



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali**

Corso di Laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

**Struttura e dinamismi in un popolamento di *timberline* analizzati  
attraverso il monitoraggio di lungo termine**

Relatore  
Prof. Marco Carrer

Laureando  
Andrea Borgatti

Matricola n. 1236925

ANNO ACCADEMICO 2021/2022



## INDICE

Riassunto .....	3
Abstract.....	5
1. INTRODUZIONE.....	7
2. DESCRIZIONE GENERALE DELL'AREA DI STUDIO .....	10
2.1 Inquadramento geografico e fisico .....	10
2.2 Caratteristiche geo-pedologiche.....	12
2.3 Inquadramento climatico.....	14
2.4 Descrizione dell'area di monitoraggio permanente .....	16
3. MATERIALI E METODI .....	19
3.1 Il campionamento .....	19
3.2 Analisi statistica delle variabili non spaziali .....	21
3.3 Analisi spaziale .....	22
3.3.1 Generalità .....	22
3.3.2 Metodologie di analisi spaziale .....	23
3.3.3 Analisi della distribuzione spaziale – <i>Point Pattern Analysis</i> .....	24
3.3.4 Analisi della struttura – <i>Surface Pattern Analysis</i> .....	29
4. RISULTATI.....	34
4.1 Caratteristiche strutturali del popolamento.....	34
4.1.1 Composizione specifica .....	35
4.1.2 Mortalità.....	36
4.1.3 Altezza.....	37
4.1.4 Diametro.....	38
4.1.5 Età.....	39

4.1.6	Relazione tra le variabili biometriche.....	41
4.1.7	La rinnovazione, caratteristiche strutturali dal 1994 al 2021 .....	42
4.2	Point Pattern Analysis .....	46
4.2.1	Analisi della distribuzione spaziale dell'intero popolamento .....	49
4.2.2	Analisi della distribuzione spaziale della rinnovazione .....	51
4.2.3	Analisi della distribuzione spaziale delle piante morte .....	62
4.3	Surface Pattern Analysis .....	65
4.3.1	Analisi della struttura spaziale globale e locale del popolamento.....	65
4.3.2	Analisi della struttura spaziale globale e locale della rinnovazione .....	69
4.3.3	Analisi della struttura spaziale globale e locale del popolamento, con la variabile età .....	78
5.	DISCUSSIONE .....	82
6.	CONCLUSIONI .....	92
7.	BIBLIOGRAFIA .....	94

## *Riassunto*

Con la presente ricerca è stata analizzata una delle tre aree di monitoraggio permanente posizionate sulle pendici nord-orientali del massiccio di Croda da Lago, nel territorio delle Dolomiti Ampezzane. L'area di monitoraggio oggetto di studio si colloca ad una quota di circa 2.100 metri, si estende su 4 ettari di superficie e ospita un popolamento forestale afferente al tipo del larici-cembreto tipico di *timberline*, in cui larice (*Larix decidua* Mill.) e pino cembro (*Pinus cembra* L.) dominano sulla quota di individui di abete rosso (*Picea abies* L.), pino mugo (*Pinus mugo* Turra) e sorbo degli uccellatori (*Sorbus aucuparia* L.).

L'area di monitoraggio risulta particolarmente interessante per lo studio delle dinamiche evolutive delle foreste d'alta quota perché da oltre due secoli non vengono svolti prelievi significativi e da circa 50 anni anche il pascolamento è stato interrotto. Questo ha permesso al popolamento di svilupparsi in condizioni prossime alla naturalità, fenomeno sempre più raro per i boschi alpini.

Il popolamento in esame è stato caratterizzato dal punto di vista strutturale ed evolutivo, attraverso l'analisi delle variabili biometriche, della distribuzione e della struttura spaziale, considerando diversi step temporali. Sono state, inoltre, indagate le principali cause di mortalità degli individui, in particolare di quelli più giovani.

Dai risultati ottenuti si è potuto constatare come il popolamento si trovi attualmente in una fase evolutiva, in cui la quota di individui di pino cembro sta aumentando a discapito del larice. Tale fase evolutiva risulta però rallentata dall'elevata mortalità a carico delle giovani piante di pino cembro, dovuta soprattutto alla presenza di muffe della neve, tra cui *Phacidium infestans*.

L'analisi della distribuzione spaziale ha rilevato, per gli individui adulti di larice e pino cembro, fenomeni di aggregazione a livello intraspecifico, presumibilmente legati alle diverse modalità di disseminazione delle diverse specie e alle diverse strategie di colonizzazione attuate dalla rinnovazione. La distribuzione delle piante di abete rosso sembra invece essere legata a microstazioni particolarmente favorevoli.

Nella rinnovazione, invece, è emerso che la copertura delle chiome svantaggia tutte e tre le specie, in particolare il larice mentre il pino cembro appare legato al tipo di disseminazione zoocora portata avanti dalla nocciolaia. La rinnovazione di abete rosso risulta, invece, legata a microstazioni particolarmente favorevoli, dove riesce ad essere più competitivo rispetto alle altre due conifere.

