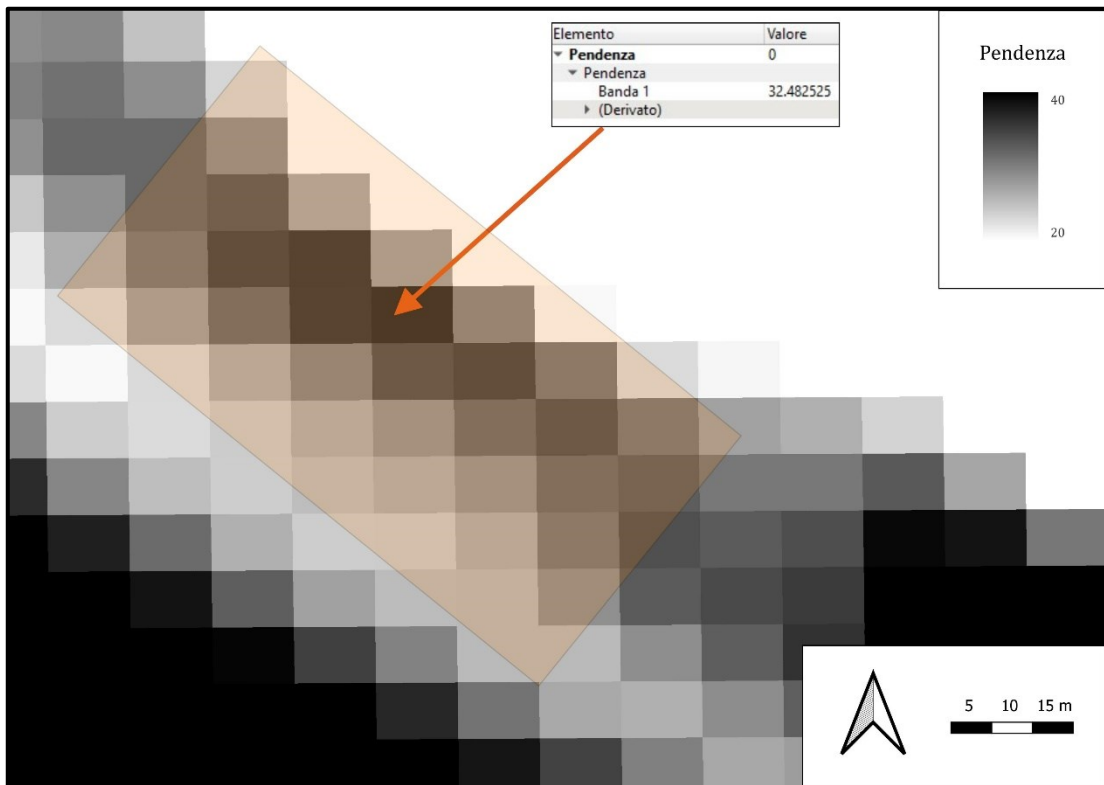


Figura 7 - Estratto DTM Regione Piemonte, con indicazione della pendenza massima all'interno dell'area di studio, evidenziata dal rettangolo di colore arancio (fonte DTM Geoportale Piemonte - <https://www.geoportale.piemonte.it/>).

2.1.2. Categoria e Tipo Forestale

Dall'analisi della Carta Forestale illustrata in Figura 8, è possibile ottenere informazioni relative alla categoria e al tipo forestale attribuiti all'area a cui il sito di studio appartiene.

Per ciò che concerne la categoria forestale, si evince che il sito è posto all'interno di un'area categorizzata come "Pecceta" (identificata dal codice PE) e attorniata da aree appartenenti ad altre categorie, quali Acero - Tiglio - Frassineti (AF), Castagneti (CA) e Boscaglie Pioniere e d'Invasione (BS). In riferimento al tipo forestale, il quale fornisce informazioni più dettagliate rispetto alla categoria, il

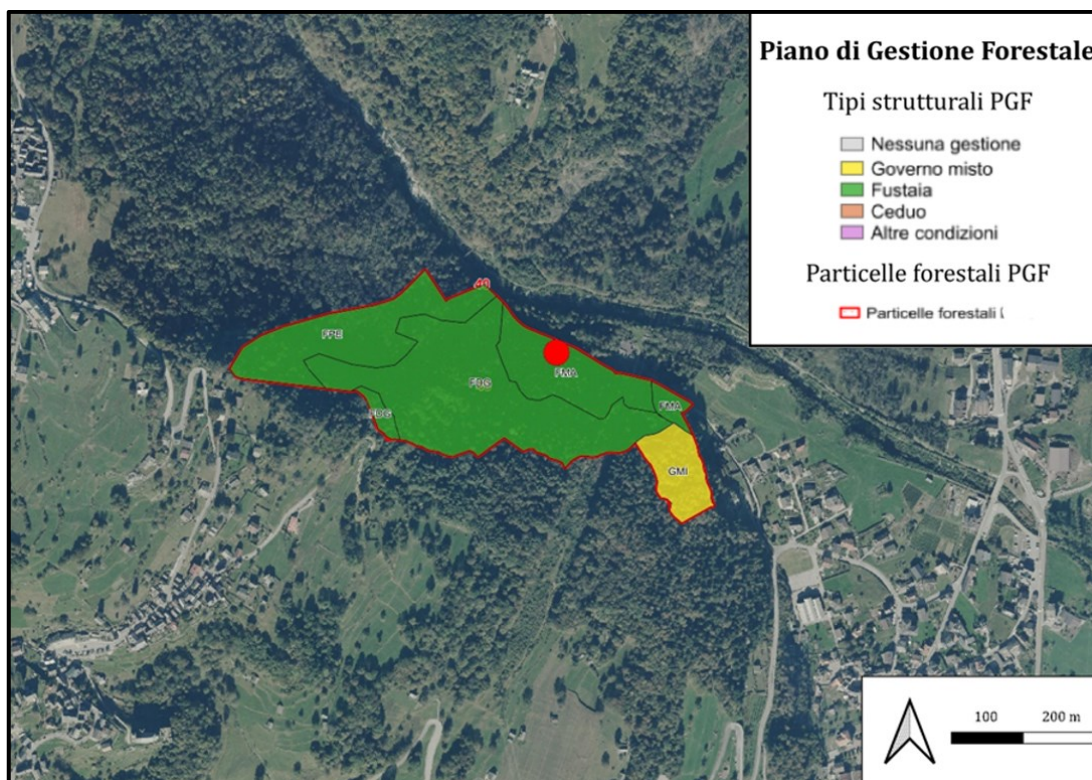


Figura 9 – Estratto PGF (ex PFA) del Comune di Crodo – Particella 40. Il cerchio rosso indica il sito di studio nell'area identificata dalla sigla FMA, governo a Fustaia, Monopiana, Adulta (fonte WMS Geoportale Piemonte - <https://www.geoportale.piemonte.it/>).

Un aspetto rilevante, per il caso di studio in oggetto, riguarda la destinazione funzionale prevalente attribuita alla foresta dal piano forestale. Osservando l'estratto del PGF in Figura 10 si evince infatti che l'area di studio, indicata dal cerchio rosso, si colloca all'interno di una particella alla quale è stata attribuita prevalentemente una funzione protettiva (oltre che quella produttiva), in coerenza con gli obiettivi dello studio.

Nell'ambito dell'analisi della funzione protettiva della foresta, un ultimo fattore da considerare è rappresentato dal tipo di interventi selvicolturali ai quali è soggetta l'area. Nella fattispecie, come osservabile in Figura 11, il sito è interessato da una pratica di taglio identificata come "taglio a scelta" (o "di curazione"), tipico delle fustaie disetanee, che consiste in interventi atti a prelevare legname e, al tempo stesso modellare ("curare") la struttura della foresta (Bernetti et al., 2012).

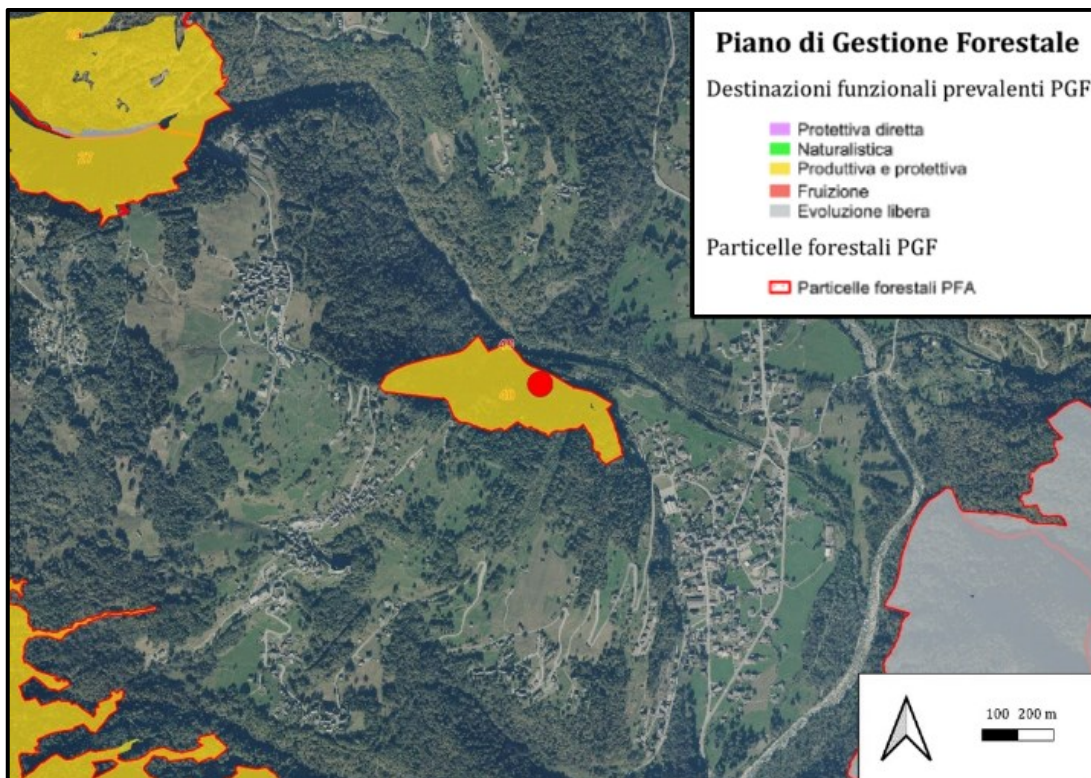


Figura 10 - Estratto PGF del Comune di Crodo – Particella 40. Il cerchio rosso indica il sito di studio, posto in un'area a destinazione funzionale protettiva e produttiva (fonte <https://www.geoportale.piemonte.it/>).

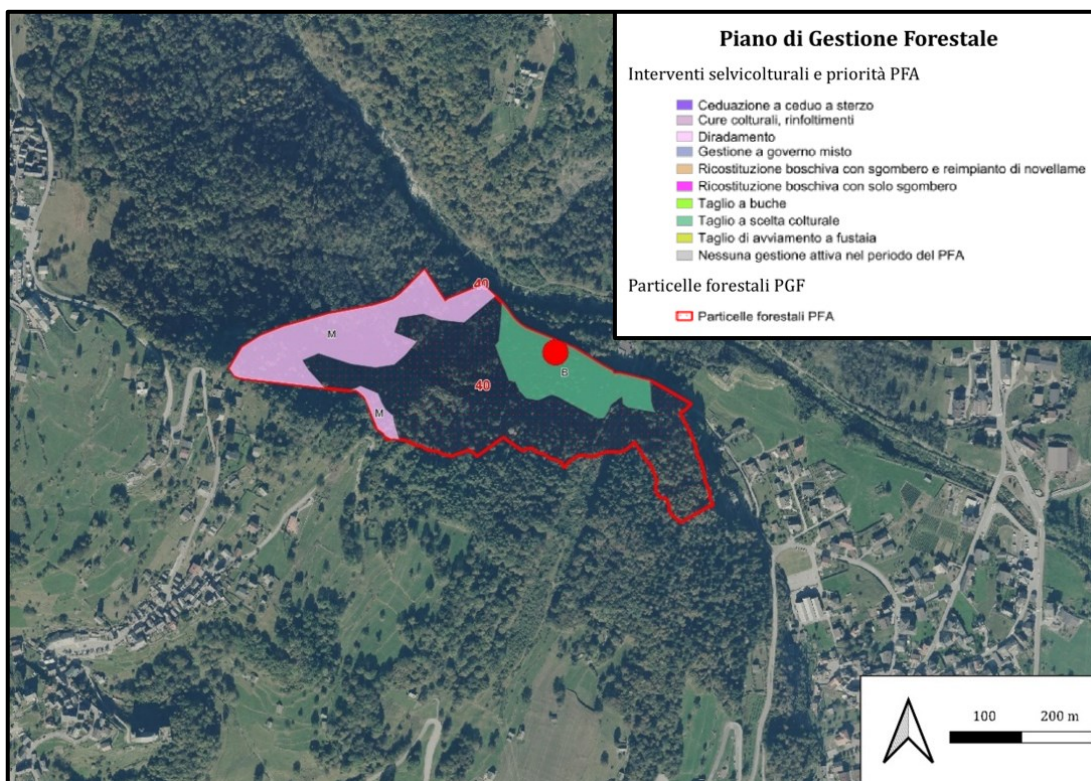


Figura 11 - Estratto PGF del Comune di Crodo. Il cerchio rosso indica il sito di studio, inserito in un'area sottoposta ad interventi selvicolturali praticati con taglio a scelta colturale (fonte <https://www.geoportale.piemonte.it/>).

2.1.4. Suolo e substrato

La carta dei suoli disponibile sul Geoportale e nel Sistema Informativo Pedologico della Regione Piemonte, indica la presenza di inceptisuoli montani, diffusi su pendenze medio – elevate dei versanti alpini, caratterizzati da scarsa evoluzione, con orizzonte cambico poco strutturato (in funzione della pedogenesi), e soventemente esposti a fenomeni erosivi.

In particolare, nell'area è presente un suolo Dystric Cambisol, (suoli grossolani montani). Si tratta di suoli con profondità di 70-120 cm (a causa della presenza di roccia o scheletro in eccesso), con buone disponibilità di ossigeno, drenaggio e permeabilità. Il colore degli orizzonti varia dal bruno al giallastro, discreta la presenza di sostanza organica superficiale; lo scheletro aumenta all'aumentare della profondità, passando da un minimo del 5% ad un massimo del 35%. La tessitura oscilla tra franco-sabbiosa, franco-limosa e franca. Il grado di reazione, infine, risulta acido o subacido, con substrato costituito da gneiss e caratterizzato da accumuli di rocce da frane e deformazioni profonde di versante.

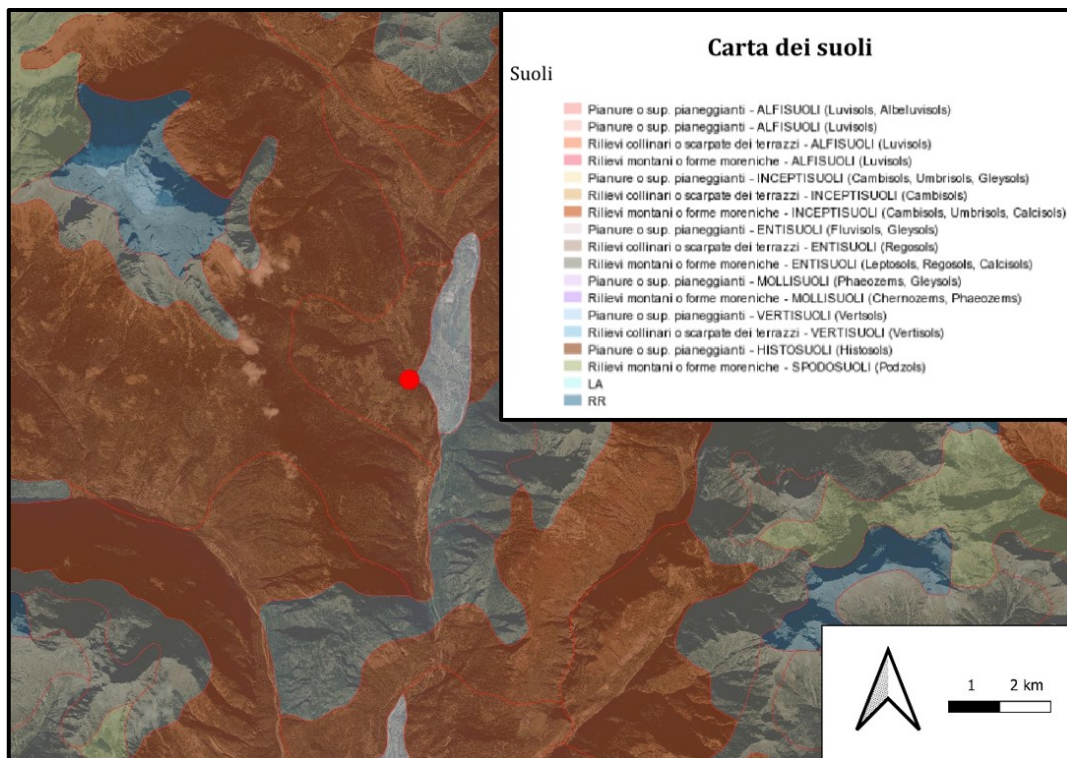


Figura 8 – Estratto Carta dei Suoli - Geoportale Piemonte. Il cerchio rosso indica il sito di studio, inserito in un'area caratterizzata da Inceptisuoli (fonte: <https://webgis.arpa.piemonte.it>).

2.1.5. Clima

Dall'analisi del diagramma ombrotermico proposto da Walter e Lieth (1967), elaborato sulla base dei dati relativi a temperatura e altezza di precipitazione, rilevati dalla stazione meteo presente nel comune di Crodo e messi a disposizione da ARPA Piemonte, si è potuto stabilire il tipo di clima al quale è soggetta l'area. Nel caso specifico, la valle Antigorio è risultata essere interessata da un clima subalpino, tipico della prima cintura delle Alpi, riscontrabile generalmente in tutte le aree poste all'estremo nord della regione e nel quale le precipitazioni massime autunnali tendono ad essere superiore alle primaverili. Tale differenza risulta essere più evidente nel confronto tra precipitazioni invernali ed estive, a favore di quest'ultime.

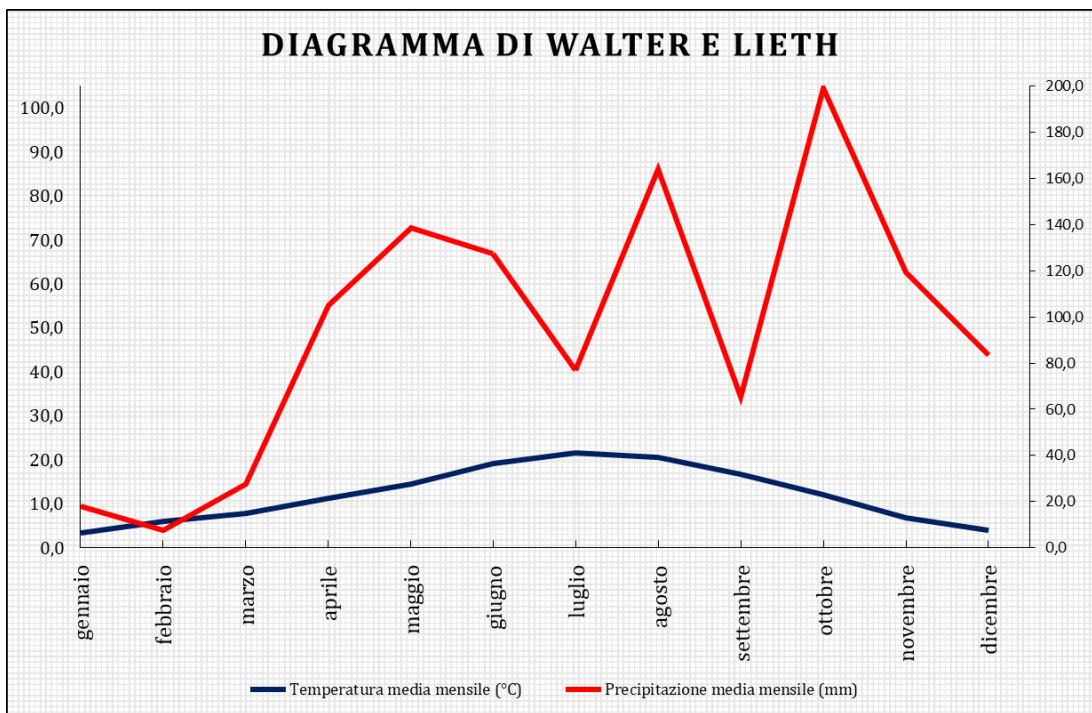


Figura 9 - Diagramma ombrotermico, elaborato sulla base dei dati rilevati dalla stazione meteorologica installata nel comune di Crodo (fonte: <https://www.arpa.piemonte.it/>).

TEMPERATURA MEDIA MENSILE (°C)						
MESE	2019	2020	2021	2022	2023	MEDIA
gennaio	3,2	4,0	1,2	4,9	3,6	3,4
febbraio	6,1	6,7	5,7	6,0	5,8	6,1
marzo	8,8	7,3	7,5	6,7	8,5	7,8
aprile	10,3	12,3	12,3	10,6	10,7	11,3
maggio	13,1	15,6	13,1	16,6	14,4	14,6
giugno	19,7	17,6	19,2	20,0	19,1	19,1
luglio	21,7	21,3	19,3	22,8	22,8	21,6
agosto	20,1	20,9	19,1	21,4	21,3	20,6
settembre	16,4	16,8	16,9	15,6	17,6	16,7
ottobre	12,3	10,0	10,1	14,3	13,9	12,1
novembre	5,1	7,7	6,4	7,8	6,6	6,7
dicembre	4,3	2,4	4,2	3,3	5,9	4,0

Tabella 1 - Temperature medie mensili nel periodo 2019-2023 rilevate nel comune di Crodo (fonte: <https://www.arpa.piemonte.it/>).

PRECIPITAZIONE MEDIA MENSILE (mm)						
MESE	2019	2020	2021	2022	2023	MEDIA
gennaio	5,4	4,4	74,4	0,6	5,4	18,0
febbraio	20,2	10,8	3,8	3,8	0,0	7,7
marzo	44,8	33,2	6,2	6,2	48,2	27,7
aprile	293,2	47,2	30,2	86,4	67,6	104,9
maggio	90,0	121,2	197,2	113,0	170,6	138,4
giugno	178,6	137,2	143,2	77,0	101,2	127,4
luglio	96,4	17,4	143,2	76,0	51,6	76,9
agosto	166,8	185,2	277,0	87,8	102,2	163,8
settembre	40,2	22,4	29,8	72,6	161,4	65,3
ottobre	304,2	259,6	123,2	109,4	198,2	198,9
novembre	346,0	3,8	92,4	92,4	62,8	119,5
dicembre	117,2	152,2	11,8	78,0	59,0	83,6
TOTALE	1703,0	994,6	1132,4	803,2	1028,2	

Tabella 2 - Precipitazioni medie mensili nel periodo 2019-2023 rilevate nel comune di Crodo (fonte: <https://www.arpa.piemonte.it/>).

2.2. Materiali e strumenti informatici

Ipsometro HAGLÖF SWEDEN® – Mod. VERTEX IV

L'ipsometro è uno strumento ottico (costituito da un apparato emettitore di segnale e da un ricevitore) tipicamente impiegato per il rilevamento delle misure di altezza degli alberi. Nello studio in oggetto, le funzionalità dell'ipsometro sono state sfruttate per misurare le distanze orizzontali, allo scopo di:

- definire i confini esterni dell'area di studio, all'interno della quale sono stati effettuati i rilievi (50 m x 100 m)
- definire i confini di ogni singola particella, posta all'interno dell'area (50 celle totali, ciascuna di misura 10 m x 10 m)
- misurare la distanza tra un vertice della cella e ogni singolo albero presente all'interno della stessa (operazione ripetuta per ognuna delle celle presenti).



Figura 10 – Ipsometro HAGLÖF SWEDEN® – Modello VERTEX IV

Metro a nastro RICHTER® – Mod. 263GP

L'operazione preliminare relativa all'utilizzo dell'ipsometro è consistita nella taratura dello stesso. Per effettuare tale operazione è stato necessario disporre di un piano orizzontale, interponendo una distanza di 10 m tra emettitore e ricevitore dell'ipsometro, distanza misurata appunto con il metro a nastro.



Figura 11 – Metro a nastro RICHTER® – Modello 263GP

Bussola galleggiante SUUNTO® – Mod. KB-20/360R G

L'impiego di una bussola galleggiante è risultato necessario per:

- determinare la direzione dei quattro lati dell'area, ognuno posto a 90° rispetto al precedente e al successivo
- determinare la direzione di ogni lato delle celle interne all'area
- determinare l'angolo esistente, rispetto a Nord, tra un vertice della cella e ogni singolo albero presente all'interno della stessa (operazione ripetuta per ognuna delle celle presenti).



Figura 12 – Bussola galleggiante SUUNTO® – Modello KB-20/360R G

Cavalletto dendrometrico SILVANUS® – Mod. TYPE 1208

Il cavalletto dendrometrico è uno degli strumenti utilizzati per la misura dei diametri degli alberi, rilevati “a petto d'uomo” (DBH) ad altezza pari a 130 cm dal suolo. È opportuno eseguire, sulla stessa pianta, due misure del diametro (perpendicolari tra loro) ed effettuare una media aritmetica tra i due valori rilevati, al fine di evitare errori dovuti alla mancanza di simmetria del fusto.

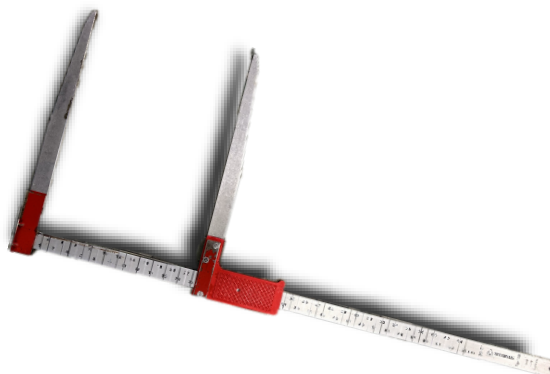


Figura 13 – Cavalletto dendrometrico SILVANUS® – Modello TYPE 1208

Palmare ricevitore GNSS Trimble® - mod. TDC600

L'impiego del ricevitore GNSS è risultato necessario per ottenere le coordinate geografiche dell'area, allo scopo di riprodurre su un sistema GIS la mappatura delle piante presenti all'interno della stessa, nella posizione reale.

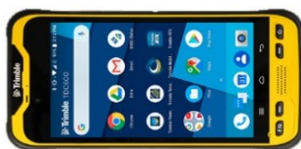


Figura 12 - Palmare ricevitore GNSS Trimble® - modello TDC600

Trivella incrementale HAGLÖF SWEDEN® - Mod. INCREMENT BORER - 40 cm

La trivella incrementale (c.d. "di Pressler", dal nome del suo inventore) è lo strumento che permette l'estrazione di carote dal fusto, allo scopo di conteggiare il numero di anelli presenti, per poter quindi definire l'età della pianta.

Lo strumento è caratterizzato da un'asta alla cui estremità è presente una filettatura, necessaria all'inserimento nel fusto; sull'altra estremità viene vincolato perpendicolarmente un bilanciere, che permette la rotazione dell'asta filettata; all'interno dell'asta stessa è inserito un estrattore, necessario per estrarre la carota.

Lo strumento utilizzato nello studio presenta le seguenti dimensioni:

- Lunghezza asta (profondità di foratura): 40 cm
- Diametro foro (determinante il diametro della carota): 5,15 mm

Per facilitare l'innesto dello strumento nel fusto e mantenere un angolo retto nella perforazione, è stato abbinato alla trivella un avviatore, prodotto dallo stesso costruttore, denominato HAGLÖF SWEDEN® - Modello BORER STARTER.



Figura 14 - Trivella incrementale HAGLÖF SWEDEN® - Modello INCREMENT BORER - 60 cm e relativo avviatore Modello BORER STARTER

Telai in legno scanalati

Per facilitare la conservazione delle carote estratte e la successiva analisi, proteggendole da eventuali rotture, le stesse vengono fissate su appositi telai, sulla cui lunghezza è presente una scanalatura. La carota viene quindi posta all'interno di questa scanalatura e fissata con colla vinilica.



Figura 13 - Telaio in legno scanalato, con carote di Picea abies.

Microtomo WSL – Mod. SERIE NR. 4163

La forma cilindrica delle carote estratte rende difficoltosi sia il conteggio degli anelli che l'analisi della carota stessa. È quasi sempre necessario praticare, quindi, una asportazione di truciolo di legno dalla carota, in maniera tale da conferirle una forma semi – cilindrica, ottenendo una superficie piana perpendicolare alla direzione delle fibre del legno.

Questa operazione è stata praticata, nel caso oggetto di studio, con uno specifico strumento detto microtomo, costituito da:

- una parte fissa, dove si alloggia il telaio su cui è fissata la carota da analizzare;
- una parte mobile, oscillante sulla direzione parallela al telaio con carota, dotata di lama inclinata per l'asportazione del truciolo, con profondità di incisione regolabile.

Una volta asportato il truciolo, si è applicata polvere di gesso su tutta la superficie della carota, allo scopo di rendere più visibili gli anelli e facilitarne il conteggio.

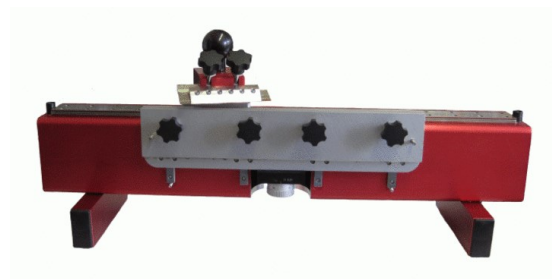


Figura 14 - Microtomo WSL - Modello SERIE NR. 4163

Applicativi informatici

- MICROSOFT® EXCEL – Foglio di calcolo elettronico utilizzato per la raccolta e l'elaborazione dei dati
- QGIS – Software GIS (Geographic Information System) open source, utilizzato per le rappresentazioni grafiche dei dati georeferenziati
- R – Software open source, basato sul linguaggio di programmazione omonimo, utilizzato per il calcolo degli indici di Intervallo di Ricorrenza, CIP e Tempo di ritorno.

2.3. Metodi

2.3.1. Individuazione sito

L'area oggetto dello studio è stata valutata idonea all'esecuzione dei rilievi, a seguito di numerosi sopralluoghi effettuati nelle diverse particelle del PGF del Comune di Crodo.

È parsa infatti evidente la presenza dei requisiti fondamentali per poter attribuire alla foresta la funzione di protezione diretta e valutarne il grado:

- Presenza di uno o più obiettivi sensibili, posti ai piedi del versante, a valle della foresta, rappresentati nello specifico da una piccola centrale idroelettrica e da una strada agro – silvo – pastorale (frequentata da mezzi agricoli, ma anche da escursionisti);
- Presenza di un pericolo naturale, quale il distacco di massi da una zona posta a monte della foresta, interessata da fenomeni di frana (oltre che dal cedimento di muri a secco costituenti antichi terrazzamenti, in stato di abbandono e assenza di manutenzione)
- Presenza evidente di cicatrici alla base dei fusti degli alberi, derivanti dall'impatto dei massi provenienti dalla zona di distacco, a monte della foresta
- Presenza di una considerevole quantità di massi di varie dimensioni, distribuiti soprattutto ai piedi del versante, in prossimità della strada posta a valle della foresta, ma anche adiacenti ai fusti degli alberi (con annessa cicatrice cagionata dal masso stesso).

Si è dunque deciso di procedere alla delimitazione dell'area, all'interno della quale effettuare i rilievi, avente forma rettangolare e superficie pari a 0,5 ha (con i lati corti aventi lunghezza pari a 50 m e i lati lunghi aventi lunghezza pari a 100 m).

2.3.2. Confinamento area totale

Le caratteristiche morfologiche del versante hanno vincolato la definizione dei confini dell'area di studio in quanto, verso nord – est, era presente un impluvio difficilmente percorribile in condizioni di sicurezza e, verso sud – est, era presente una strada agro – silvo – pastorale.

Le direzioni di strada e impluvio sono risultate essere perpendicolari tra loro, determinando, di fatto, un lato lungo (parallelo alla strada) ed un lato corto (parallelo all'impluvio). Posizionato un riferimento fisico nel punto di intersezione delle due direttrici (costituito da un palo in legno inflitto nel terreno), con l'ausilio della bussola galleggiante si è misurato un angolo di 90° rispetto alla direzione dell'impluvio (il quale formava un angolo di 45° rispetto al Nord) e si è proceduto alla misura della lunghezza del lato lungo, dirigendosi quindi verso sud – est (135° Nord). La misura della lunghezza, pari a 100 m, è stata effettuata con l'impiego dell'ipsometro, controllando la percorrenza della direzione 135° N, indicata dalla bussola, e fissando un riferimento ogni 10 m lungo la medesima direzione. Tale segmentazione è motivata da due aspetti: il primo, di natura tecnica, in quanto l'ipsometro non garantisce accuratezza e precisione in caso di misura di distanze elevate; il secondo, di natura pratica, in quanto questi riferimenti sono stati successivamente impiegati per la definizione delle 50 celle quadrate interne all'area, di lato pari a 10 m. Questa modalità è stata quindi mantenuta anche per la misura della lunghezza degli altri tre lati.

Determinata la lunghezza del lato lungo, si quindi è passati alla definizione del lato corto, verso sud – ovest; si è rilevato anche in questo caso un angolo di 90° , rispetto alla direzione del lato lungo appena misurato (rivolgendosi quindi verso 225° Nord) e si è proceduto nel misurare la distanza di 50 m del lato corto (sempre con segmenti di 10 m opportunamente segnalati), alla cui estremità è stato posato il relativo riferimento, a segnalare il terzo vertice.

Con modalità analoghe alle precedenti, si è misurato un nuovo angolo di 90° rispetto al lato appena misurato (in direzione nord – ovest, 315° Nord) e si è definito il secondo lato lungo, con i propri riferimenti ogni 10 m.

L'ultima operazione è stata caratterizzata dalla “chiusura del rettangolo”, ossia dal ricongiungimento del primo e dell'ultimo vertice definiti, a formare il secondo lato corto, con i relativi segmenti

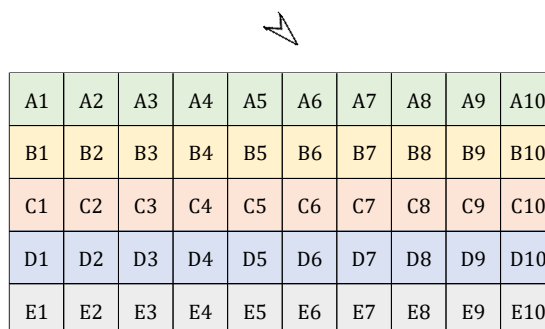
2.3.3. Confinamento celle

I riferimenti posti lungo i lati dell'area, ogni 10 m, sono stati utilizzati per tracciare i confini delle singole celle interne all'area.

In corrispondenza del primo riferimento posto dopo il vertice, su uno dei due lati lunghi, e rivolgendosi verso l'interno dell'area, si è misurato un angolo di 90° rispetto al lato al quale il riferimento apparteneva. Lungo la direzione definita dall'angolo, si è misurata una distanza pari a quella del lato corto, ponendo riferimenti, anche in questo caso, ogni 10 m.

La stessa operazione è stata ripetuta per tutti i riferimenti posti sul lato lungo, definendo, quindi, un reticolo di 50 celle quadrate, aventi lato di lunghezza pari a 10 m.

Per agevolare l'identificazione delle celle, si è virtualmente suddivisa l'area in cinque fasce parallele ai lati lunghi e dieci fasce parallele ai lati corti, identificate rispettivamente da lettere (progressive da A a E) e numeri (progressivi da 1 a 10). A ciascuna cella è stata assegnata quindi una denominazione derivante dall'intersezione delle fasce tra loro perpendicolari (es. cella A4, derivante dall'intersezione della fascia A con la fascia 4).



A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10

Figura 15 – Schematizzazione dell'area totale e delle celle. Il verso della freccia indica il punto cardinale Nord.

2.3.4. Mappatura alberi – Misura diametri – Conteggio ferite

Definiti fisicamente i confini dell'area e delle celle poste al suo interno, si è proceduto alle operazioni strumentali per definire la successiva mappatura degli alberi presenti al loro interno. In ogni cella si sono quindi misurate le distanze tra uno dei quattro vertici, scelto arbitrariamente, e gli alberi posti entro i confini della stessa. Contestualmente alla distanza è stato rilevato l'angolo che ogni singolo albero formava rispetto alla direzione Nord, utilizzando sempre il vertice della cella come punto di riferimento per la misura. Infine, dopo aver identificato la specie, per ogni albero è stato rilevato, con l'impiego di un cavalletto dendrometrico, il diametro ad un'altezza di 130 cm da terra (DBH - diametro a petto d'uomo) e sono state conteggiate le cicatrici sui fusti generate dagli impatti dei massi provenienti dal punto di distacco. Tale operazione è stata ripetuta per tutte le 50 celle, avendo cura di eseguire, relativamente ad ogni cella, le misure dal medesimo vertice stabilito per la prima. Tutti i dati rilevati sono stati infine riportati sul foglio di calcolo elettronico per la successiva rielaborazione.

Come descritto nel paragrafo 2.3.2 (Delimitazione area totale), le direzioni dei lati corti dell'area presentavano un angolo di 45° rispetto al Nord; si rendeva quindi necessaria una correzione dei valori degli angoli rilevati in campo. Gli angoli, essendo stati misurati con l'utilizzo di una bussola, erano infatti riferiti al punto cardinale nord, risultando maggiori di 45° rispetto agli angoli effettivi riferiti alla cella. Con l'ausilio del foglio di calcolo (MS[®] Excel) si è quindi provveduto a ricalcolare tutti gli angoli, sottraendo il valore di 45° ai dati rilevati in campo.