L'analisi della struttura spaziale ha evidenziato grandi nuclei di piante mediamente di dimensioni inferiori poste nella fascia a quote maggiori, mentre nuclei di piante mediamente più sviluppate si trovano nella fascia centrale e alle quote inferiori. Ciò si può interpretare grazie alla presenza del gradiente altitudinale e quindi nelle condizioni sempre più limitanti salendo di quota ovvero, al retaggio dei passati disturbi che hanno determinato l'ingresso di nuclei di rinnovazione significativi.

Con questo studio si è potuto constatare che una vera e propria fase di equilibrio non sia facile da riscontrare nemmeno nei popolamenti cronologicamente più avanzati e prossimi alla naturalità. La presenza periodica di disturbi di varia scala e natura innesca sempre nuove fasi evolutive con modificazioni nella composizione specifica o nella dominanza.

Il tipo di disseminazione e le peculiarità specie-specifiche confermano la loro forte influenza sulle modalità distributive delle specie all'interno del soprassuolo.

Si è, inoltre, constatata la forte incidenza che le patologie fungine possono avere a carico delle piante più giovani e più sensibili, determinando elevati tassi di mortalità.

Infine, si sta già apprezzando l'influenza dei cambiamenti climatici sulla composizione specifica. Nel popolamento si nota, infatti, un significativo ingresso di individui di abete rosso che potrebbe in futuro modificare le configurazioni di mescolanza dell'attuale sistema.

## ***Abstract***

In the present investigation I analyzed one of the three permanent monitoring areas on the north-western slopes of the Croda da Lago mountain massif, in the Ampezzo Dolomites.

The plot is located at an altitude of about 2.100 m and covering an area of 4 hectares, hosts a typical timberline mixed forest dominated by larch (*Larix decidua* Mill.) and Swiss stone pine (*Pinus cembra* L.), with the presence of Norway spruce (*Picea abies* L.), mountain pine (*Pinus mugo* Turra) and rowan (*Sorbus aucuparia* L.).

Previous studies revealed that in the area logging and grazing ceased about two centuries ago and 50 years ago, respectively. This allowed the forest to undergo an almost natural evolution, a rare event on alpine stands. This makes the area interesting for the studies of natural evolution of high elevation forest.

The forest structure and dynamics were studied through the analysis of biometric variables, and through the spatial analysis, conducted by the Point Pattern and the Surface Pattern Analysis. The main causes of death, especially on the regeneration, were also investigated.

The results showed that the Croda da Lago timberline forest is in a dynamic phase with an increase of Swiss stone pine regeneration that results more abundant than the larch one. This transition phase is slowed by the high mortality on Swiss stone pine regeneration, caused mostly by snow fungi like *Phacidium infestans*.

The results of Point Pattern Analysis showed intraspecific aggregation on adult individuals of larch and Swiss stone pine. This aggregation can be explained by the different seed dispersal and regeneration strategies of the two species. The spatial distribution of Norway spruce, on the contrary, seems determined by the presence of sporadic favourable niches.

The bivariate Point Pattern Analysis showed the extremely negative influence of the canopy cover on the regeneration of all the species, mostly for the larch one. The regeneration of pine is mainly influenced by the activity of nutcrackers.

The results of Surface Pattern Analysis showed the presence of groups of trees with lower height on the higher part of the area. On the opposite, group of taller trees are located on the central belt of the plot and at lower elevation. Two different hypotheses can explain this tendency: the gradient of climatic condition, more and more limiting moving to higher elevation and the occurrence of major disturbance that created large gaps for regeneration.

The present research showed that a stability phase is hard to reach, even in an old and natural forest. The periodic occurrence of disturbance events starts new evolutive phases with modifications on specific composition and dominance.

The study also confirms the strong influence of seed dispersal and of species-specific preferences.

Finally, current climatic change seems to influence the stand composition, with Norway spruce having remarkable advantages within the present conditions.



# 1. INTRODUZIONE

Le foreste sono state definite come la più importante fonte di servizi ecosistemici (FAO, 2010). Esse hanno un ruolo ecologico-ambientale fondamentale: conservano la maggior parte della biodiversità animale e vegetale, contribuiscono a stabilizzare il suolo, influenzano i cicli biogeochimici e contribuiscono a prevenire i fenomeni di riscaldamento globale stoccando CO<sub>2</sub> (Marchetti, 2011).

Anche le foreste italiane, soprattutto quelle Alpine, sono tradizionalmente ecosistemi di tipo multifunzionale, ma, tra i servizi svolti dal bosco in montagna, una particolare importanza assume quello protettivo. Le foreste permettono, infatti, all'uomo di vivere stabilmente nelle vallate, assicurando protezione contro frane o valanghe, stabilizzando il suolo, proteggendo dall'erosione e contribuendo a regimare il flusso e le piene dei corsi d'acqua (Motta, 2015).