Assumendo ogni cella come un piano cartesiano a sé stante, avente l'asse delle ascisse parallelo al lato corto dell'area totale e l'asse delle ordinate parallelo al lato lungo, grazie alla revisione degli angoli è stato possibile, nel passaggio successivo, il calcolo delle coordinate x e y di ogni singolo albero (riferite alla cella di appartenenza). Le coordinate sono state quindi ottenute mediante l'impiego delle formule fondamentali di trigonometria, assumendo come lunghezza dell'ipotenusa il valore della distanza misurata tra vertice della cella e l'albero. Nell'ipotetico piano cartesiano rappresentato dalla cella, come si evince dalla Figura 16, l'angolo misurato in campo aveva il vertice posto nel punto $(0;10)$ e un lato, parallelo all'asse delle ascisse, posto in $y=10$ (il secondo lato, naturalmente,

era costituito dalla retta passante tra vertice e albero). La coordinata in ascissa è quindi risultata essere il prodotto tra ipotenusa e il coseno dell'angolo, mentre per l'ordinata è stato necessario effettuare una correzione: moltiplicando infatti l'ipotenusa per il seno dell'angolo, il valore ottenuto risultava essere relativo alla distanza verticale tra l'albero e la retta $y=10$ (e non relativo alla distanza verticale tra la retta $y=0$ e l'albero, come desiderato); per ottenere il valore reale dell'ordinata è stato quindi necessario sottrarre a 10 il valore di y ottenuto in precedenza.

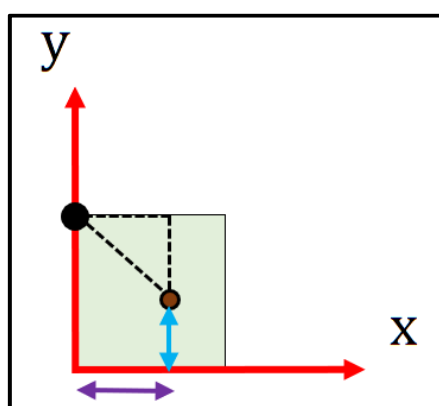


Figura 16 - Metodo di calcolo delle coordinate di un albero, riferite ad una singola cella. Il cerchio nero rappresenta il punto di rilevamento dell'angolo con la bussola, il marrone rappresenta l'albero, la doppia freccia azzurra la coordinata y , la viola la coordinata x . La linea tratteggiata obliqua è la distanza lineare tra albero e punto di rilevamento.

Ottenute le coordinate di tutti gli alberi, riferite alla propria cella, si è successivamente calcolato il valore delle coordinate riferite all'area totale. Si è dunque ipotizzato anche in questo caso un piano cartesiano, rappresentante l'area totale, avente l'origine degli assi nel punto coincidente con l'origine degli assi riferiti alla cella A1. Al valore delle coordinate calcolate per le singole celle si è aggiunto il valore della distanza tra le origini degli assi dell'area totale e della cella stessa. A titolo esemplificativo, supponendo di aver calcolato nella cella B3 le coordinate $x=2$ e $y=4$, le nuove coordinate riferite all'area totale sono risultate essere $x'=12$ e $y'=24$ (Figura 17), essendo pari a 10 e pari a 20 le distanze, rispettivamente in ascissa e ordinata, tra l'origine degli assi dell'area totale e quello della cella B3.

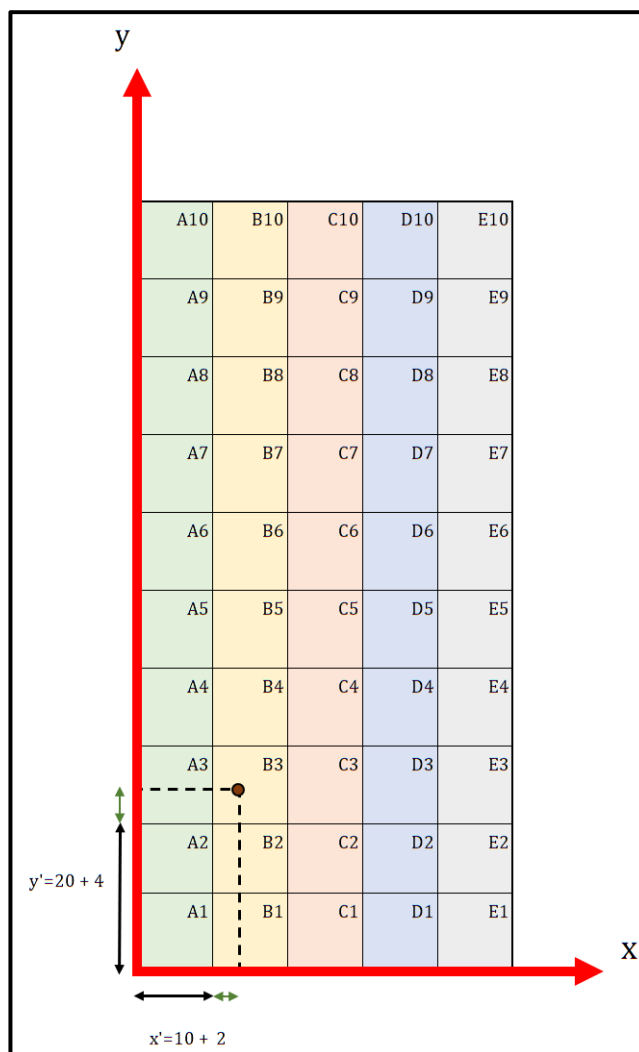


Figura 17 – Esempio di calcolo delle coordinate, riferite all'area totale, di un albero posto nella cella B3.

Un passaggio necessario per il calcolo delle stime degli intervalli di ricorrenza (mediante l'impiego del software R, processo descritto in seguito), citati nel paragrafo 1.6, ha riguardato la successiva trasposizione dei dati dal foglio elettronico al sistema GIS, al fine di produrre un *layer* (insieme di dati geospaziali e indipendenti) di tipo vettoriale, contenenti i dati relativi alla mappatura geolocalizzata di tutti gli alberi, da processare successivamente in R. Per ottenere tale mappatura, nella quale erano contenuti, inoltre, parametri quali specie, impatti, DBH e cerchio d'impatto (quest'ultimo elemento illustrato nel successivo paragrafo 2.3.7) relativi ad ogni albero, è stato necessario dapprima tradurre le coordinate cartesiane nelle corrispondenti coordinate geografiche, secondo il

sistema di riferimento EPSG:3003 – Monte Mario/Gauss Boaga zona 1, associando successivamente i valori ottenuti ai parametri sopra citati.

La traduzione delle coordinate geografiche è stata sviluppata attraverso diversi passaggi. Il primo ha riguardato il calcolo della distanza lineare tra l'origine dell'ipotetico piano cartesiano dell'area totale e l'albero: applicando il Teorema di Pitagora, avendo a disposizione le coordinate x e y (corrispondenti ai due cateti), si è ottenuta la distanza D , costituente l'ipotenusa ($D = \sqrt{x^2 + y^2}$). Nel secondo passaggio, mediante la funzione trigonometrica "arco tangente", si è calcolato l'angolo β tra distanza D e l'asse delle ascisse, con vertice nell'origine degli assi ($\beta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$). L'angolo risultante è stato quindi aumentato di 45° , in quanto riferito al piano cartesiano ipotizzato per l'area, e non alla situazione reale (facendo riferimento a quanto descritto all'inizio del presente paragrafo, per poter costruire un piano cartesiano e ottenere le coordinate nella cella, erano stati sottratti 45° al valore dell'angolo rilevato con la bussola). Con il calcolo dell'angolo reale, mediante l'applicazione delle funzioni trigonometriche fondamentali, è stato quindi possibile ottenere le reali distanze, orizzontali e verticali, tra ogni albero e il punto che in precedenza era stato assunto come origine degli assi cartesiani (le distanze orizzontali e verticali corrispondono al prodotto rispettivamente tra coseno e seno dell'angolo reale e la distanza lineare). I valori di distanza orizzontale sono risultati in parte positivi e in parte negativi, a causa della correzione dell'angolo applicata all'area.

L'ultimo passaggio è quindi consistito nel calcolo delle coordinate geografiche di tutti gli alberi. Per questa operazione è stato necessario, in primo luogo, ottenere le coordinate EST e NORD del punto coincidente con l'origine degli assi ipotizzati in precedenza, ricorrendo all'uso del ricevitore satellitare GNSS. A causa dell'ampia copertura delle chiome, non è stato però possibile rilevare tale dato in quel determinato punto, motivo per il quale si è rilevato in corrispondenza dell'altra estremità dello stesso lato corto, nella cella E1, a 50 m di distanza. Successivamente, avendo a disposizione i valori di distanza (50 m) e angolo rispetto all'orizzontale (45°) tra i due punti, con l'utilizzo delle funzioni trigonometriche è stato possibile calcolare le loro distanze, orizzontale e

verticale. I valori assoluti di distanza ottenuti sono stati sottratti alle rispettive coordinate EST e NORD, rilevate nella cella E1 (distanza orizzontale sottratta alla coordinata EST, verticale sottratta alla coordinata NORD), restituendo le coordinate geografiche del punto di riferimento, posto nella cella A1 (punto assunto come origine degli assi cartesiani ipotizzati).

Avendo a disposizione le coordinate del riferimento, è stato quindi possibile procedere al calcolo delle coordinate di tutti gli alberi, sommando algebricamente, alle coordinate geografiche di riferimento della cella A1, i valori di distanza verticale e orizzontale calcolati in precedenza per ogni albero.

Ricavate per ogni albero le coordinate geografiche e associate queste a tutti i parametri precedentemente elencati, è stata successivamente prodotta una tabella sul foglio di calcolo che, dopo averla esportata in formato “.csv”, è stata utilizzata per la creazione di un primo *layer* in formato vettoriale nel sistema GIS; qui sono state quindi riprodotte graficamente le sezioni dei fusti degli alberi, disposti secondo le coordinate indicate e comprensivi dei relativi attributi.

2.3.5. Succhiellamenti e stima età

L'ultimo rilievo effettuato in campo ha riguardato l'estrazione di carote incrementali dal fusto delle piante che non presentavano cicatrici, al fine di rilevare l'età delle piante stesse. Tale estrazione è stata eseguita con trivella Incrementale (o succhiello di Pressler), ad un'altezza di 130 cm da terra e ad una profondità leggermente superiore al raggio del fusto (per assicurare il prelievo del numero corretto di anelli).

Le carote ottenute sono state posizionate su appositi supporti in legno, fissate con colla vinilica e successivamente sottoposte ad asportazione di truciolo in laboratorio, mediante l'impiego del microtomo, al fine di agevolare le operazioni di conteggio degli anelli. Realizzando un taglio perpendicolare alla direzione delle fibre del legno e applicando polvere di gesso su tutta la lunghezza della carota, sono risultati ben visibili gli anelli presenti. La quantità di carote (Tabella 3) estratte è stata determinata in base alla distribuzione diametrica delle due specie maggiormente presenti nell'area (*Picea abies* e *Abies alba*).

Gli anelli conteggiati su ogni singola carota hanno restituito il valore relativo all'età della pianta, il quale è stato messo in relazione con il rispettivo DBH, rilevato contestualmente al succhiellamento. Mediante l'impiego del foglio di calcolo sono stati quindi elaborati i modelli di regressione età - diametro delle due specie considerate, al fine di poter stimare l'età di ogni singola pianta presente nell'area.

<i>Picea abies</i>			<i>Abies alba</i>		
Classe diametrica	Frequenza	Carote	Classe diametrica	Frequenza	Carote
10	5	1	10	17	1
20	23	2	20	18	1
30	23	2	30	14	1
40	33	2	40	8	1
50	36	3	50	3	1
60	27	2	60	0	0
70	4	1	70	0	0
80	2	0	80	0	0

Tabella 3 - Quantità di carote estratte in relazione a specie e relativa distribuzione diametrica.

Data la ridotta quantità di esemplari presenti, la stima dell'età degli alberi appartenenti alla terza specie presente, *Juglans regia*, non è stata redatta a partire da dati discreti, bensì è stata ottenuta impiegando un modello di regressione derivante da un altro caso di studio, basato anch'esso sulla relazione età - diametro (Ares e Brauer, 2004).

Avendo a disposizione l'età stimata di tutte le piante presenti, è stato quindi possibile procedere al calcolo delle stime degli indici di intervallo di ricorrenza.

2.3.6. Stima dell'intervallo di ricorrenza

L'intervallo di ricorrenza è un indice utilizzato per la valutazione di gran parte dei rischi naturali, generalmente definito come tempo di ritorno, ovvero il tempo medio che intercorre tra due eventi di pari entità; in ambito dendrogeomorfologico, in particolare nello studio della caduta massi, questo criterio di valutazione è stato introdotto soltanto in tempi recenti (Šilhán et al., 2013; Trappmann et al., 2014) ed è rappresentato dal tempo medio che intercorre tra due impatti rilevati in un medesimo punto. Nel caso oggetto di studio, si sono considerati 50 punti di impatto, coincidenti con le singole celle interne all'area.

A partire dal modello di regressione età – diametro, descritto nel paragrafo 2.3.5, si è calcolata l'età media degli alberi presenti in ogni cella (A_c), dividendo successivamente il risultato per la somma degli impatti totali (Sc_c) osservati nella cella stessa. Tale rapporto ha quindi restituito il valore relativo alla stima dell'intervallo di ricorrenza ($ObRic$).

$$ObRic = \frac{A_c}{Sc_c}$$

Per procedere al calcolo dei valori di questo indice si è ricorsi all'impiego del software R, al quale è stata fornita una serie di istruzioni, illustrate nel paragrafo finale del presente capitolo (2.3.8). L'impiego di questo strumento, preferito al foglio elettronico, è stato motivato dalla possibilità di riprodurre graficamente i risultati tramite un reticolo (rappresentante le celle) avente diverse graduazioni di colore, definite in base ai valori di intervallo di ricorrenza stimati.

2.3.7. Calcolo della probabilità di impatto condizionale (CIP) e stima del tempo di ritorno

Nel passaggio successivo, l'indice di intervallo di ricorrenza è stato adeguato considerando una variabile aggiuntiva, definita come probabilità di impatto condizionale (CIP), impiegata nelle stime della probabilità che massi in caduta non impattino i fusti degli alberi (Moya et al., 2010a; Trappmann et al., 2013).

Per definire il valore di Probabilità di Impatto Condizionale (CIP), riferito alle singole celle (come nel caso della stima dell'intervallo di ricorrenza), è stato calcolato il rapporto tra la lunghezza cumulativa delle proiezioni dei cerchi di impatto sul lato della cella posto più a valle (L_{IC}) e la lunghezza totale dello stesso lato (L_{plot}), come mostrato in Figura 18.

$$CIP = \frac{L_{IC}}{L_{plot}}$$

Il cerchio di impatto rappresenta un'ipotetica superficie circolare, il cui centro coincide con il centro del fusto e il cui raggio ha dimensioni pari alla somma del raggio del fusto e del raggio medio dei massi, stimato in 20 cm. Questo parametro definisce la probabilità che un albero possa essere colpito dai massi in

movimento: qualora la sua traiettoria ricada in una distanza dal fusto inferiore al raggio del masso stesso, sicuramente si verificherà l'impatto (Figura 18).

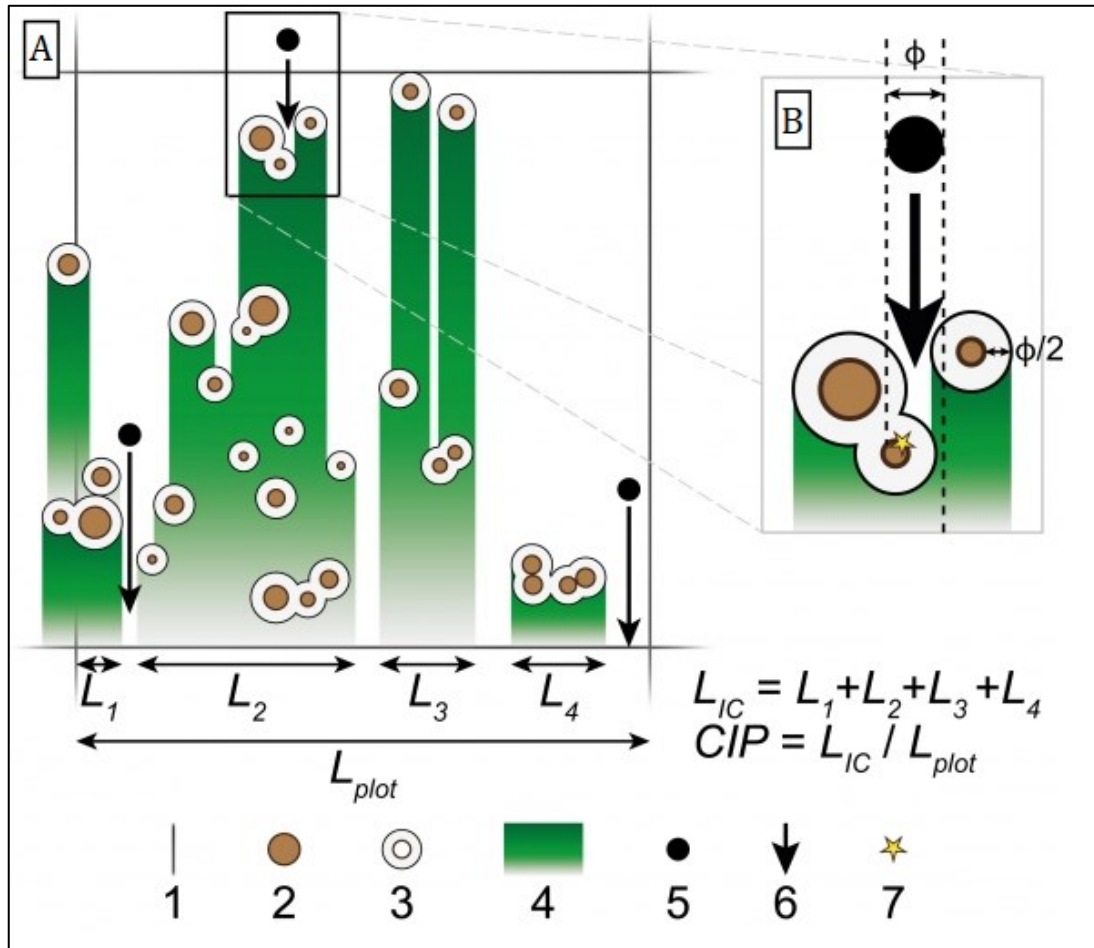


Figura 18 (A-B) - Rappresentazione grafica dell'indice CIP e delle lunghezze cumulative delle proiezioni del cerchio di impatto. (Moya et al., 2010).

1) Confine della cella; 2) Fusto dell'albero; 3) Cerchio di impatto; 4) Proiezione del cerchio d'impatto sul lato a valle della cella; 5) Massa dal diametro medio Φ ; 6) Traiettoria dei massi; 7) Punto di impatto dei massi sugli alberi.

Ricavato il valore dell'indice CIP, grazie all'impiego del software R, che ha agevolato il calcolo dei valori relativi al parametro L_{IC} (vedi paragrafo 2.3.8), si è potuto procedere al calcolo della frequenza degli impatti (F), definita dal rapporto tra il numero degli impatti (Sc_c) e il prodotto tra l'età media degli alberi (A_c) e l'indice CIP, sempre riferiti alla singola cella.

$$F = \frac{Sc_c}{A_c \cdot CIP}$$

Il reciproco del valore di frequenza ha restituito il secondo indice di intervallo di ricorrenza, riformulato in base al parametro CIP e definito tempo di ritorno R_i :

$$R_i = \frac{1}{F}$$

2.3.8. Modalità di calcolo e di stima degli indici

Nei due paragrafi precedenti si sono descritti, dal punto di vista teorico, gli indici di intervallo di ricorrenza e tempo di ritorno che, come anticipato, sono stati calcolati facendo ricorso agli applicativi informatici QGIS e R.

Nella parte finale del paragrafo 2.3.4 si era descritto il procedimento per la creazione, in QGIS, di un *layer* vettoriale rappresentante la mappatura degli alberi nell'area di studio, generata sulla base dei dati presenti nel file in formato .csv importato nel software. Sul *layer* prodotto si è quindi eseguito un processo di *buffering*, che consiste nella riproduzione di oggetti aventi area circolare attorno a determinati punti che, nel caso in questione, erano definiti dalle coordinate geografiche degli alberi; la dimensione dell'area circolare è stata stabilita in base al valore del raggio relativo al cerchio d'impatto di ogni albero. Da questa operazione di *buffering* si è quindi ottenuto un nuovo *layer*, utilizzato per il calcolo in R dell'indice CIP, dopo essere stato ruotato di 135° per agevolare i processi in R (disponendo quindi il lato lungo in orizzontale) ed esportato da QGIS in formato *shape* (vettoriale).

Le successive operazioni si sono quindi svolte sul software R, nel quale sono stati importati due files necessari al calcolo dei due indici di intervallo di ricorrenza, cioè lo *shape* file esportato da QGIS, oltre ad un secondo file costituito da una tabella elaborata sul foglio di calcolo ed esportata da questo in formato .csv, all'interno della quale erano contenuti i valori relativi all'età stimata e al numero di impatti osservati per ogni albero, con la rispettiva cella di appartenenza.

Importati in R, i due files sono stati convertiti in appositi *data frame* (insieme di dati), denominati arbitrariamente "cerchi_impatto" (*shape file*) e "dati_impatti" (.csv), al fine di rendere i dati disponibili al software per effettuare le successive operazioni (Figura 19).

```
18 #import----
19 cerchi_impatto <- st_read("RUOTATO_R.shp")
20 dati_impatti<- read.csv2("Dati_CIP.csv", row.names = NULL)
```

Figura 19 - Istruzioni R. Importazione files e creazione dataframe

La prima serie di operazioni, effettuate sul *data frame* relativo allo *shape file* e riportate in Figura 20, hanno avuto come obiettivo la collocazione nello spazio degli oggetti (rappresentanti gli alberi), in base alle coordinate geografiche presenti nella tabella degli attributi del file (24 – 25), escludendo le celle che non presentavano esemplari al loro interno (26). Si è poi riprodotta graficamente (“*plot*”) la distribuzione delle piante (27) e definita l’estensione spaziale dell’area occupata dagli alberi (28). Successivamente è stato creato un *raster* vuoto, della stessa estensione dell’area occupata dalle piante e con risoluzione pari a 1 cm (29), sulla quale sono stati inglobati gli oggetti correttamente disposti, rappresentati ciascuno con il valore del diametro relativo al cerchio di impatto (30). È stata infine elaborata una rappresentazione grafica (31).

```
24 cerchi_impatto$LAT<-cerchi_impatto$EPSG_300_1
25 cerchi_impatto$LON<-cerchi_impatto$EPSG_3003
26 cerchi_impatto<-filter(cerchi_impatto,cerchi_impatto$LAT!=0)
27 plot(cerchi_impatto[,"DIAMETRO"])
28 estensione <- ext(cerchi_impatto)
29 raster_template <- rast(extent = estensione, res = 0.01) # Creare un raster vuoto con una risoluzione di 0.01 m
30 rasterizzato <- rasterize(cerchi_impatto, raster_template, field = "DIAMETRO")
31 plot(rasterizzato, main="DISTRIBUZIONE SPAZIALE E DIAMETRI NELL'AREA DI STUDIO")
32 ext <- ext(rasterizzato)
```

Figura 20 - Istruzioni R. Collocazione spaziale oggetti e creazione raster.

In seguito a questa prima operazione si è provveduto, impartendo le istruzioni elencate in Figura 21, a suddividere il *raster* in 50 celle quadrate aventi lato pari a 10 m, mediante l’applicazione di una griglia. Si è quindi calcolata l’estensione spaziale del nuovo *raster* (34), attribuendo i valori massimi e minimi delle coordinate x e y (36 →39) e definendo una sequenza di coordinate verticali e orizzontali poste a distanza di 10 m l’una dall’altra (41 – 42). Da queste hanno quindi tratto origine le linee della griglia che definivano i confini delle celle interne all’area (44 → 47). Sono quindi stati definiti i valori massimi e minimi di ogni coordinata della sequenza richiesta nelle righe precedenti (48 → 51), utilizzati come riferimento per il ritaglio del *raster* principale, al fine di ottenere

50 *raster* secondari, indipendenti tra loro e coincidenti con le singole celle (54 – 57).

```
34 ext <- ext(rasterizzato)
35 # Inserimento griglia
36 x_min <- xmin(ext)
37 x_max <- xmax(ext)
38 y_min <- ymin(ext)
39 y_max <- ymax(ext)
40
41 seq_x <- seq(x_min, x_max, by = 10) # Sequenza per linee verticali
42 seq_y <- seq(y_min, y_max, by = 10) # Sequenza per linee orizzontali
43
44 # Aggiungere le linee verticali della griglia
45 abline(v = seq_x, col = "lightgray", lty = "dotted")
46 # Aggiungere le linee orizzontali della griglia
47 abline(h = seq_y, col = "lightgray", lty = "dotted")
48 xmin <- min(seq_x)
49 xmax <- max(seq_x)
50 ymin <- min(seq_y)
51 ymax <- max(seq_y)
52
53 # Creare un oggetto Extent con queste coordinate
54 ext_ritaglio <- ext(xmin, xmax, ymin, ymax)
55
56 # Ritagliare il raster usando l'estensione definita
57 raster_ritagliato <- crop(rasterizzato, ext_ritaglio)
```

Figura 21 – Istruzioni suddivisione raster principale in raster secondari

Nel blocco di istruzioni elencate in Figura 22 è stato poi richiesto di iterare ogni cella, al fine di assegnare a ciascuna un nome univoco che la distinguesse all'interno dell'area totale, formato da lettere per individuare le righe di appartenenza e numeri per individuare le colonne (es. cella "E5"). Si è quindi calcolato il numero di righe e colonne presenti, pari al numero di sequenze delle coordinate calcolate in precedenza, diminuite di una unità (66 – 67). Nei passaggi successivi si è inizializzato un contatore per i nomi dei *raster* (70) e si è impostato un ciclo che iterasse attraverso tutte le celle, attribuendo loro le coordinate, coincidenti con quelle della sequenza calcolate in precedenza (72 → 79). In seguito, si è definita l'estensione della cella in base alle coordinate ottenute (80) sulla quale è stato effettuato il ritaglio della cella stessa (83). Il processo di iterazione è proseguito con la creazione del nome delle celle, nella forma lettera/numero (86 – 87), reso univoco dall'istruzione che incrementa di una unità la sequenza dei nomi attribuiti ai *raster* (96). È stata quindi creata una lista vuota necessaria per salvare i *raster* ritagliati (101) e creato un vettore di lettere dalla A alla E, da attribuire come parte del nome ai *raster* ritagliati (103). Infine, è stato impostato un doppio ciclo che ha iterato attraverso ogni cella, definendone

l'estensione sulla quale applicare il nome, nel formato voluto (105 → 115), inserendo quindi i risultati nella lista creata in precedenza (118).

```

66 num_righe <- length(seq_y) - 1
67 num_colonne <- length(seq_x) - 1
68
69 # Inizializza un contatore per il nome del raster
70 contatore <- 1
71
72 # Itera attraverso ogni cella della griglia definita da seq_x e seq_y
73 for (i in 1:num_righe) {
74   for (j in 1:num_colonne) {
75     # Definisci l'estensione della cella corrente
76     xmin <- seq_x[j]
77     xmax <- seq_x[j + 1]
78     ymin <- seq_y[i]
79     ymax <- seq_y[i + 1]
80     ext_cella <- ext(xmin, xmax, ymin, ymax)
81
82     # Ritaglia il raster alla cella corrente
83     raster_cella <- crop(raster_ritagliato, ext_cella)
84
85     # Crea il nome del raster seguendo il formato "LetteraNumero"
86     # La lettera corrisponde alla riga (i) e il numero alla colonna (j)
87     nome_raster <- paste(LETTERS[i], j, sep = "")
88
89     # Stampa il nome del raster per conferma
90     print(nome_raster)
91
92     # Opzionale: salva il raster ritagliato con il nome specificato
93     # writeRaster(raster_cella, paste0(nome_raster, ".tif"), overwrite = TRUE)
94
95     # Incrementa il contatore per il nome successivo
96     contatore <- contatore + 1
97   }
98 }
99 # Assumendo che "raster_ritagliato" sia già definito
100 # Definire la lista per salvare i raster ritagliati
101 lista_raster <- list()
102
103 lettere <- rev(LETTERS[1:5])
104
105 # Iterare attraverso la griglia definita da seq_x e seq_y
106 for (i in 1:(length(seq_y) - 1)) {
107   for (j in 1:(length(seq_x) - 1)) {
108     # Definire l'estensione della cella corrente
109     estensione_cella <- ext(seq_x[j], seq_x[j + 1], seq_y[i], seq_y[i + 1])
110
111     # Ritagliare il raster per la cella corrente
112     raster_cella <- crop(raster_ritagliato, estensione_cella)
113
114     # Assegnare un nome seguendo il formato "A1", "A2", ...
115     nome_raster <- paste0(lettere[i], j)
116
117     # Salvare il raster ritagliato nella lista, con il nome come chiave
118     lista_raster[[nome_raster]] <- raster_cella

```

Figura 22 - Istruzioni R. Denominazione delle celle.

Un passaggio fondamentale per il calcolo degli indici degli intervalli di ricorrenza è costituito nella conversione in matrici dei *raster* relativi alle singole celle, mantenendone la struttura originale (Figura 23). Prima di procedere a questa operazione, ai *pixel* del reticolo (costituenti i *raster*) non occupati dal cerchio di impatto e indicati con la denominazione "NA", è stato attribuito il valore 0 (131 → 134). Successivamente si è potuto inserire l'istruzione di conversione in

matrice, formata da 1000 righe e 1000 colonne (137 → 142) e calcolarne la somma per colonne (145 → 151). Questa operazione ha restituito un vettore composto da 1000 elementi, nulli e non nulli, corrispondenti alla lunghezza del lato della cella. Laddove erano presenti elementi nulli, la colonna sovrastante non risultava occupata, in alcun punto, dal cerchio di impatto; al contrario, elementi non nulli del vettore lasciavano intendere la presenza del cerchio di impatto in punti della colonna corrispondente. Gli elementi non nulli rappresentavano quindi la proiezione del cerchio di impatto sul lato della cella rivolto a valle, parametro vincolante per il calcolo del CIP. Un esempio di conversione dei *raster* in una matrice e del calcolo della lunghezza delle proiezioni è rappresentato in Figura 24. Ottenuti i vettori risultanti di tutte le matrici corrispondenti alle relative celle, si è proceduto alla loro classificazione in una lista (152).

```

131 # 1. Sostituire i valori NA con 0
132 lista_raster_zero <- lapply(lista_raster, function(r) {
133   values(r)[is.na(values(r))] <- 0
134   return(r)
135 })
136
137 # 2. Convertire ogni raster in una matrice mantenendo la sua struttura originale
138 lista_matrici <- lapply(lista_raster_zero, function(r) {
139   # Converti il raster in una matrice
140   m <- as.matrix(r)
141   # Reshape della matrice per assicurare le dimensioni 1000x1000
142   matrix(m, nrow = 1000, ncol = 1000)
143 })
144
145 # 3. Calcolare la somma per colonne di ogni matrice e salvare i risultati in una nuova lista
146 lista_vettori <- lapply(names(lista_matrici), function(nome) {
147   matrice <- lista_matrici[[nome]]
148   vettore_somma <- colSums(matrice)
149   names(vettore_somma) <- paste0(nome, "_vettore")
150   return(vettore_somma)
151 })
152 names(lista_vettori) <- paste0(names(lista_matrici), "_vettore")
153

```

Figura 23 – Istruzioni R. Conversione dei raster in matrice e calcolo del vettore risultante

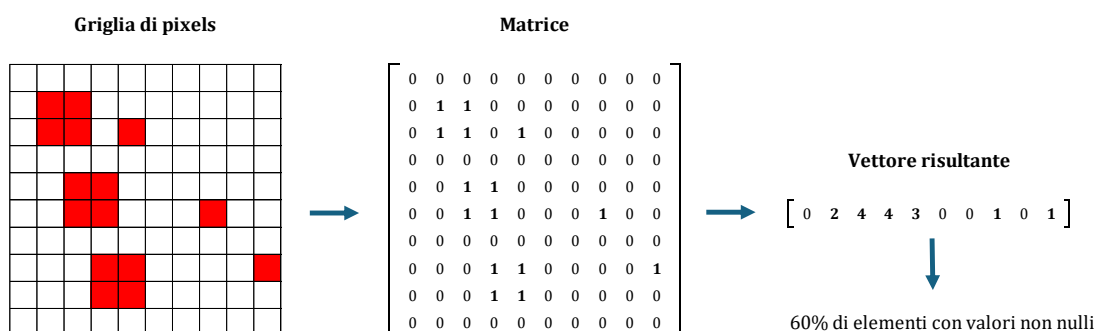


Figura 24 – Conversione dei raster in matrice e calcolo della lunghezza delle proiezioni dei cerchi d'impatto (la percentuale degli elementi non nulli equivale alla lunghezza percentuale rispetto alla lunghezza totale del lato).

Le istruzioni elencate nella Figura 25 hanno quindi permesso di ottenere il valore dell'indice CIP di ogni cella, definito dal rapporto tra la somma del numero di elementi non nulli appartenenti al vettore calcolato in precedenza, corrispondente alle proiezioni dei cerchi di impatto sul lato a valle, e la lunghezza totale del vettore stesso, corrispondente alla lunghezza del lato della cella (160 → 165). I risultati ottenuti sono quindi stati raccolti in un *data frame* per le successive operazioni (167 → 170), denominato arbitrariamente “df_risultati”.

```
160 * rapporti <- sapply(lista_vettori, function(v) {
161   lunghezza <- length(v)
162   non_zero <- sum(v != 0)
163   rapporto <- non_zero / lunghezza
164   return(rapporto)
165 * })
166
167 # Creare un dataframe con i risultati
168 df_risultati <- data.frame(
169   NomeVettore = names(rapporti),
170   Rapporto = rapporti
171 )
```

Figura 25 – Istruzioni R. Conteggio degli elementi con valori diversi da zero e calcolo dell'indice CIP

Ottenuto il valore dell'indice CIP di ogni cella, si è proceduto alla compilazione delle istruzioni successive, elencate in Figura 26, al fine di calcolare gli indici relativi al tempo di ritorno (gli intervalli di ricorrenza adeguati considerando il parametro CIP).

La prima operazione effettuata ha comportato la creazione di un nuovo *data frame* (denominato arbitrariamente “dati_aggregati”) a partire dal *data frame* iniziale “dati_impatti”; al suo interno sono stati riportati i valori aggregati degli impatti osservati all'interno di ogni singola cella e si è calcolata l'età media degli alberi presenti all'interno della stessa (178 → 184).

Successivamente, unendo i dati contenuti nell'ultimo *data frame* creato e i dati relativi all'indice CIP presenti nel *data frame* “df_risultati”, si è generato un ulteriore *data frame*, denominato “CIP”, riferito anch'esso alle singole celle (186 → 191). In questo sono state quindi integrate tre colonne, relative agli indici di Frequenza (194) e Tempo di ritorno (197) e Intervallo di Ricorrenza (200), i cui valori sono stati calcolati secondo le relazioni descritte nei paragrafi 2.3.6 e 2.3.7.

Con queste operazioni, la procedura per il calcolo degli indici si è potuta definire conclusa.

Nell'ultima serie di istruzioni mostrate sempre in Figura 26, si sono infine calcolati due ulteriori parametri, necessari alla descrizione della stazione forestale, costituiti dall'Area Basimetrica Media degli alberi presenti in ogni cella (205→212) e dal relativo Diametro Medio (218). Quest'ultimo parametro è definito come il diametro relativo all'albero avente il valore medio delle aree basimetriche della cella. Entrambi gli indici sono quindi stati integrati nel *data frame* "CIP" (217 - 218).

```

178 #aggregazione dei dati per particella
179 dati_aggregati <- dati_impatti %>%
180   group_by(PARTICELLA) %>%
181   summarise(
182     Somma_IMPATTI = sum(IMPATTI),
183     Media_Age = mean(Age)
184   )
185
186 CIP<-data.frame(PARTICELLA = df_risultati$NomeVettore,
187               CIP = df_risultati$Rapporto)
188
189 CIP$PARTICELLA <- gsub("_vettore", "", CIP$PARTICELLA)
190
191 CIP<-merge(CIP, dati_aggregati, by=c("PARTICELLA"))
192
193 #calcolo frequenza
194 CIP$FREQUENZA<-CIP$Somma_IMPATTI/(CIP$Media_Age*CIP$CIP)
195
196 #calcolo tempo di ritorno
197 CIP$T_RITORNO<-1/CIP$FREQUENZA
198
199 #calcolo intervallo ricorrenza
200 CIP$ObRic<-CIP$Media_Age/CIP$Somma_IMPATTI
201
202
203 #calcoli aggiuntivi per rappresentazione su GIS###
204
205 #crea la colonna in cerchi_impatto "area basimetrica BA"
206 cerchi_impatto$BA<-(cerchi_impatto$RAGGIO)^2*pi
207
208 #aggrega i dati
209 BA_aggregate <- cerchi_impatto %>%
210   group_by(PARTICELLA) %>%
211   summarise(
212     BA_media = mean(BA)
213   )
214
215
216 #unione basal area nel dataframe CIP
217 CIP <- merge(CIP, BA_aggregate, by = "PARTICELLA")
218 CIP$mean_diam <- (sqrt(CIP$BA)/pi)*2

```

Figura 26 – Istruzioni R. Calcolo degli indici di frequenza, tempo di ritorno, intervallo di ricorrenza e area basimetrica media.