L'importante e profondo legame tra foreste e popolazione ha portato modifiche negli ecosistemi forestali, semplificandoli dal punto di vista della composizione specifica e strutturale e alterandone l'estensione. Affinché la funzione di protezione venga mantenuta e migliorata, è invece necessario che le superfici interessate siano gestite in maniera attenta (Berretti et al., 2006).

Oltre alle modificazioni antropiche nell'uso del suolo, le regioni montane, e con esse le foreste che le caratterizzano, stanno subendo l'impatto delle modificazioni climatiche. Secondo l'ultimo report dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change; 2022*), infatti, le regioni montane appaiono particolarmente suscettibili, l'influenza antropica crescente associata all'impatto causato dalle modificazioni climatiche sta determinando importanti cambiamenti in questi ambienti. Con l'aumento delle temperature molte specie vegetali si stanno inoltre spostando più in quota e con esse anche il limite superiore del bosco (Pörtner et al., 2022).

Anche la Regione Alpina europea risulta interessata da queste mutazioni e ha iniziato a subire sostanziali cambiamenti dovuti alle modificazioni climatiche, cambiamenti che appaiono in continuo sviluppo e che si prevede avranno notevoli effetti sulle foreste

d'alta quota (Bolli et al., 2007). Le foreste d'alta quota, in particolare quelle prossime ai limiti superiori del bosco, sono infatti limitate direttamente o indirettamente dal clima e ogni modificazione a carico di questo, porta a conseguenze su tali ecosistemi (Anfodillo, 2007).

Ulteriore instabilità nei sistemi forestali viene introdotta dalla modificazione nel regime e nell'intensità degli eventi di disturbo estremi, come tempeste di vento, incendi o attacchi parassitari. Anch'essi risultano fortemente associati alla variabilità climatica ed è dimostrato che, negli ultimi decenni, i regimi di tali perturbazioni si sono intensificati notevolmente, determinando un forte aumento dei danni a carico dei popolamenti forestali (Seidl et al., 2011).

Data l'importanza assunta dalle foreste e date le modificazioni in atto e gli impatti a cui sono soggette, appare ancora più importante garantire continuità nella funzione protettiva che esse svolgono, cercando di garantire continuità nel tempo e nello spazio della copertura arborea. Per fare ciò è fondamentale giungere ad una corretta comprensione delle dinamiche spaziali e temporali della rinnovazione naturale che rendono possibile tale continuità (Grassi et al., 2004).

Per comprendere le dinamiche di distribuzione degli individui, sono stati sviluppati, a partire dagli anni '50, metodi di analisi per migliorare la capacità di individuare e caratterizzare i pattern spaziali tra cui i metodi di analisi della distribuzione spaziale (*Point pattern analysis*), per comprendere se gli individui di un campione seguono modelli di distribuzione casuali o meno (Fortin et al., 2002), e i metodi dell'analisi della struttura spaziale (*Surface pattern analysis*), per verificare la presenza o assenza di una determinata strutturazione nello spazio di determinate variabili quantitative (Reed and Burkhart, 1985).

Nel contesto dello studio delle dinamiche spaziali, hanno assunto grande importanza le aree di monitoraggio permanenti (*Long Term Forest Ecosystem Research, LTFER*), collocate in aree forestali non attualmente utilizzate e dove vengono condotte ricerche riguardanti l'evoluzione e le dinamiche naturali forestali in foreste non attualmente utilizzate (Soraru and Carrer, 2007).

Nel presente studio verrà analizzata una delle tre aree di monitoraggio permanente collocate sulle pendici nord-occidentali del massiccio di Croda da Lago, nel territorio delle dolomiti Ampezzane. Queste tre aree di monitoraggio fanno parte di un *network* più ampio che coinvolge diverse università italiane e che si pone di analizzare le dinamiche e la struttura della rinnovazione, in relazione anche alla struttura del soprassuolo adulto.

L'area di monitoraggio ospita un larici-cembreto tipico di *timberline*, con presenza di abete rosso e pino mugo. Di questo popolamento verrà analizzata la composizione specifica e la struttura biometrica in generale e della sola rinnovazione, raggruppando le piante in classi di diametro, di altezza e di età.

L'analisi del popolamento riguarderà anche le principali cause di mortalità, in particolare a carico degli individui più giovani.

Successivamente verrà indagata la distribuzione spaziale degli alberi attraverso la *Point Pattern Analysis* e la struttura spaziale del popolamento per le variabili altezza ed età, attraverso la *Surface Pattern Analysis*.

Con questo elaborato si è cercato di affrontare i seguenti quesiti:

- i. Come è strutturato dimensionalmente il popolamento?
- ii. Secondo quali pattern spaziali si distribuiscono individui più sviluppati e la rinnovazione?
- iii. Quali sono i principali fattori di dinamismo nel popolamento?
- iv. In che fase evolutiva si trova il popolamento e cosa ci si può aspettare per il futuro?

## 2. DESCRIZIONE GENERALE DELL'AREA DI STUDIO

### 2.1 Inquadramento geografico e fisico

La presente ricerca è stata svolta all'interno di un'area di monitoraggio permanente collocata sul versante nord-orientale del massiccio di Croda da Lago (Coordinate U.T.M. 5153250 N; 278000 E), nel territorio delle Dolomiti Ampezzane, a circa 6 km di distanza da Cortina d'Ampezzo (BL).

Il plot in esame fa parte di un network composto da tre aree di monitoraggio permanenti, denominate C1, C2 e C3, disposte in sequenza altimetrica, con uguale esposizione prevalente e distanti l'una dall'altra meno di due chilometri (Fig. 1).

L'area C1 occupa un ettaro di superficie, si colloca a circa 2.200 metri di quota ed è rappresentativa della fascia di *treeline*. Tale area di monitoraggio ospita una formazione di larici-cembreto tipico con presenza di pino mugo e abete rosso, con densità rada e struttura disetanea a gruppi, tipica delle cenosi di neoformazione ai limiti superiori del bosco.

L'area C2, oggetto della presente ricerca, ospita un larici-cembreto tipico della fascia di *timberline* e si estende su circa 4 ettari di superficie a circa 2.100 metri di quota.

L'area C3 collocata a quote inferiori, intorno a 1.950 metri, è caratteristica della fascia subalpina. In quest'area ritroviamo una cenosi afferente al larici-cembreto con abete rosso, dove è l'abete rosso a dominare su larice e pino cembro.



*Figura 1 – Foto aerea delle tre aree di monitoraggio permanente*

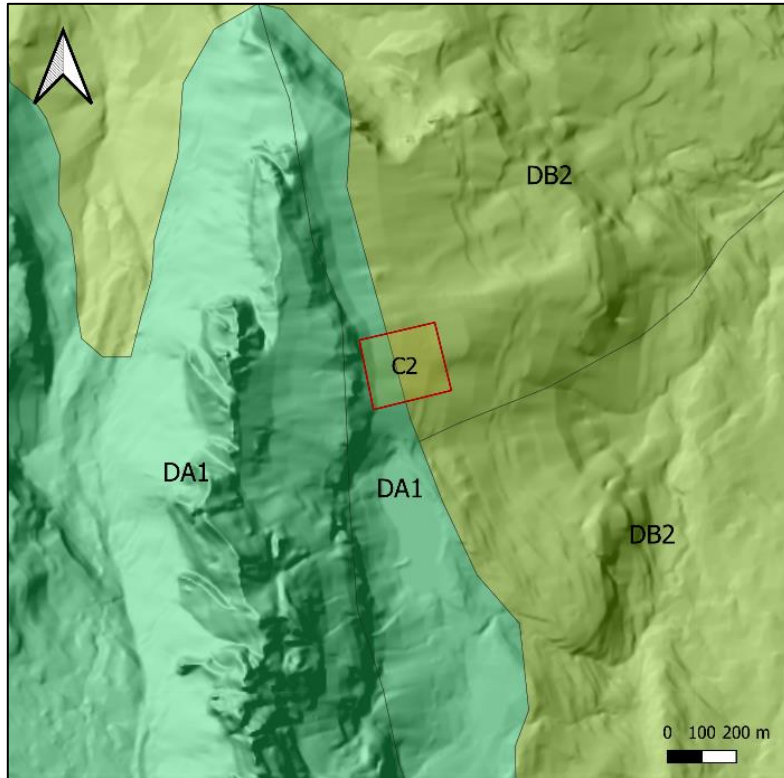
## 2.2 Caratteristiche geo-pedologiche

L'ambiente in cui si colloca l'area di studio, cioè quello dolomitico, è caratterizzato da una notevole variabilità paesaggistica, determinata dalla combinazione di vari fattori e concause: tettoniche, litologiche, climatiche ed antropiche. In particolare, la grande variabilità di formazioni rocciose, dovuta all'alternanza di litologie a comportamento fragile (carbonati, dolomie e arenarie) con altre a comportamento duttile (marne e peliti), determina una morfologia particolarmente eterogenea con alternanza di versanti scoscesi e vette acuminate in contrapposizione a pendii più dolci e modellati. Anche il fattore climatico ha contribuito all'eterogeneità del paesaggio tramite l'alternanza di periodi più o meno freddi e umidi ma soprattutto tramite l'espansione e il ritiro dei ghiacciai con conseguente erosione o accumulo detritico. A ciò si aggiunge l'azione dell'acqua che, tramite il fenomeno del carsismo, ha dato luogo a particolari formazioni come doline e grotte riscontrabili anche sul massiccio di Croda da Lago (Neri et al., 2006).