Le operazioni finali del processo in R hanno riguardato l'esportazione di due files, contenenti un *layer* ciascuno, uno di tipo *raster* e uno in formato *shape*, rappresentanti rispettivamente la mappatura degli alberi (257) e il reticolo delle celle contenente i dati del *frame* "CIP" (260).

Il primo file è stato creato esportando il *raster* prodotto all'inizio del processo (29→31), mentre il secondo è stato ottenuto includendo in un poligono (precedentemente creato, rappresentante l'area di studio e sul quale si è applicata una griglia, costituente le celle) i valori contenuti nel data frame "CIP" (220→255).

```

220 # Converti l'estensione in un oggetto POLYGON sf per usarlo con st_make_grid, specificando EPSG:3003
221 ext_sf <- st_as_sf(st_bbox(c(xmin = x_min, xmax = x_max, ymin = y_min, ymax = y_max), crs = st_crs(3003)))
222
223 # Crea la griglia
224 griglia <- st_make_grid(ext_sf, n = c(10, 5))
225 griglia_sf <- st_sf(geometry = griglia)
226 plot(griglia_sf)
227
228 plot(rasterizzato)
229 plot(griglia_sf, add = TRUE)
230
231 str(griglia_sf)
232
233 centroids <- st_centroid(griglia_sf)
234 coords <- st_coordinates(centroids)
235 |
236 # Ad esempio, definisci intervalli x e y se non sono uniformi
237 rows <- cut(coords[,2], breaks=5, labels=c('E', 'D', 'C', 'B', 'A'))
238 cols <- cut(coords[,1], breaks=10, labels=1:10)
239
240 # Genera i nomi combinando riga e colonna
241 cell_names <- paste0(rows, cols)
242
243 # Assegna i nomi delle celle all'oggetto sf come una nuova colonna
244 griglia_sf$PARTICELLA <- cell_names
245
246 # Plotta lo shapefile con etichette
247 ggplot(data = griglia_sf) +
248   geom_sf() + # Disegna i poligoni
249   geom_sf_text(aes(label = PARTICELLA), size = 3, check_overlap = TRUE) +
250   theme_minimal() +
251   labs(title = "Mappa con Etichette PARTICELLA")
252
253 CIP <- as.data.frame(CIP[,c(1:9)])
254 CIP_shp <- griglia_sf %>%
255   left_join(CIP, by = "PARTICELLA")
256 # Esporta il raster
257 writeRaster(rasterizzato, filename = "Raster_alberi.tif")
258
259 # Esporta lo shapefile
260 st_write(CIP_shp, "CIP_shp.shp")

```

Figura 27 - Istruzioni R. Creazione ed esportazione dei layer.

Il caricamento in QGIS dei due files creati in R ha quindi permesso di applicare, con la corretta geolocalizzazione, il reticolo rappresentante l'area di studio e costituito dalle 50 celle, sul quale si sono potuti visualizzare i valori degli indici calcolati e la disposizione degli alberi, rappresentati con i valori del cerchio di impatto. Intervenendo sulle proprietà del *layer* relativo al reticolo, si è potuto selezionare l'indice da visualizzare nelle celle, sotto forma di differenti colorazioni delle stesse: ad un'intensità maggiore di colore corrispondevano intervalli di valori più alti, mentre ad intensità minori intervalli di valori più bassi.

3. RISULTATI

I dati rilevati in campo sono stati tabulati su fogli di calcolo di MS[®] Excel, al fine di poter procedere alla loro rielaborazione, con i metodi descritti nei paragrafi 2.2.5→2.2.8.

Nella Tabella 4, a titolo esemplificativo sono riportati, relativamente alla fascia B e alle rispettive dieci celle (definite nel paragrafo 2.3.3), i valori rilevati in campo di specie, DBH, angolo e distanza dal vertice di ogni singola cella di appartenenza e numero di cicatrici rilevate sul fusto, per ogni singolo albero. Il valore angolare è riferito al punto cardinale Nord, in quanto misurato mediante l'utilizzo di bussola galleggiante.

FASCIA B				
Particella	Specie	DBH	Angolo	Distanza
B1	<i>Picea abies</i>	52	20	8,8
B1	<i>Picea abies</i>	41	27	8,4
B2	<i>Picea abies</i>	73	25	6,4
B3	<i>Juglans regia</i>	11	33	0,7
B4	/	/	/	/
B5	<i>Picea abies</i>	54	85	3,9
B5	<i>Abies alba</i>	28	62	8,2
B5	<i>Picea abies</i>	64	28	7,5
B6	<i>Picea abies</i>	52	103	1,6
B6	<i>Picea abies</i>	29	88	5,8
B6	<i>Picea abies</i>	33	75	10,5
B6	<i>Abies alba</i>	33	76	7,6
B6	<i>Picea abies</i>	55	59	8,3
B7	<i>Picea abies</i>	58	55	9,5
B7	<i>Picea abies</i>	35	79	10,5
B7	<i>Picea abies</i>	38	104	4,6
B8	<i>Picea abies</i>	59	89	1,4
B8	<i>Picea abies</i>	53	85	9,7
B8	<i>Picea abies</i>	49	60	13,7
B8	<i>Picea abies</i>	61	58	9,8
B8	<i>Picea abies</i>	49	36	9,1
B9	<i>Picea abies</i>	36	42	10,5
B9	<i>Picea abies</i>	58	87	4,5
B9	<i>Picea abies</i>	18	39	3,4
B9	<i>Picea abies</i>	41	32	8
B9	<i>Abies alba</i>	37	64	9,4
B10	<i>Abies alba</i>	7	20	7,9
B10	<i>Picea abies</i>	43	47	4,9
B10	<i>Picea abies</i>	36	20	3,1

Tabella 4 – Esempio di tabulazione dei dati rilevati in campo, relativi alla "Fascia B". Nella tabella sono riportati i valori di angolo e distanza di ogni albero dal punto di rilevamento (con indicazione della specie), del diametro e del numero di impatti osservati.

3.1. Mappatura

Avendo ricavato le coordinate cartesiane, è stato riprodotto un grafico a dispersione (Figura 28) rappresentante una distribuzione approssimativa degli alberi, utile per valutare la correttezza dei rilievi eseguiti in campo.

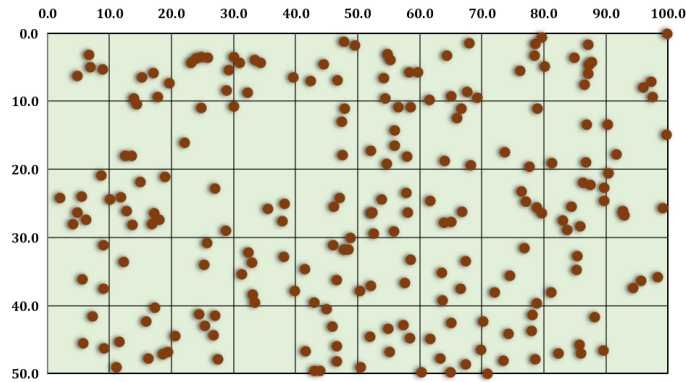


Figura 28 - Mappatura approssimativa delle piante all'interno dell'area di studio.

Nella Figura 29 è stata invece riprodotta in QGIS la distribuzione geolocalizzata degli alberi, definiti con poligoni formati da due cerchi concentrici, basati sul valore DBH e del relativo cerchio d'impatto, citato nei paragrafi precedenti.

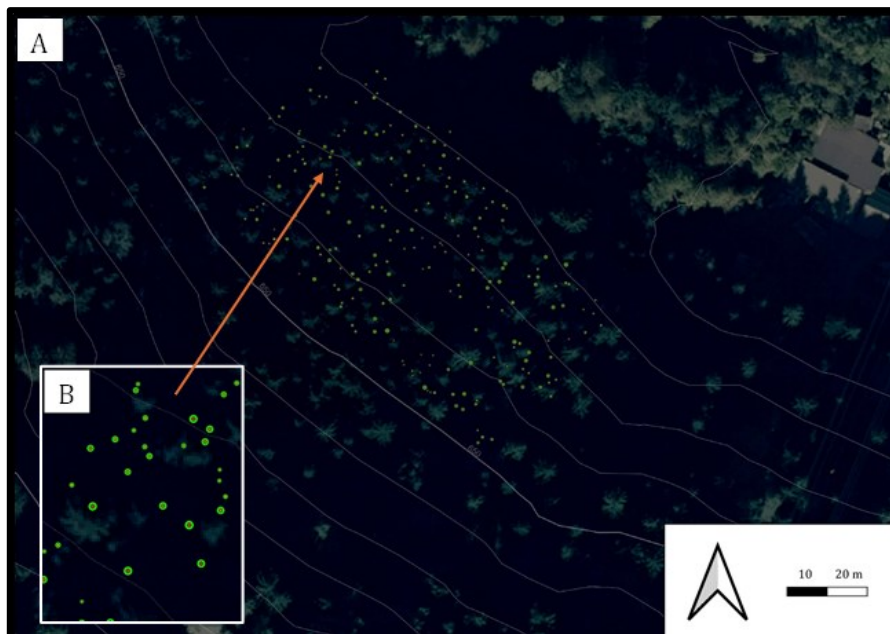


Figura 29 (A-B) – A) Rappresentazione su QGIS della mappatura secondo i diametri rilevati in campo; B) Dettaglio sulla rappresentazione dei cerchi di impatto.

3.2. Stima dell'età

Un parametro necessario al raggiungimento degli obiettivi finali dello studio in oggetto è stato rappresentato dalla stima dell'età delle piante presenti nell'area. Questo dato è stato impiegato in due diverse funzioni, le quali hanno permesso di definire rispettivamente i valori di Intervallo di Ricorrenza (ObRi_c) e Tempo di ritorno (R_i), descritti nei paragrafi 2.3.6 e 2.3.7.

Relativamente alle specie maggiormente presenti, *Picea abies* e *Abies alba*, l'età delle piante è stata stimata basandosi su una modesta quantità di dati discreti, caratterizzati dal numero di anelli presenti sulle carote estratte dai fusti e il rispettivo DBH (Tabella 5).

Specie	DBH (cm)	Anelli
<i>Abies alba</i>	15	37
<i>Abies alba</i>	24	54
<i>Abies alba</i>	32	55
<i>Abies alba</i>	44	45
<i>Abies alba</i>	48	57
<i>Picea abies</i>	10	34
<i>Picea abies</i>	15	28
<i>Picea abies</i>	25	43
<i>Picea abies</i>	21	43
<i>Picea abies</i>	27	51
<i>Picea abies</i>	28	54
<i>Picea abies</i>	26	46
<i>Picea abies</i>	35	56
<i>Picea abies</i>	38	47
<i>Picea abies</i>	47	52
<i>Picea abies</i>	50	61
<i>Picea abies</i>	49	89
<i>Picea abies</i>	57	/
<i>Picea abies</i>	60	/
<i>Picea abies</i>	65	/

Tabella 5 - Età delle piante rilevata dall'analisi delle carote estratte, con relativo diametro. In giallo gli esemplari le cui carote sono risultate non comprensibili.

A partire dai valori di età e diametro, per ogni specie si è quindi impostato un grafico a dispersione che mettesse in relazione questi due parametri. Dai grafici prodotti si sono poi definite le rette di regressione di tipo lineare, le quali hanno restituito le funzioni utili a stimare le età delle piante a partire dai diametri misurati nel corso dei rilievi relativi alla mappatura (Figura 30).

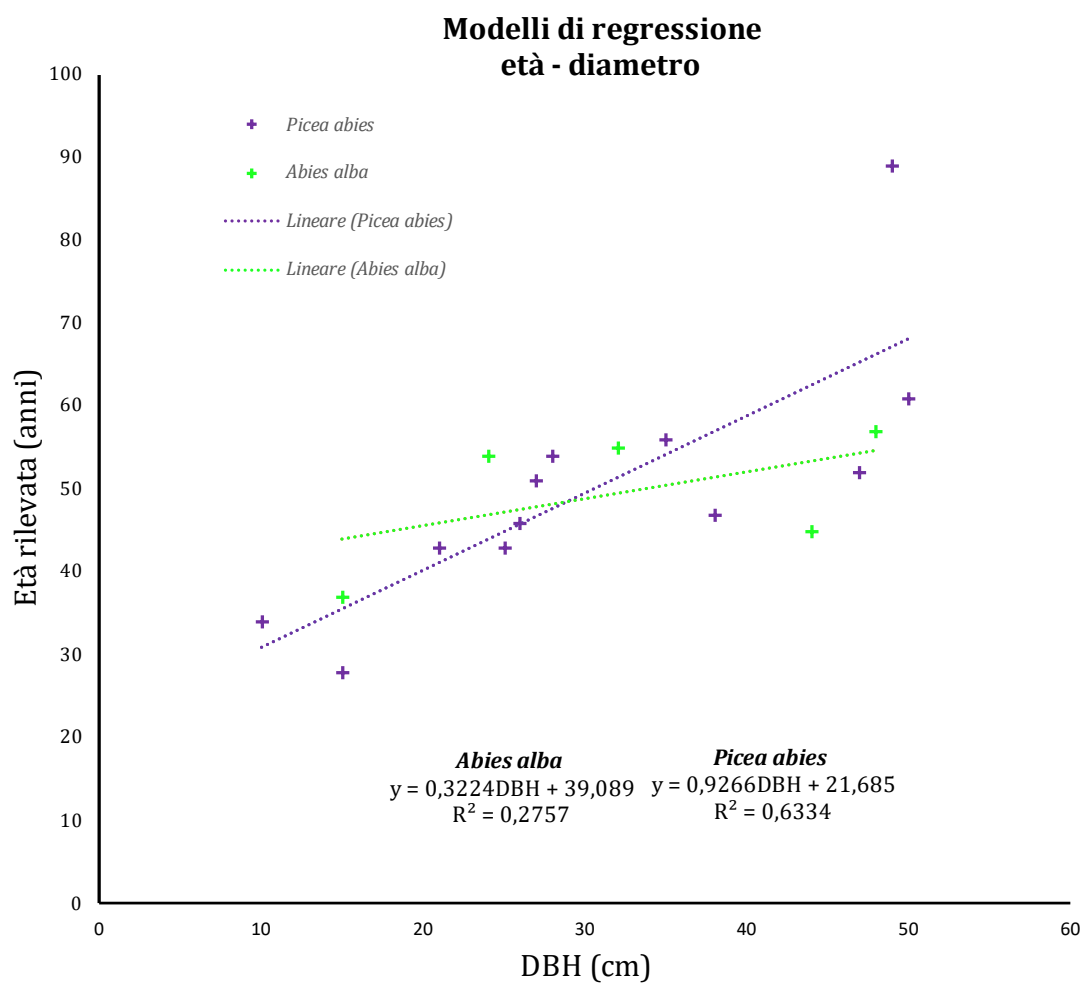


Figura 30 - Modello di regressione età - diametro delle due specie maggiormente presenti.

I modelli relativi alle due specie dominanti sono risultati essere:

$$y = 0,3224DBH + 39,089 \text{ (} Abies \text{ alba)} \quad R^2 = 0,2757$$

$$y = 0,9266DBH + 21,685 \text{ (} Picea \text{ abies)} \quad R^2 = 0,6334$$

Per la terza specie presente, *Juglans regia*, si è fatto ricorso al modello calcolato nello studio di Ares e Brauer (2004), rappresentato dalla seguente funzione:

$$y = \frac{DBH - 1,9157}{0,7984}$$

$$R^2 = 0,73$$

3.3. Descrizione della stazione forestale

Sulla base dei dati rilevati in campo, si è potuto procedere alla descrizione della foresta caratterizzante l'area di studio. Nella Tabella 6 sono riportati, ripartiti in base alle celle, i dati relativi al numero di alberi, all'area basimetrica media e al diametro medio, riferiti sia alle tre specie presenti, sia all'intera cella.

CELLA	Alberi (quantità)				BA media (mq)				DBH medio (cm)
	<i>Picea abies</i>	<i>Abies alba</i>	<i>Juglans Regia</i>	Cella	<i>Picea abies</i>	<i>Abies alba</i>	<i>Juglans regia</i>	Cella	Cella
A1	4			4	0,115			0,115	19,17
A2	4		1	5	0,188			0,188	24,48
A3	6			6	0,309	0,012	0,037	0,079	15,84
A4	2	5	3	10	0,453	0,007	0,005	0,118	19,41
A5	1	2	1	4	0,170			0,170	23,30
A6	5			5	0,174	0,046		0,110	18,73
A7	4	4		8	0,202	0,006		0,170	23,24
A8	5	1		6	0,076		0,028	0,067	14,57
A9	4		1	5	0,057			0,057	13,53
A10	6			6	0,044		0,085	0,052	12,86
B1	2			2	0,172			0,172	23,41
B2	2	1		3	0,418			0,418	36,50
B3	1			1			0,009	0,009	5,50
B4	/	/	/	/	/	/	/	/	/
B5			1	1	0,275	0,062		0,204	25,49
B6	2	1		3	0,150	0,085		0,137	20,91
B7	4	1		5	0,158			0,158	22,42
B8	3			3	0,233			0,233	27,21
B9	5			5	0,131	0,107		0,126	20,04
B10	4	1		5	0,123	0,004		0,084	16,31
C1	10			10	0,161			0,161	22,62
C2	4			4	0,125			0,125	19,96
C3	5			5		0,096		0,096	17,47
C4		3		3	0,157	0,113		0,148	21,72
C5	4	1		5		0,019	0,023	0,022	8,33
C6		3	5	8	0,170	0,028		0,142	21,25
C7	4	1		5	0,122			0,122	19,70
C8	3			3	0,232	0,012		0,100	17,83
C9	2	3		5	0,103	0,025		0,083	16,29
C10	6	2		8	0,098			0,098	17,63
D1	1	3		4	0,145	0,034		0,062	14,03
D2	3			3	0,186			0,186	24,33
D3	3			3	0,268			0,268	29,20
D4	4			4	0,170	0,013		0,131	20,43
D5	3	1		4	0,186	0,023	0,009	0,086	16,53
D6	2	2	1	5		0,069	0,011	0,050	12,57
D7		2	1	3	0,154	0,024		0,110	18,75
D8	4	2		6	0,139	0,015		0,108	18,54
D9	3	1		4	0,075	0,038		0,057	13,44
D10	1	1		2	0,075			0,075	15,47
E1		2	2	4		0,032	0,020	0,026	9,13
E2	1			1	0,239	0,084		0,146	21,60
E3	2	3		5	0,166			0,166	23,00
E4	4			4		0,152		0,152	22,00
E5		1		1	0,139	0,053		0,096	17,48
E6	4	4		8	0,178	0,079		0,107	18,49
E7	2	5		7	0,136	0,044		0,105	18,30
E8	4	2		6	0,092	0,023		0,078	15,75
E9	4	1		5	0,095	0,023		0,083	16,28
E10	5	1		6	0,113			0,113	19,00
Tot. Area	152	60	16	228	0,153	0,045	0,026	0,116	19,21

Tabella 6 - Valori relativi al numero di alberi, all'area basimetrica media (BA) e al diametro medio (DBH), suddivisi per cella, riferiti alle singole specie e all'intera cella. Il DBH medio è il valore del diametro relativo all'area basimetrica media.