Nel dettaglio, l'area di monitoraggio C2 è caratterizzata dalla presenza di due sistemi di suoli differenti che vengono classificati, secondo la Carta dei suoli della Provincia di Belluno, come DA1 e DB2, entrambi originati da litotipi carbonatici molto competenti (dolomia e calcari grigi). Il sistema DA1 è quello dei *Rendzic Leptosols* e lo si ritrova su alti versanti e sommità di catene montuose ad alta energia del rilievo, con comuni coperture di depositi glaciali e di versante. Sono suoli sottili, molto ghiaiosi, a bassa differenziazione del profilo e con accumulo di sostanza organica in superficie.

Il sistema DB2 è localizzato su medi e bassi versanti di catene montuose principali e secondarie, ad alta energia del rilievo, con estese coperture di depositi glaciali e di versante. Tali suoli sono moderatamente profondi, ghiaiosi e a moderata differenziazione del profilo (*Calcaric Cambisols*), su superfici più stabili, oppure sottili, molto ghiaiosi e a bassa differenziazione del profilo (*Calcaric Leptosols*), su superfici acclivi e/o erose.

Nell'area, il sistema di suolo DA1 è quello che si ritrova nella metà a quote più elevate mentre il sistema DB2 lo si ritrova alle quote inferiori (Fig. 2).



*Figura 2 - Classificazione dei sistemi di suolo secondo la Carta dei suoli della Provincia di Belluno*

## 2.3 Inquadramento climatico

L'area oggetto di studio ricade nel piano altitudinale subalpino della regione forestale endalpica. In quest'ambito il tipo forestale più caratteristico è il larici-cembreto.

Il clima è di tipo continentale con precipitazioni ridotte (attorno a 1.000 mm annui) e con massimi di piovosità in estate. Le temperature sono basse e le escursioni termiche elevate. Tale ambiente climatico è tipico di poche zone della provincia di Belluno, tra cui la conca Ampezzana (Del Favero, 2000).

Di seguito (Tab. 1-4), si riportano i valori medi mensili di precipitazioni e di temperatura (minima, media e massima) dal 1994 al 2021, registrati dalla vicina stazione meteorologica di Passo Falzarego, posta a una quota di 2.090 m s.l.m.

Va tenuto presente che la stazione di passo Falzarego è situata a circa 8 km in linea d'aria dall'area di studio, in una zona libera dalla vegetazione forestale e con esposizione prevalente differente (Sud-Ovest) rispetto all'area di studio.

GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	TOT
47.2	39.9	52.8	80.8	134.6	142.3	153.9	164.4	115.5	117.2	139.9	60.5	1249

*Tabella 1 - Somma delle precipitazioni (mm) medie mensili a Passo Falzarego (1994-2021)*

GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
-8.2	-8.1	-6.1	-2.8	1.4	5.4	7.1	7.2	3.8	0.7	-3.4	-6.8

*Tabella 2 - Media delle temperature (°C) minime mensili a Passo Falzarego (1994-2021)*



GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
-5	-4.7	-2.4	0.5	4.8	9.1	11	10.8	7.1	3.9	-0.7	-3.8

*Tabella 3 – Media delle temperature (°C) mensili a Passo Falzarego (1994-2021)*

GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
-1.5	-0.9	1.8	4.6	9.2	13.8	15.8	15.5	11.7	8	2.8	-0.4

*Tabella 4 – Media delle temperature (°C) massime mensili a Passo Falzarego (1994-2021)*

La temperatura media annua è di 2.9 °C.

## 2.4 Descrizione dell'area di monitoraggio permanente

L'area di monitoraggio permanente è collocata in località Val Negra, alla base della piattaforma rocciosa sottostante la cima Cason del Formin, poco distante dal Lago di Federa. Essa occupa una superficie di forma quadrata di circa 4 ettari, ha esposizione prevalente Nord-Est e si estende tra 2.020 e 2.120 metri di quota.

La superficie del plot non è sempre stata quella attuale: al momento della sua predisposizione si estendeva infatti su 8.944 m<sup>2</sup> (circa 1 ettaro) e aveva forma rettangolare, nel 2004 è stata estesa ai circa 4 ettari attuali.

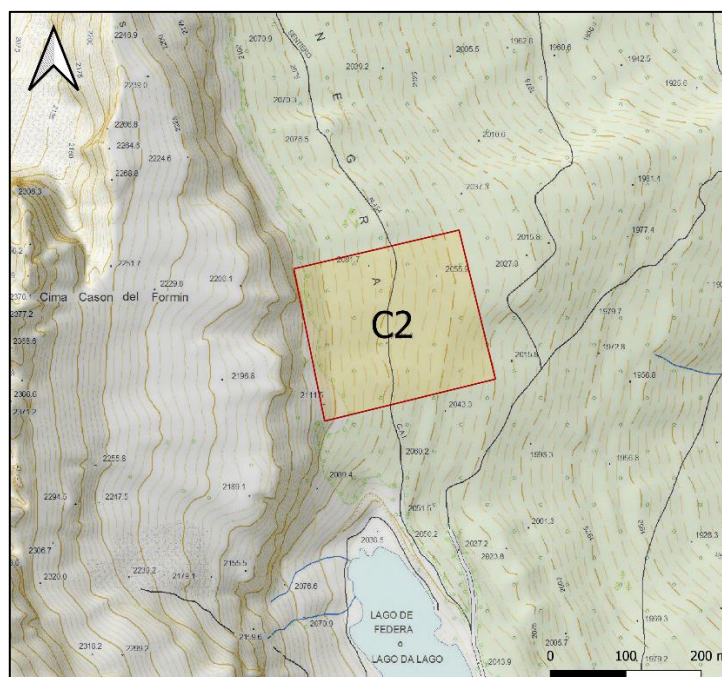


Figura 3 - Aree di monitoraggio permanente di Croda da Lago

La tipologia forestale che caratterizza l'area di studio è quella del larici-cembreto tipico con dominanza di larice. Le specie principali sono larice (*Larix decidua* Mill.) e pino cembro (*Pinus cembra* L.) ma ritroviamo anche abete rosso (*Picea abies* L.), pino mugo (*Pinus mugo* Turra) e sporadici individui di sorbo degli uccellatori (*Sorbus aucuparia* L.).

Tra le specie che si ritrovano più frequentemente nel sottobosco vi sono rododendro e mirtillo che a tratti sono in grado di ricoprire interamente il suolo con densi tappeti.

Un elemento che rende quest'area particolarmente interessante per quanto riguarda gli studi legati ai cambiamenti climatici e alle dinamiche di evoluzione naturale del bosco è l'assenza di significativi interventi di utilizzazione negli ultimi due secoli, confermato attraverso la datazione di alcune ceppaie e fusti atterrati (Carrer, 1997), e un progressivo calo del pascolamento, in particolare dopo la Seconda guerra mondiale. L'area rappresenta quindi un caso abbastanza raro in ambito alpino di popolamento di alta quota con uno sviluppo prossimo alla naturalità.

L'area di monitoraggio è però soggetta ad altri tipi di disturbo, in particolare quelli legati alla copertura nevosa persistente durante il periodo invernale, la quale facilita la diffusione di muffe della neve, tra cui *Phacidium infestans*. Tale ascomicete ha tra gli ospiti principali le piante di pino cembro e si manifesta con maggiore frequenza sui versanti esposti a nord e al di sopra dei 1.500 metri di quota. La sintomatologia di *P. infestans* prevede scolorimenti e arrossamenti degli aghi delle porzioni di chioma rimaste a lungo sotto la copertura nevosa e conseguente morte degli stessi. Il fungo, durante il periodo autunnale sviluppa gli apotecii sugli aghi morti (Fig. 4), tramite i quali evaderà dall'ospite per diffondersi sotto forma di spore (Moriondo et al., 2006).

Come emerso da studi condotti in Svizzera, il tasso di mortalità indotto dalle muffe della neve, a carico delle giovani piante di pino cembro, può raggiungere anche l'80-90%. Per quanto riguarda invece il larice, questo appare più resistente nei confronti di questo tipo di patologie (Barbeito et al., 2013).



Figura 4 – Fruttificazioni fungine su aghi morti di pino cembro in rinnovazione

L'evento meteorologico estremo definito "tempesta Vaia", che tra il 28 e 30 ottobre 2018 ha interessato il nord-est italiano con venti di scirocco che hanno raggiunto picchi di oltre 200 km/h, non ha, invece, fatto registrare particolari danni.

L'area di studio, avendo esposizione prevalente Nord-Est, non si è infatti trovata rivolta verso la direzione principale dei venti di scirocco che, nel giorno di massima intensità (29 ottobre), avevano direzione prevalente Sud, Sud-Est.

### 3. MATERIALI E METODI

#### 3.1 Il campionamento

Il campionamento è stato svolto percorrendo interamente l'area di studio presa in esame e considerando tutte le piante di altezza superiore a 1.30 m.

La raccolta dati è stata indirizzata a:

1. Accertare lo stato fitosanitario di tutti gli individui del popolamento già censiti in passato;
2. Aggiornare le informazioni biometriche (altezza, diametro) della rinnovazione censita nel campionamento precedente (2016);
3. Rilevare e raccogliere le informazioni biometriche di tutti i nuovi individui che dall'ultimo censimento hanno raggiunto o superato la soglia di altezza di 1.30 m e che sono stati considerati come rinnovazione.



*Figura 5 - Etichetta affissa su una pianta di pino cembro che ha superato la soglia di altezza di 1.30 m.*

Tutti i dati dei campionamenti effettuati negli anni precedenti, dal 1994 al 2016, sono riportati in un database che raccoglie, per ogni pianta, le seguenti informazioni: n° di etichetta, specie, coordinate x e y, diametro del fusto ad 1.30 metri, altezza, età e stato fitosanitario. Tale database è quindi stato aggiornato con i dati raccolti nell'anno 2021.