All'interno della superficie esaminata, di dimensione pari a 0,5 ha, è stato processato un totale di 228 alberi, definendo una densità di 456 piante/ha e una distribuzione media inferiore a cinque piante per cella (con un massimo di 10 piante e, in un caso, nessuna pianta).

Si è poi determinata la composizione specifica, riferita al numero di piante (Figura 31A): il 67% di queste appartenevano alla specie *Picea abies* (152 esemplari), il 26% alla specie *Abies alba* (60 esemplari) e il 7% alla specie *Juglans regia* (16 esemplari). Avendo a disposizione il valore di DBH di tutte le piante presenti all'interno dei confini dell'area di studio, si è definita anche la composizione specifica riferita all'area basimetrica (Figura 31B): su una superficie totale di 26,41 m² (somma delle aree basimetriche dei singoli alberi, pari ad una densità di 52.82 m²/ha), l'88% era rappresentata dalla specie *Picea abies*, il 10% da *Abies alba* e il 2% da *Juglans regia*. In entrambi i criteri di rappresentazione della composizione specifica, la percentuale relativa alla specie *Picea abies* era superiore al 50%, coerentemente con quanto indicato nella Carta Forestale del Geoportale Piemonte, che inquadrava come "Pecceta" la categoria forestale presente nell'area (cfr. paragrafo 2.1.2).

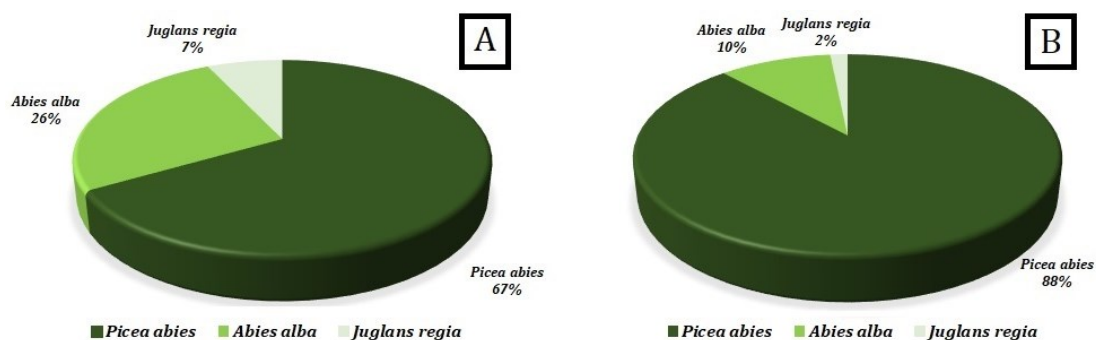


Figura 31 (A-B) – A) Composizione specifica per numero di esemplari; B) Composizione specifica per area basimetrica.

Il valore totale dell'area basimetrica di ogni specie ha permesso inoltre di definire lo stesso parametro, ma riferito alla media, da cui si è potuto ottenere in seguito il valore del diametro medio, risultato maggiore per la specie *Picea abies* (44,18 cm), seguito da *Abies alba* (23,96 cm) e, infine, da *Juglans regia* (18,2 cm).

L'indice relativo all'area basimetrica media è stato infine declinato alle singole celle, con la distribuzione osservabile in Figura 32, la quale ha evidenziato valori maggiori nella zona rivolta a sud – est, con graduale decrescita spostandosi verso la zona nord - ovest.

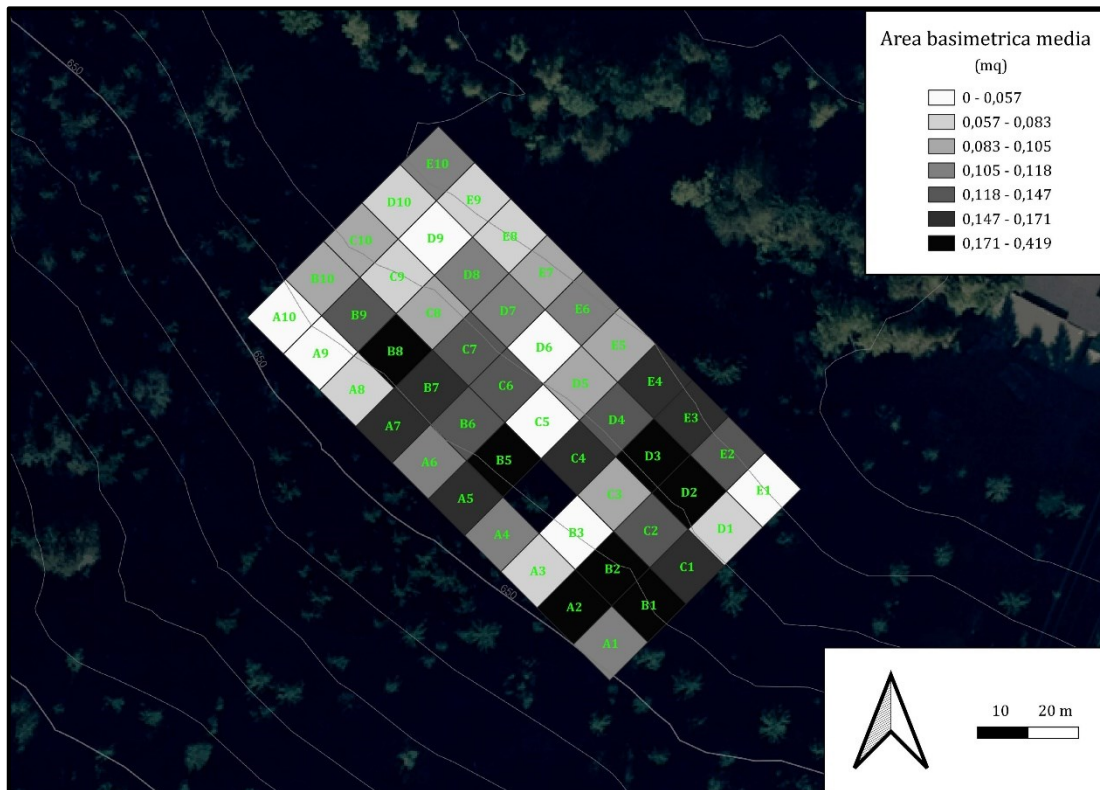


Figura 32 – Rappresentazione in QGIS degli intervalli dei valori relativi all'area basimetrica media, riferiti alle singole celle. La cella B4 non presentava alberi al suo interno.

Per quanto concerne la distribuzione diametrica, utile a definire la struttura verticale, si è proceduto al conteggio degli esemplari (frequenza) appartenenti alla medesima classe di diametro (classi suddivise in multipli di 10). Con l'ausilio di una rappresentazione grafica (Figura 33) che mettesse in relazione i valori di classe diametrica e frequenza, elencati in Tabella 7, è stato possibile attribuire al bosco una struttura disetaneiforme (foresta pluristratificata). Questo dato è risultato essere in contrapposizione con quanto osservato sul Piano Forestale Aziendale, il quale definiva il bosco come coetaneo (monostratificato): gli alberi dal diametro ridotto erano infatti presenti in quantità considerevole, soprattutto

ai margini dell'area, definendo di fatto una struttura complessiva tipica delle foreste disetanee.

Classe diametrica (cm)	Frequenza
5	6
10	24
15	14
20	23
25	25
30	17
35	22
40	19
45	16
50	20
55	18
60	15
65	4
70	1
75	4

Tabella 7 - Classi diametriche e relativa frequenza.

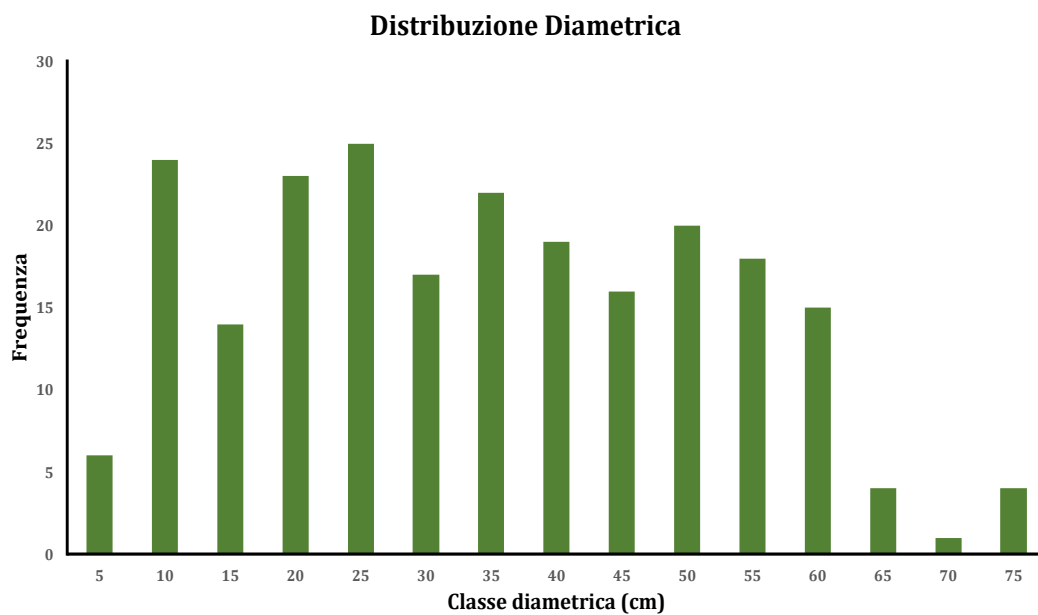


Figura 33 - Elaborazione grafica della distribuzione diametrica per classi (multipli di 5 cm).

3.4. Caduta massi e modelli spazio - temporali

In Tabella 8 sono elencati, per ogni singola cella, i valori medi dell'età stimata, riferiti sia alle tre specie presenti, sia all'intera cella. Analogamente sono riportati i valori relativi alle cicatrici osservate sui fusti degli alberi.

CELLA	Età stimata media (anni)				Cicatrici			
	<i>Picea abies</i>	<i>Abies alba</i>	<i>Juglans regia</i>	Cella	<i>Picea abies</i>	<i>Abies alba</i>	<i>Juglans regia</i>	Cella
A1	56			56	2			2
A2	66			66	2			2
A3	78	43	20	43	1	1	1	3
A4	92	42	8	46	1	1	0	2
A5	63			63	1			1
A6	65	47		56	3	3		6
A7	67	42		62	8	0		8
A8	46		21	41	2		1	3
A9	44			44	2			2
A10	40		39	40	3		1	4
B1	65			65	0			0
B2	89			89	0			0
B3			11	11			2	2
B4	/	/	/	/	/	/	/	/
B5	76	48		67	1	1		2
B6	61	50		59	6	1		7
B7	62			62	7			7
B8	72			72	2			2
B9	57	51		56	2	0		2
B10	58	41		53	0	0		0
C1	61			61	3			3
C2	54			54	1			1
C3		50		50		0		0
C4	61	51		59	1	0		1
C5		44	15	26		3	5	8
C6	64	45		60	5	0		5
C7	58			58	6			6
C8	71	43		54	0	0		0
C9	52	45		50	6	1		7
C10	54			54	4			4
D1	62	45		49	0	1		1
D2	63			63	3			3
D3	76			76	2			2
D4	62	43		57	3	1		4
D5	67	45	11	47	3	2	1	6
D6		49	13	37		4	1	5
D7	62	45		56	6	2		8
D8	60	44		56	1	1		2
D9	50	46		48	2	1		3
D10	49			49	3			3
E1		45	18	31		1	1	2
E2	68	49		56	0	1		1
E3	62			62	2			2
E4		53		53		1		1
E5	59	47		53	7	3		10
E6	65	49		54	3	11		14
E7	58	47		54	4	1		5
E8	52	45		50	1	1		2
E9	52	45		51	8	1		9
E10	57			57	0			0
Tot. Area	60	46	17	53	117	43	13	173

Tabella 8 - Valori relativi all'età stimata media e alle cicatrici osservate sui fusti, suddivisi per cella, riferiti alle singole specie e all'intera cella.

Sui fusti dei 228 alberi mappati si sono osservate 173 cicatrici cagionate dagli impatti dei massi, con una media inferiore ad una cicatrice per albero. In totale, si sono contate 127 piante che presentavano ferite, mentre quelle non danneggiate dai massi sono risultate essere 101, pari al 44% delle piante processate. Circa due terzi delle cicatrici sono state rilevate su alberi appartenenti alla specie *Picea abies*, mentre la quota rimanente era presente in gran parte sugli esemplari di *Abies alba*. Il quantitativo massimo di ferite osservate sul fusto di una singola pianta è risultato pari a quattro (in un solo caso), otto sono stati i casi in cui se ne sono rilevate tre, mentre più frequenti sono stati i fusti che hanno riportato due ferite (27); queste situazioni si sono manifestate con una maggior frequenza nelle celle poste al centro dell'area, ad eccezione di pochi casi in cui si sono manifestate nelle zone esterne (fasce 1 – 2 e 9 – 10).

Facendo riferimento all'età media stimata nelle singole celle, a livello di area totale si è calcolato un valore pari a 53 anni, con gli esemplari più datati appartenenti alla specie *Picea abies*, che hanno evidenziato un'età media pari a 60 anni, con un massimo di 92 e un minimo di 40 anni; di più recente comparsa le specie *Abies alba* (media di 46 anni, con un intervallo compreso tra 41 e 53 anni) e *Juglans regia* (17 anni).

I dati relativi ad età e impatti hanno permesso di ricavare il primo dei due indici di intervallo di ricorrenza, descritti in precedenza nel capitolo 2. Osservando la riproduzione della distribuzione delle gamme di valori all'interno dell'area di studio, proposta in Figura 34, è emerso che gli impatti sui fusti si sono manifestati con intervalli di recidiva inferiori nella zona centrale dell'area, in particolare nelle celle poste più a valle nel versante (pendenze decrescenti verso nord – est). Le aree a colorazione più scura e intensa hanno quindi definito la direzione preferenziale dei massi nel loro movimento. Nella zona a nord si è altresì rilevata l'alternanza di celle interessate da intervalli di ricorrenza minori e celle con intervalli più ampi; è emersa anche in questo caso, seppur con minor evidenza rispetto alla zona centrale, la presenza di una direzione preferenziale dei massi. Situazione inversa si è infine osservata nella zona posta a sud/sud – est, con un alto tasso di celle interessate da intervalli superiori a 30 anni.

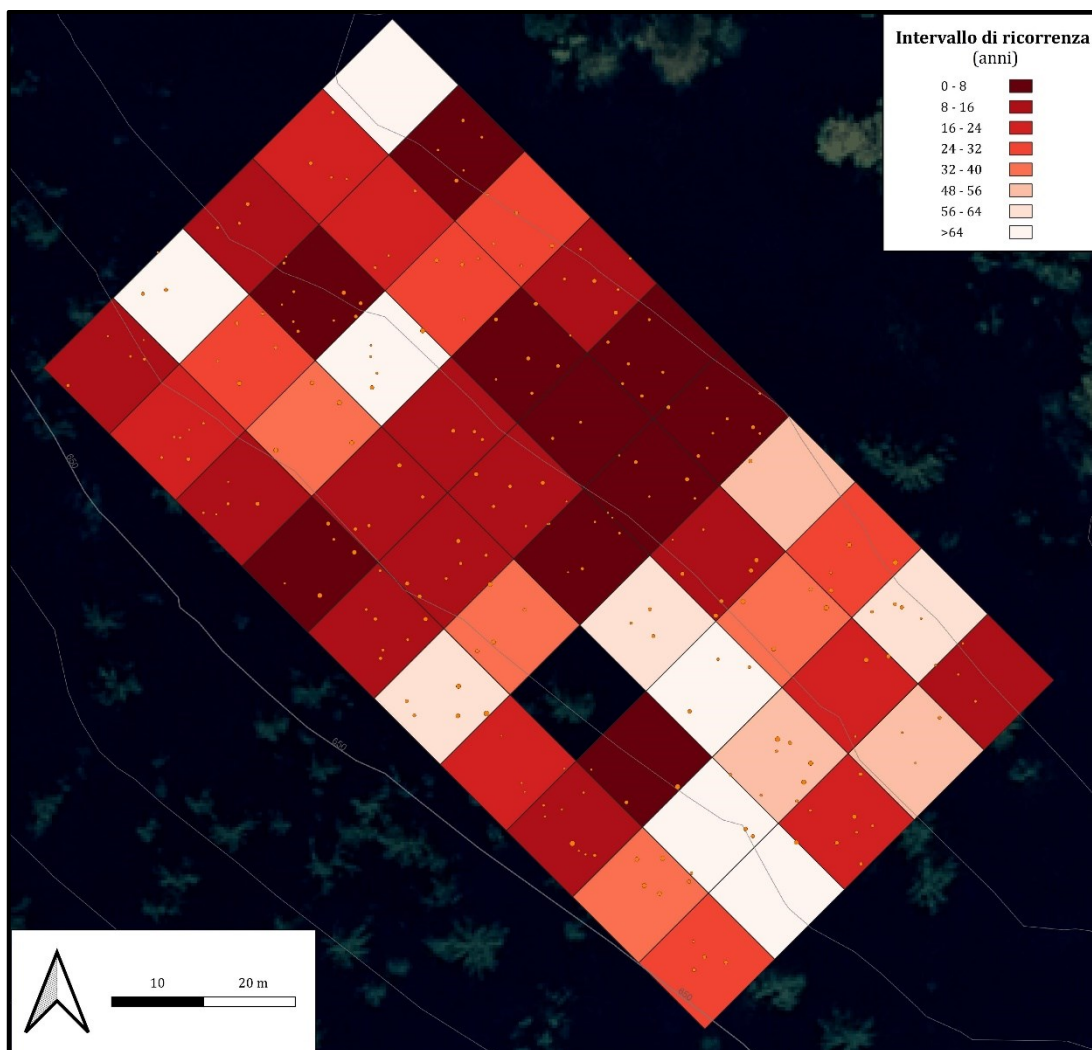


Figura 34 – Rappresentazione in QGIS degli intervalli dei valori relativi all'indice di intervallo di ricorrenza, riferiti alle singole celle, e della mappatura totale degli alberi, la cui dimensione è definita dai diametri misurati. La cella B4 non presentava alberi al suo interno.

I dati riferiti ai singoli DBH sono stati impiegati nel calcolo dell'indice di probabilità di impatto condizionale (CIP), necessario per adeguare i valori dell'indice di intervallo di ricorrenza (ObRic), come descritto nel paragrafo 2.3.7. Ai valori del raggio riferito ad ogni DBH misurato, si è sommato il valore del raggio medio dei massi, determinato approssimativamente sulla base dei diametri di venti massi privi di muschio (Corona et al., 2017), osservati in prossimità del confine dell'area posto valle. La distribuzione nell'area di studio degli intervalli di valori dell'indice, riferiti alle celle, è osservabile in Figura 35. Da un confronto con la distribuzione delle aree basimetriche (Figura 32), si evince l'assenza di una relazione diretta tra i due parametri, riferiti alla medesima cella.