A livello pratico, ogni pianta del popolamento già censita è stata raggiunta e ne è stato accertato lo stato di salute: se viva o morta, la presenza di segni o sintomi di patologie, la presenza di danni a fusto o branche.

Gli individui allo stadio di rinnovazione, aggiunti nel censimento precedente (2016), sono stati nuovamente misurati in altezza e diametro tramite flessometro e ne è stato determinato lo stato di salute.

Gli individui, invece, non ancora censiti ma che hanno raggiunto la soglia di 1.30 metri al momento del campionamento, cioè la rinnovazione entrata negli ultimi 5 anni, sono stati etichettati (Fig. 5), misurati in altezza e diametro, ne è stata determinata l'età attraverso il conteggio degli internodi e valutato lo stato fitosanitario. Per questi individui sono state inoltre determinate le coordinate misurando tramite cordella metrica la distanza da due individui con coordinate note, posti rispettivamente a sud-est e sud-ovest dalla pianta di nostro interesse. Sulla base di tali distanze e dei valori di azimut sono state ricavate le coordinate x e y.

Per l'acquisizione delle coordinate si è optato per questa tecnica in quanto l'area di studio è affetta da un'anomalia magnetica che spesso impedisce di ottenere dati affidabili attraverso la strumentazione elettronica.

I dati raccolti sono stati inseriti nel database riferito all'area di studio e utilizzati per le analisi strutturali e spaziali del popolamento.

## 3.2 Analisi statistica delle variabili non spaziali

Per verificare la presenza o meno di correlazione tra le variabili continue misurate si è utilizzato il coefficiente di correlazione. Esso indica la misura di associazione tra due variabili. In presenza di dati correlati, variazioni nella magnitudo di una variabile determinano variazioni nella magnitudo della seconda variabile, variazioni che possono essere nella stessa direzione in caso di correlazione positiva o in direzioni opposte in caso di correlazione negativa.

La misura del coefficiente di correlazione varia entro un range compreso tra -1 e 1 dove valori positivi indicano correlazione positiva (le variabili variano nello stesso verso), valori negativi indicano correlazione negativa (le variabili variano in versi opposti), valori tendenti a 0 indicano assenza di correlazione. Tanto più il valore di correlazione si avvicina agli estremi, tanto più la correlazione è stringente.

Formula del coefficiente di correlazione:

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

## 3.3 Analisi spaziale

### 3.3.1 Generalità

La distribuzione spaziale delle specie in un territorio è il risultato dell'interazione tra fattori demografici, tratti comportamentali degli individui e interazioni tra le specie, in condizioni ambientali spesso spazialmente eterogenee (Dray et al., 2012).

Per questo motivo gli esseri viventi in natura normalmente non si distribuiscono né in modo uniforme né in modo casuale ma tendono a distribuzioni eterogenee, aggregandosi principalmente in gruppi o formando gradienti (Legendre and Fortin, 1989).

Sul concetto di eterogeneità spaziale delle comunità si basano molte teorie ecologiche, tra cui quelle che descrivono i fenomeni di successione, di adattamento, di mantenimento della biodiversità, di stabilità delle comunità. Questi concetti ecologici hanno come principio fondante l'assunto che elementi componenti un ecosistema vicini tra loro, hanno alta probabilità di essere influenzati dallo stesso processo generativo. Risulta infatti assodato che la struttura spaziale degli ecosistemi è il risultato di vari input energetici che determinano, a livello spaziale, strutture eterogenee o gradienti. Pertanto, i modelli ecologici più datati, ma utilizzati tutt'ora, che assumono una distribuzione degli organismi secondo schemi casuali o uniformi, risultano superati e lontani dalla realtà (Legendre and Fortin, 1989).

Le foreste, in particolare, sono sistemi naturali estremamente complessi dove diversi organismi ritrovano le condizioni più adatte per la loro sopravvivenza ed è proprio l'eterogeneità spaziale su scala verticale ed orizzontale, determinata da diversi processi ecologici operanti a diverse scale, a garantire elevata biodiversità e stabilità ecosistemica (Pommerening, 2002; Szmyt and Stoyan, 2013).



L'analisi della struttura spaziale di un ambiente eterogeneo quale il bosco, risulta quindi fondamentale dal punto di vista ecologico, in quanto porta ad una migliore comprensione dei processi naturali in atto e delle forze naturali che hanno determinato l'attuale struttura del popolamento (Szmyt and Stoyan, 2013).

In questo ambito, a partire dagli anni '50, sono stati sviluppati numerosi metodi di analisi volti a migliorare la capacità di individuazione e caratterizzazione dei pattern spaziali. Questi metodi traggono origine da varie discipline (ecologia vegetale e animale, geografia, ingegneria mineraria) e hanno sovente obiettivi differenti (Fortin et al., 2002).

### 3.3.2 Metodologie di analisi spaziale

Nel presente elaborato, per l'analisi spaziale del popolamento in esame, sono state impiegate le metodologie dell'analisi della distribuzione spaziale (*Point pattern analysis*) e dell'analisi della struttura spaziale (*Surface pattern analysis*).