Tutti gli intervalli relativi all'indice CIP sono infatti risultati essere distribuiti in maniera omogenea e casuale sull'area, senza alcun criterio particolare, con una accennata preferenza per la zona posta al centro, a differenza della distribuzione delle aree basimetriche che facevano riscontrare valori superiori nella zona posta a sud. Questa differenza ha messo in evidenza un aspetto significativo: l'indice CIP non è influenzato in maniera rilevante dal diametro degli alberi, bensì dalla quantità numerica degli stessi e dalla loro disposizione rispetto alla pendenza; alberi orientati in file che seguono l'andamento della pendenza (es. celle B5 e D9) hanno restituito valori di CIP inferiori rispetto ad altri disposti per file parallele alle isoipse.

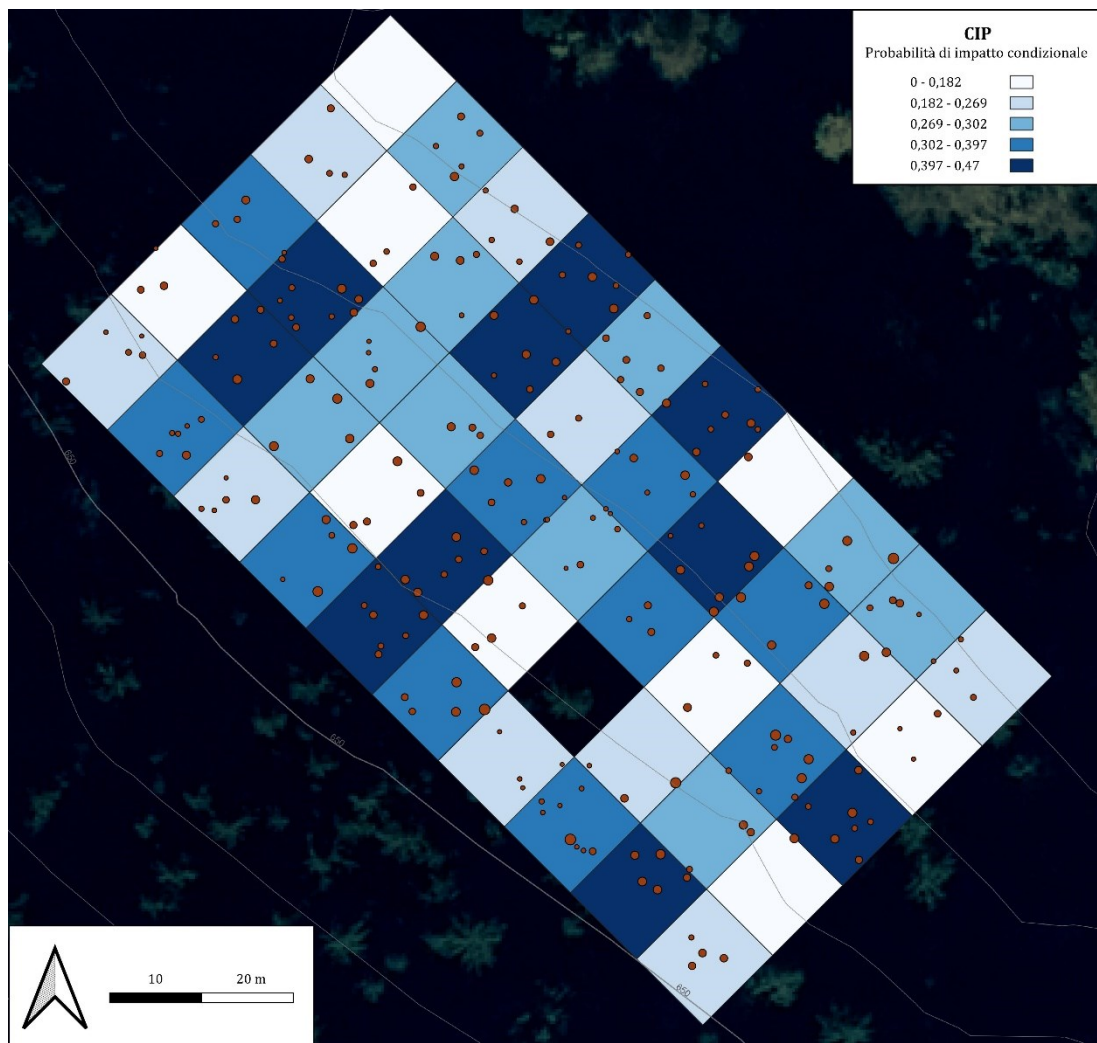


Figura 35 – Rappresentazione in QGIS degli intervalli dei valori relativi all'indice CIP, riferiti alle singole celle, e della mappatura totale degli alberi, la cui dimensione è definita dai cerchi d'impatto. La cella B4 non presentava alberi al suo interno.

Tale tesi è stata verificata anche statisticamente eseguendo il calcolo in R delle correlazioni esistenti tra le serie di valori, relativi alle celle, di DBH, età, cicatrici osservate e quantità numerica degli alberi, secondo il metodo Pearson. Il risultato del calcolo ha quindi evidenziato la presenza di due correlazioni: la prima, tra DBH ed età, la seconda, maggiormente significativa, tra numero di alberi ed impatti, che ha confermato quanto emerso dal confronto visivo tra le rappresentazioni grafiche degli indici di area basimetrica media e CIP. Osservando la Figura 36, i valori negativi hanno evidenziato le correlazioni non riscontrate, come ad esempio tra dati relativi al DBH e quelli relativi al numero di ferite visibili; correlazione che è risultata assente anche nel confronto tra il numero di alberi e il DBH stesso. Esito analogo, infine, si è constatato nella correlazione dell'età con il numero di ferite e con il numero di alberi.

	DBH	Age	Scars	Nr_of_trees
DBH	1.0000000	0.94877768	-0.1645149	-0.19868131
Age	0.9487777	1.0000000	-0.1382441	-0.08939089
Scars	-0.1645149	-0.13824406	1.0000000	0.48865678
Nr_of_trees	-0.1986813	-0.08939089	0.4886568	1.0000000

Figura 36 - Matrice prodotta da R, relativa ai risultati del calcolo della correlazione tra i valori di DBH, età, cicatrici e numero di alberi (riferiti alle singole celle).

L'applicazione degli indici CIP ai rispettivi valori di intervallo di ricorrenza, ha permesso di considerare nello studio anche i massi che non hanno impattato contro gli alberi (o che comunque non hanno lasciato segni visibili su di essi), riducendo sensibilmente il tempo di ritorno degli urti in ogni cella dell'area. Dalla Figura 37 si è potuto constatare che, in molte celle caratterizzate da valori di CIP bassi, come ad esempio in E4, E8, D1 e D2, si è verificata una significativa diminuzione dei valori di intervallo di ricorrenza, in proporzioni maggiori rispetto alle celle aventi valori di CIP alti.

Complessivamente, oltre ad un decremento generale dei valori dell'intervallo di ricorrenza, l'adeguamento all'indice CIP ha risaltato ulteriormente la presenza del percorso preferenziale dei massi nella loro discesa, nell'area centrale.

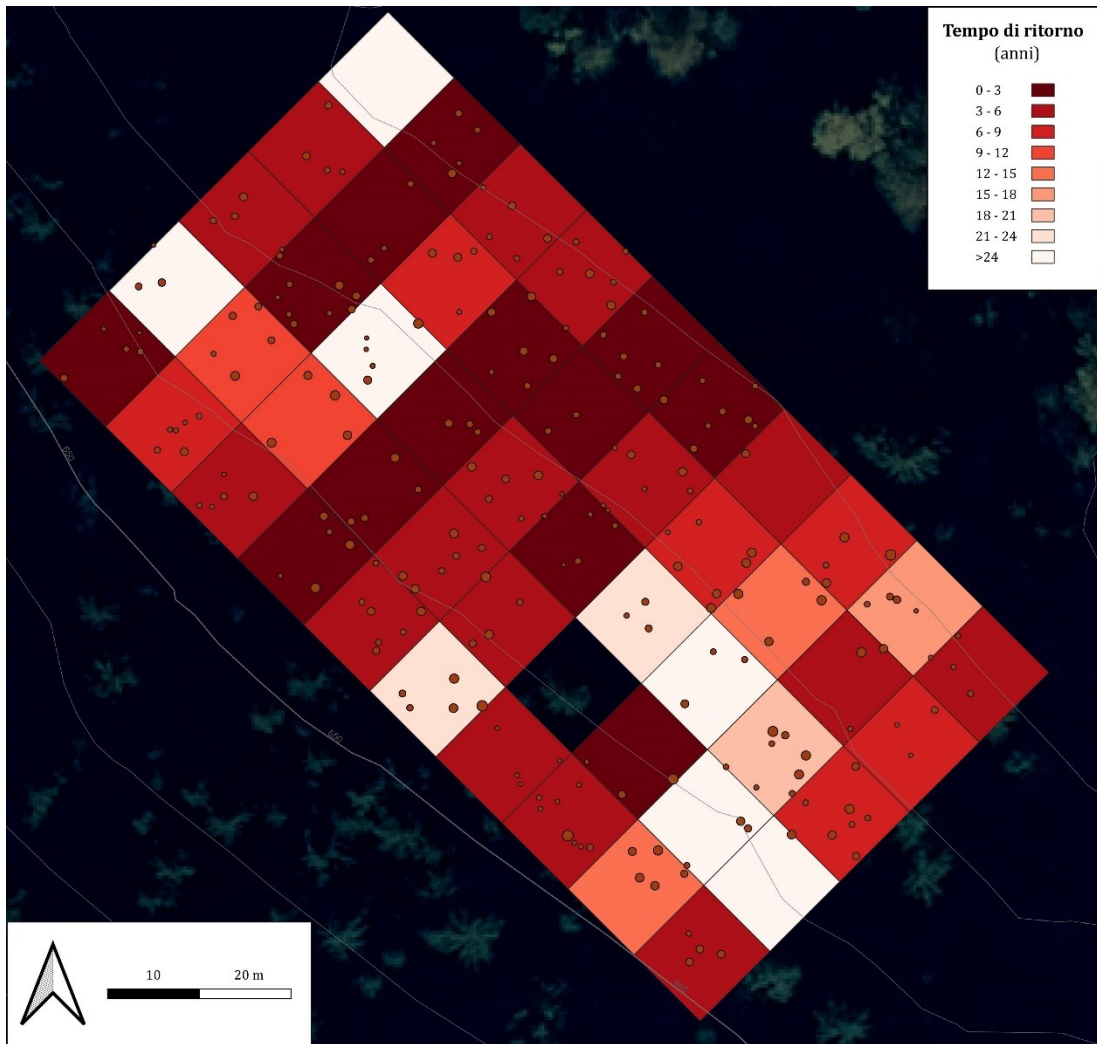


Figura 37 - Rappresentazione in QGIS degli intervalli dei valori relativi al tempo di ritorno, riferiti alle singole celle, e della mappatura totale degli alberi. La cella B4 non presentava alberi al suo interno.

4. DISCUSSIONE

In un'area di 0,5 ha, ripartita in 50 celle quadrate aventi lato pari a 10 m, sono state conteggiate 173 ferite impresse sui fusti di 127 alberi, costituenti un popolamento di conifere costituito da 228 esemplari e geolocalizzati con i metodi descritti nel capitolo 2. Ripercorrendo i procedimenti proposti da Faviller et al. (2017), il numero di ferite osservate sugli alberi, riferite ad ogni singola cella, ha permesso di stimare l'indice di intervallo di ricorrenza ($ObRi_c$) della caduta massi, successivamente adeguato con l'applicazione del parametro di probabilità di impatto condizionale (CIP), basato sulla proiezione dei cerchi di impatto sul lato delle celle posto a valle, parallelo alle linee di pendenza. Tale riformulazione si è resa necessaria al fine di comprendere, nella valutazione del tempo di ritorno dell'evento (R_i), sia i massi che nel loro movimento non hanno impattato contro le piante, sia quelli che, seppur urtando i fusti, non hanno provocato lesioni visibili sulla corteccia. Metodi analoghi sono stati riproposti da Žabota et al. (2020) in un popolamento di *Fagus sylvatica* localizzato nelle Alpi Giulie, in territorio sloveno.

Diversamente dai due studi citati (condotti entrambi all'interno di popolamenti di latifoglie) nel caso descritto dal presente elaborato si è preso in considerazione un bosco di conifere (*Picea abies* e *Abies alba*) con una minuta presenza di *Juglans regia*. Questo aspetto è da considerarsi di rilevanza non trascurabile, in quanto esiste la concreta possibilità che numerosi impatti non siano stati energeticamente sufficienti a generare ferite sui fusti di *Picea abies* (Perret et al., 2006), data la minor suscettibilità della loro corteccia rispetto alle specie di latifoglie esaminate negli studi indicati. Parallelamente, ferite risalenti a molti anni antecedenti l'osservazione potrebbero essere state completamente rese invisibili dalla corteccia stessa. Tale ipotesi è confermata da uno studio comparativo tra i metodi dendrogeomorfologici tradizionali e quelli basati sul conteggio delle ferite, condotto da Mainieri et al., 2019. Risentono meno di questo aspetto le altre due specie presenti nell'area (*Abies alba* e *Juglans regia*), in quanto rivestite da una corteccia meno consistente e più facilmente lesionabile.

Un altro confronto significativo con gli studi proposti sulle latifoglie ha riguardato la quantità di impatti osservati, risultata inferiore nel popolamento di conifere

oggetto dello studio. In particolare, Žabota et al. (2020) hanno rilevato una media di circa 7 impatti per pianta che, nonostante rappresentasse una quantità considerevole, ha però restituito valori di intervallo di ricorrenza molto elevati: su questo aspetto ha influito l'età degli alberi, di molto superiore agli altri casi. Dal calcolo eseguito in R, relativo alla correlazione esistente tra il numero di cicatrici e l'età, riferiti al caso di studio in oggetto, non è infatti emersa alcuna significativa corrispondenza in tal senso, attribuendone la causa alla relativamente giovane età del popolamento di conifere.

Una terza differenza emersa nel confronto tra i casi riguarda la densità di popolamento, dal punto di vista del numero di esemplari, nettamente superiore nello studio di Faviller et al. (2017); la foresta da loro esaminata era inoltre caratterizzata da una forma di governo a ceduo, fattore che ha spesso determinato un'estensione dell'ingombro nella direzione parallela alle linee di pendenza del versante. Si è a tal fine dimostrato statisticamente, anche in questo caso ricorrendo al calcolo delle correlazioni in R, che il numero di alberi presenti ha influenzato il dato relativo al numero di cicatrici osservate, contrariamente al valore dell'area basimetrica (e, pertanto, del DBH) che non ha restituito una correlazione rilevante con il numero di ferite. Questi aspetti hanno quindi influito notevolmente sull'indice CIP e, di conseguenza, sul calcolo del tempo di ritorno. Nello studio sloveno, invece, i valori di CIP erano simili a quelli rilevati nello studio sulle conifere, facendo emergere tempi di ritorno più alti anche in questo caso, nonostante fossero comunque diminuiti rispetto agli intervalli di ricorrenza che non consideravano l'indice di adeguamento.

Un'ultimo confronto può essere valutato circa l'aspetto delle ferite. Dato il numero elevato di campioni rilevati, a seguito di una valutazione visiva, Žabota et al. (2020) hanno catalogato le cicatrici in tre differenti fasce d'età, operazione non praticabile nello studio oggetto dell'elaborato. Altresì, nel popolamento di conifere, numerose osservazioni di ferite sono state agevolate dalla presenza di resina sul fusto, fuoriuscita da incisioni non altrimenti riscontrabili.

Dall'analisi dei risultati relativi ai tempi di ritorno delle cadute dei massi, descritta nel paragrafo 3.4, era emersa l'esistenza di due percorsi prediletti dai massi stessi, in entrambi i metodi di valutazione (ObRic e Ri adeguato al CIP). Le

celle presenti lungo questi percorsi erano caratterizzate da valori dell'indice CIP diversi tra loro, alternando intervalli di percentuali alti ad intervalli più ridotti. Considerando ad esempio il percorso insediato nell'area centrale, nonostante alcune celle poste a monte presentassero valori di CIP elevati, le celle a valle hanno comunque fatto registrare tempi di ritorno relativamente ridotti, assimilabili a quelli ottenuti in prossimità del confine superiore (a monte). Questo aspetto ha dunque messo in evidenza la non adeguata efficacia protettiva delle celle a monte, le quali avrebbero dovuto limitare l'apporto di massi nelle celle a valle, essendo queste poste nelle immediate vicinanze di una strada agro - silvo - pastorale e di una centrale idroelettrica, aumentando quindi il fattore di rischio; si è ritenuto opportuno perciò ipotizzare la messa in pratica di interventi selvicolturali mirati all'aumento dell'indice CIP nelle celle a monte, al fine di ottenere un miglioramento del grado di intercettazione dei massi da parte degli alberi, limitando la possibilità che questi giungano nelle celle poste in prossimità del limite inferiore dell'area. Considerando il valore medio dei massi stimato in 40 cm e declinandolo alle esigenze minime di stabilità richieste per una foresta preposta alla protezione da questo tipo di fenomeno (Berretti et al., 2006), si sono potuti definire gli interventi selvicolturali necessari al raggiungimento di tali esigenze. Sebbene l'area di studio fosse caratterizzata da una densità totale pari a 456 piante/ha, sufficiente a rispettare l'esigenza minima prescritta di 400 piante/ha, nella fascia centrale (in corrispondenza del percorso preferenziale) si è rilevato un calo rispetto a questo limite, con soli 19 esemplari presenti, corrispondenti ad una densità di 254 piante/ha. Si è quindi ipotizzata la realizzazione di aperture nella fasce centrali dell'area secondo le linee di pendenza, al fine di favorire l'accrescimento della rinnovazione presente, fermo restando il rispetto dell'ampiezza massima ammessa, fissata in 20 m (distanza tra un albero e il successivo). Tale intervento sarebbe quindi finalizzato ad incrementare il numero di piante che, pur determinando una riduzione del DBH medio, contribuirebbero all'aumento dei valori dell'indice CIP (come dimostrato dal confronto con gli altri casi di studio) una volta completato il loro sviluppo. La rimozione degli alberi individuati allo scopo dovrebbe inoltre essere effettuata in maniera tale da garantire il mantenimento del valore dell'indice CIP antecedente

al taglio, per un periodo sufficiente a compensare la fase di crescita della rinnovazione; lasciando in loco la ceppaia con un'altezza adeguata del punto di taglio, questa conserverebbe per un discreto periodo di tempo la capacità di intercettare i massi, con il cerchio di impatto che risulterebbe ancora in essere, in grado di apportare ugualmente il suo contributo al calcolo dell'indice. Allo stesso tempo, le linee guida propongono il non esbosco delle piante abbattute, disponendole in posizione trasversale rispetto alla pendenza, in quanto tale pratica contribuirebbe alla dissipazione dell'energia posseduta dai massi, rallentandone la corsa. Essendo le pendenze non superiori a 35°, i massi si muoverebbero rotolando o scivolando, senza generare saltellamenti (Berretti et al., 2006), motivo per cui la ceppaia alta e gli alberi rilasciati al suolo garantirebbero comunque un contributo rilevante nell'intercettazione dei massi.

Le esigenze minime richieste alla foresta di protezione comprendono anche la valutazione dei DBH: sebbene si sia dimostrato che per il calcolo dell'indice CIP questo aspetto non influisca significativamente, nel caso della resistenza di un albero agli impatti risulta invece essere un fattore vincolante, in quanto per DBH inferiori a 12.5 cm questa non sarebbe garantita nei confronti di massi dal diametro di 40 cm. Nello studio in oggetto, il DBH medio è risultato inferiore a questa soglia in sole tre celle (di cui una localizzata nella fascia centrale), le quali dovrebbero essere oggetto di interventi atti ad eliminare queste criticità. Infine, sebbene *Picea abies* e *Abies alba* siano specie aventi il legno non troppo consistente, non si è ritenuta opportuna la sostituzione con specie più resistenti, in quanto i diametri medi registrati sono risultati ampiamente sufficienti allo scopo.

Il metodo di studio, caratterizzato dal conteggio delle ferite utile a ricostruire i tempi di ritorno della caduta massi, si è rivelato essere una valida alternativa all'approccio dendrogeomorfologico tradizionale basato sull'analisi degli anelli di crescita, tesi dimostrata in diversi studi di Trappman e Stoffel (2013, 2015). Data la sua praticità nell'esecuzione, l'applicazione di tale metodo può essere rivolta a superfici più estese, in quanto caratterizzato da un dispendio economico relativamente contenuto, oltre ad una maggiore rapidità d'esecuzione. Inoltre,

l'approccio permette di rilevare complessivamente un numero maggiore di eventi rispetto all'analisi delle anomalie di crescita degli anelli, in quanto il limitato numero di carote estraibili può occultare eventuali segni di impatti passati (Žabota et al., 2020). Infine, una discriminazione riguardante l'età delle ferite, potrebbe consentire una valutazione circa gli eventi recenti e quelli passati. Pur restituendo risultati positivi, l'approccio ha messo in evidenza alcuni limiti per i quali occorrerebbe prevedere ed attuare, in futuro, strategie volte ad oltrepassarli. Come specificato, la visibilità delle ferite sulle latifoglie è maggiore rispetto alle conifere, aspetto che spesso comporta una sovrastima delle prime ed una sottostima delle seconde (Mainieri et al., 2019), con conseguente ricaduta sulla stima degli intervalli di ricorrenza. Per le latifoglie, infatti, la presenza di più cicatrici sul fusto potrebbe essere una conseguenza dell'impatto di un singolo masso (evento ricorrente se si è in presenza di bosco ceduo); in senso opposto, le conifere potrebbero non presentare evidenti segni a seguito di urti, in quanto caratterizzate da corteccia resistente e in grado di rimarginare rapidamente l'eventuale ferita (aspetto frequente per la specie *Picea abies* in età giovane). Al fine di ottenere risultati più attendibili, è dunque preferibile perseguire tale approccio in popolamenti di latifoglie aventi diametri ridotti, meglio se non ceduati. Sovrastima e sottostima degli eventi potrebbero essere anche determinati dalla dimensione dei massi: nello studio in oggetto si è infatti considerato un diametro medio, di conseguenza i massi aventi dimensioni minori potrebbero non aver lasciato segni evidenti nell'impatto (ipotesi valida anche per le poche latifoglie presenti), mentre i massi con diametri superiori alla media potrebbero aver cagionato più ferite in un singolo urto. Un'ulteriore fattore di sottostima potrebbe essere riconducibile a più urti avvenuti nello stesso punto del fusto e considerati come singoli impatti, in quanto non distinguibili (Trappman e Stoffel, 2013).

Infine, merita una riflessione l'analisi del metodo di stima dell'età delle piante, in quanto i modelli di regressione hanno restituito in entrambi i casi (*Picea abies* e *Abies alba*) valori di R^2 molto bassi, indicando una ridotta bontà dei dati; per questo motivo le stime potrebbero non corrispondere alla situazione reale, influenzando il calcolo degli indici relativi ai tempi di ritorno.

5. CONCLUSIONI

L'osservazione delle ferite sui fusti degli alberi presenti nel popolamento oggetto dello studio, coadiuvata dalla presenza di colate di resina sugli stessi, ha permesso una ricostruzione dei tempi di ritorno della caduta massi all'interno dell'area.

Tuttavia, si suppone che esemplari della specie *Picea abies*, dato lo spessore della corteccia, abbiano messo in evidenza solo quelle lesioni derivanti da impatti ad alta energia, al contrario delle ferite osservabili sulle specie *Juglans regia* e *Abies alba*, la cui eventuale maggior presenza avrebbe presumibilmente restituito un numero di ferite maggiore. Per questa ragione, studi che intendono perseguire tale approccio è preferibile svolgerli in aree con popolamenti di latifoglie.

Un aspetto evidenziabile riguarda l'applicazione di alcune semplificazioni, praticate in diverse situazioni nel corso dello svolgimento dello studio.

Per ciò che riguarda il suolo, si è ipotizzato un profilo non rugoso, uniforme, non considerando la presenza di piante abbattute e di specie arbustive sulla superficie, elementi che possono influenzare l'attività di caduta dei massi. Relativamente ai massi, non sono stati distinti gli elementi derivanti dalla zona di distacco (per cause naturali) da quelli provenienti dal cedimento dei muretti a secco, equiparando quindi i pericoli di origine antropica a quelli naturali. Per motivi di sicurezza, inoltre, non è stato possibile valutare attentamente la stessa zona di distacco, che è stata ipotizzata non circoscritta ad un'area ristretta, ma diffusa lungo tutta la lunghezza parallela alle linee di pendenza del versante. Infine, le pendenze si sono assunte costanti per tutta l'area.

In riferimento all'indice di probabilità di impatto condizionale, si è considerato che tutte le piante presentassero un fusto esattamente verticale, che i massi avessero dimensioni medie di 40 cm (sulla base di valutazioni visive tra quelli che si presentavano privi di muschio) e che la loro traiettoria fosse perpendicolare alle linee di pendenza del versante.

Il metodo del conteggio delle ferite, associato all'indice di probabilità di impatto condizionale, può essere considerato un approccio attendibile seppur meno preciso dei metodi tradizionali, anche alla luce del fatto che non esiste una registrazione storica completa degli eventi di caduta massi. Vista la praticità

nell'applicazione, con evidenti vantaggi dal punto di vista economico e temporale, tale approccio può essere applicato più frequentemente, soprattutto su aree a superficie maggiore.

6. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

6.1. Bibliografia

Abellán, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., & Blanchard, J. (2010). Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology*, 119(3-4), 162-171.

Alestalo, J. (1971). Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia-International Journal of Geography*, 105(1).

Ares, A., & Brauer, D. (2004). Growth and nut production of black walnut in relation to site, tree type and stand conditions in south-central United States. *Agroforestry systems*, 63, 83-90.

Bernetti, G., Del Favero, R., & Pividori, M. (2012). *Selvicoltura produttiva: manuale tecnico*. Edagricole.

Corona, C., Lopez-Saez, J., Favillier, A., Mainieri, R., Eckert, N., Trappmann, D., ... & Berger, F. (2017). Modeling rockfall frequency and bounce height from three-dimensional simulation process models and growth disturbances in submontane broadleaved trees. *Geomorphology*, 281, 66-77.

D'Amato, J., Guerin, A., Hantz, D., Rossetti, J. P., & Jaboyedoff, M. (2015). Investigating rock fall frequency and failure configurations using terrestrial laser scanner. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2: Landslide Processes* (pp. 1919-1923). Springer International Publishing.

Dorren, L., Berger, F., Jonsson, M., Krautblatter, M., Mölk, M., Stoffel, M., & Wehrli, A. (2007). State of the art in rockfall-forest interactions. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 158(6), 128-141.

Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J. R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M., & Giraud, A. (2002). Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural hazards and earth system sciences*, 2(1/2), 15-26.

Favillier, A., Mainieri, R., Saez, J. L., Berger, F., Stofel, M., & Corona, C. Dendrogeomorphic assessment of rockfall recurrence intervals at Saint Paul de Varcès, Western French Alps. *Groupe Français de Géomorphologie* 23 (2), 109-119 (2017).

Ferro, V. (2013). *Elementi di idraulica e idrologia: per le scienze agrarie, ambientali e forestali*. McGraw-Hill.

Gasparini, P., Di Cosmo, L., Floris, A., & De Laurentis, D. (2022). *Italian National Forest Inventory—Methods and Results of the Third Survey: Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio—Metodi e Risultati della Terza Indagine* (p. 576). Springer Nature.

Gisotti, G. (2020). *Il dissesto idrogeologico. Previsione, prevenzione e mitigazione del rischio*. Dario Flaccovio Editore.

Gsteiger, P. (1989). *Steinschlag, Wald, Relief: Empirische Grundlagen zur Steinschlagmodellierung*. na.

Gsteiger, P. (1993). *Steinschlagschutzwald. ein beitrag zur abgrenzung, beurteilung und bewirtschaftung*. *Schweiz. Z. Forstwes*, 144(2), 115-132.

- Hantz, D., Rossetti, J. P., Servant, F., & D'Amato, J. (2014). Etude de la distribution des blocs dans un éboulement pour l'évaluation de l'aléa. *Proceedings of Rock Slope Stability*, 10.
- Hungr, O., Evans, S. G., & Hazzard, J. (1999). Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(2), 224-238.
- Mainieri, R., Lopez-Saez, J., Corona, C., Stoffel, M., Bourrier, F., & Eckert, N. (2019). Assessment of the recurrence intervals of rockfall through dendrogeomorphology and counting scar approach: A comparative study in a mixed forest stand from the Vercors massif (French Alps). *Geomorphology*, 340, 160-171.
- Matsuoka, N. (2008). Frost weathering and rockwall erosion in the southeastern Swiss Alps: Long-term (1994–2006) observations. *Geomorphology*, 99(1-4), 353-368.
- Motta, R., & Haudemand, J. C. (2000). Silvicultural planning in protective forests in the European Alps: one example from the Aosta Valley (Italy). *Mountain Research and Development*, 20, 74-81.
- Moya, J., Corominas, J., & Arcas, J. P. (2010a). Assessment of the rockfall frequency for hazard analysis at Solà d'Andorra (Eastern Pyrenees). *Tree Rings and Natural Hazards: A State-of-Art*, 161-175.
- Moya, J., Corominas, J., Arcas, J. P., & Baeza, C. (2010b). Tree-ring based assessment of rockfall frequency on talus slopes at Solà d'Andorra, Eastern Pyrenees. *Geomorphology*, 118(3-4), 393-408.
- Perret, S., Stoffel, M., & Kienholz, H. (2006). Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps—a dendrogeomorphological case study. *Geomorphology*, 74(1-4), 219-231.
- Piussi, P., & Alberti, G. (2015). *Selvicoltura generale. Boschi, società e tecniche colturali*. Compagnia delle Foreste Srl.
- Sass, O., & Oberlechner, M. (2012). Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria?. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(11), 3209-3216.
- Schweingruber, F. H. (1996). *Tree rings and environment: dendroecology* (pp. 609-pp).
- Shroder, J. F. (1978). Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*, 9(2), 168-185.
- Šilhán, K., Pánek, T., & Hradecký, J. (2013). Implications of spatial distribution of rockfall reconstructed by dendrogeomorphological methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(7), 1817-1826.
- Stoffel, M. (2005). Assessing the vertical distribution and visibility of rockfall scars in trees (reviewed paper). *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 156(6), 195-199.
- Stoffel, M. (2006). A review of studies dealing with tree rings and rockfall activity: The role of dendrogeomorphology in natural hazard research. *Natural Hazards*, 39, 51-70.
- Stoffel, M., & Bollschweiler, M. (2008). Tree-ring analysis in natural hazards research—an overview. *Natural hazards and earth system sciences*, 8(2), 187-202.

- Stoffel, M., & Perret, S. (2006). Reconstructing past rockfall activity with tree rings: some methodological considerations. *Dendrochronologia*, 24(1), 1-15.
- Stoffel, M., Lièvre, I., Monbaron, M., & Perret, S. (2005a). Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Swiss Alps)—a dendrochronological approach. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49, 89-106.
- Stoffel, M., Schneuwly, D., Bollschweiler, M., Lievre, I., Delaloye, R., Myint, M., & Monbaron, M. (2005b). Analyzing rockfall activity (1600–2002) in a protection forest—a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*, 68(3-4), 224-241.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D. R., & Luckman, B. H. (Eds.). (2010). *Tree rings and natural hazards: a state-of-art* (Vol. 41). Springer Science & Business Media.
- Stoffel, M., Butler, D. R., & Corona, C. (2013). Mass movements and tree rings: A guide to dendrogeomorphic field sampling and dating. *Geomorphology*, 200, 106-120.
- Trappmann, D., & Stoffel, M. (2013). Counting scars on tree stems to assess rockfall hazards: a low effort approach, but how reliable?. *Geomorphology*, 180, 180-186.
- Trappmann, D., & Stoffel, M. (2015). Visual dating of rockfall scars in *Larix decidua* trees. *Geomorphology*, 245, 62-72.
- Trappmann, D., Stoffel, M., & Corona, C. (2014). Achieving a more realistic assessment of rockfall hazards by coupling three-dimensional process models and field-based tree-ring data. *Earth surface processes and landforms*, 39(14), 1866-1875.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33.
- Walter, H., & Lieth, H. (1967). *Klimadiagramm-Weltatlas: Von Heinrich Walter Und Helmut Lieth*. G. Fischer.
- Wasser, B., Frehner, M., Frey, H. U., & Ott, E. (1996). *Cure minime per boschi con funzione protettiva*. Berna: Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio.
- Wendeler, C. (2016). Debris-flow protection systems for mountain torrents: basics principles for planning and calculation of flexible barriers.
- Žabota, B., Trappmann, D., Levanič, T., & Kobal, M. (2020). Reconstruction of rockfall activity through dendrogeomorphology and a scar-counting approach: a study in a beech forest stand in the Trenta valley (Slovenian Alps).

6.2. Sitografia

<https://journals.openedition.org/>

<https://www.wsl.ch/it/>

<https://www.researchgate.net/>

<https://iforest.sisef.org/>

<https://www.sciencedirect.com/>

<https://www.sba.unimi.it/>

<https://webgis.arpa.piemonte.it>

<https://www.arpa.piemonte.it/>

<https://www.geoportale.piemonte.it>

<https://earth.google.com/>

<https://www.servizi.piemonte.it/srv/sifor>

<https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/foreste>

<https://suolo.ipla.org/>

<https://www.qgis.org/it>

<https://cran.r-project.org/>

<https://posit.co/>

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questa splendida esperienza è doveroso ringraziare tutte quelle persone che mi hanno guidato e supportato lungo questo percorso.

Ringrazio mia mamma Adele, mio papà Claudio e mia sorella Valentina per avermi sempre sostenuto e per aver compreso e accettato il mio essere meno presente in questi anni, consapevoli che avessi un sogno da realizzare.

Ringrazio i miei suoceri, Irma e Arrigo, che in questi anni sono sempre stati presenti e disponibili con me e Chiara per aiutarci a raggiungere i nostri obiettivi.

Ringrazio i miei nipoti Gemma, Gioele, Elena, Riccardo e Sofia e i miei cognati Chiara, Federica, Gabriele, Giuseppe e Luca, perché da ognuno di voi ho saputo cogliere motivazione e forza di volontà nel raggiungere questo traguardo.

Ringrazio il Professor Giorgio Vacchiano per essersi reso disponibile nel propormi un tirocinio che potesse venire incontro alle mie esigenze, per avermi trasmesso l'interesse per la materia e soprattutto per avermi insegnato ad osservare una foresta con occhi diversi.

Ringrazio il Dottor Sebastian Brocco per avermi seguito con passione, competenza, disponibilità e capacità di trovare soluzioni ad ogni difficoltà in tutte le fasi del tirocinio e della stesura dell'elaborato.

Ringrazio il Dottor Marco Minoli con il quale ho condiviso le attività in bosco e la cui preziosa collaborazione ha permesso di poter svolgere tutti i rilievi.

Ringrazio il Dottor Silvio Oggioni per le fondamentali consulenze di dendrocronologia, sia teoriche che pratiche.

Ringrazio tutti i docenti Unimont per gli insegnamenti e l'attenzione dimostrata ad ogni mia richiesta, comprendendo il mio stato di studente non frequentante.

Ringrazio inoltre lo staff della segreteria didattica di Edolo per la professionalità che difficilmente è possibile trovare altrove.

Ringrazio tutti quei ragazzi del corso di Edolo che mi hanno aiutato in questi anni, in particolare Paola e Cristian, sempre gentili e disponibili nel fornirmi informazioni di ogni tipo.

Ringrazio i miei colleghi di lavoro dell'area risorse umane Gianluca, Raffaella ed Elisabetta per aver riconosciuto le mie difficoltà in un momento per me delicato,

garantendomi la possibilità di studiare senza sacrificare il tempo da dedicare alla famiglia. Ringrazio inoltre il mio referente di reparto Carluccio per aver gestito le mie frequenti assenze (sia fisiche che mentali) in quest'ultimo anno.

Ringrazio tutti gli zii, i cugini, gli amici e i colleghi che anche con un semplice "come vanno gli studi?" hanno saputo darmi supporto e determinazione.

Le menzioni conclusive desidero riservarle alle due persone che più mi sono state accanto e che hanno condiviso con me questo percorso.

La prima persona, che ringrazio e alla quale dedico il raggiungimento di questo traguardo, è mio figlio Lorenzo. Sei arrivato nel bel mezzo del viaggio e ti sei ritrovato catapultato nel nostro caos quotidiano, non l'hai scelto tu e di questo mi spiace. Forse sei ancora troppo piccolo per capire quanto importante fosse per me questo obiettivo, da quando sei con noi ho cercato di essere il più possibile presente come padre ma inevitabilmente non ho potuto dedicarti parte del nostro tempo. Spero che un domani tu possa comprenderne il motivo, come spero che capisca quanto tu sia stato importante per me nella realizzazione di questo sogno. La seconda persona, a cui vanno il ringraziamento e la dedica più grandi, è mia moglie Chiara. Con la tua determinazione e la tua ambizione sei sempre stata un riferimento per me, forse sei colei che più ha creduto in tutto questo, ancor più di quanto ci credessi io. Mi hai sempre esortato a riprendere gli studi senza mai essere insistente, consapevole di quanto fosse difficile per me tale scelta. E così, come il torrente agisce sulla roccia e forma l'orrido, allo stesso modo tu mi hai condotto a prendere questa decisione, di questo ti sarò sempre grato. Come ti sarò grato per avermi sempre sostenuto e spronato in ogni momento dello studio, anche quando ci siamo resi conto, ad un certo punto, che la strada da percorrere si stesse facendo inevitabilmente più complicata. E invece ce l'abbiamo fatta, assieme, perché senza di te non avrei mai concluso e nemmeno iniziato questo percorso. Grazie.