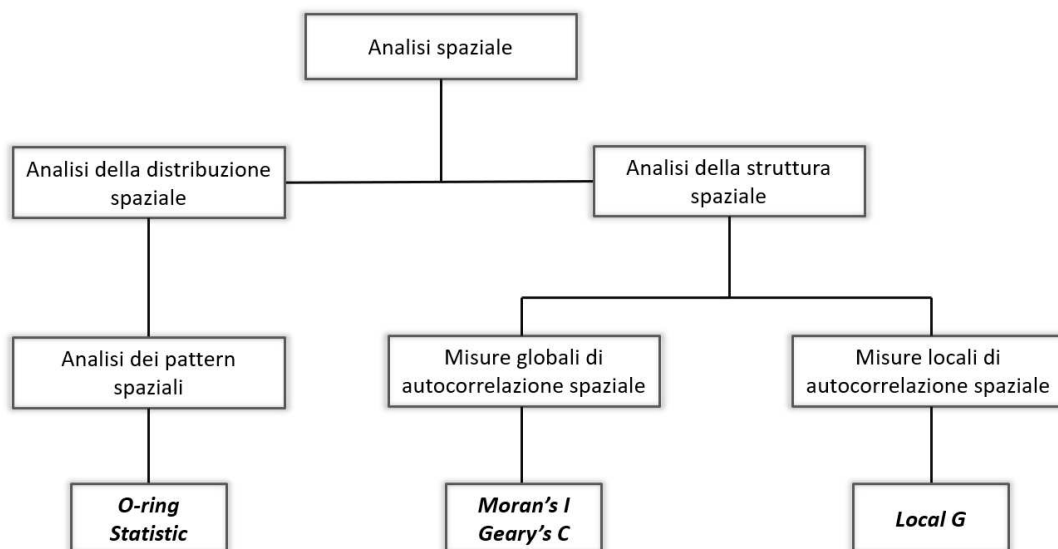


Figura 6 - Metodologie di analisi spaziale utilizzate

### 3.3.3 Analisi della distribuzione spaziale – *Point Pattern Analysis*

Tramite il metodo della *Point Pattern Analysis* viene indagato se gli eventi puntuali di un campione (cioè le piante individuate al suolo tramite coordinate  $x$  e  $y$ ) seguono modelli di distribuzione spaziale significativamente diversi dalla completa casualità spaziale (Fortin et al., 2002).

Tra le funzioni più applicate per l'analisi della distribuzione spaziale, vi sono la *Ripley's K-function* e la *O-ring statistic*.

#### *Ripley's K-Function*

Le principali caratteristiche di una distribuzione di punti possono essere riassunte dalla sua densità, la quale può essere quantificata attraverso la funzione  $K$  di Ripley (1977).

La funzione  $K$  di Ripley quantifica la densità dei punti del campione a varie distanze, e per farlo utilizza aree circolari centrate su ognuno degli individui del campione. La densità dei punti viene calcolata come media dei punti ricadenti in ognuna delle aree circolari.

Tale funzione viene descritta dalla seguente equazione generale:

$$K(d) = \lambda^{-1}E(d)$$

Nella quale  $E(d)$  è il numero di eventi atteso all'interno di una distanza  $d$  da un evento arbitrario,  $\lambda$  è il numero medio di eventi per area calcolato come  $n/A$ , dove  $n$  è il numero totale di eventi e  $A$  è l'area totale considerata.

La funzione di Ripley viene definita "cumulativa" in quanto tutti i punti (eccetto quello generatore centrale) ricadenti all'interno dell'area circolare vengono considerati.

Tale intensità di punti viene confrontata con quella che si avrebbe in caso di casualità spaziale di distribuzione dei punti del campione, attraverso il metodo di Monte Carlo (Besag and Diggle, 1977).

Il processo di confronto tra la distribuzione del campione e una distribuzione casuale dello stesso numero di punti all'interno dell'area di studio, viene reiterato  $n$  volte al fine di ottenere risultati significativi dal punto di vista statistico, che possano confermare o meno la presenza di aggregazione o dispersione alla scala considerata.

Applicando 999 reiterazioni del modello dovrebbe essere garantito un livello di significatività del 95% (Soraruuf and Carrer, 2007).

Valori positivi della funzione denotano aggregazione (*clustering*) tra gli eventi del campione, valori negativi denotano segregazione tra gli stessi.

### O-ring statistic

Il metodo dell'*O-ring Statistic* si fonda sugli stessi assunti della *Ripley's K function* ma, a differenza di questa, l'analisi viene effettuata utilizzando anelli di raggio  $r$  al posto di aree circolari di raggio  $r$  (Fig. 7). Il metodo dell'*O-ring Statistic* non è pertanto un metodo cumulativo in quanto non tutti gli individui all'interno del cerchio vengono considerati ma solo quelli ricadenti all'interno di una corona circolare di raggio  $r$  dal punto centrale.

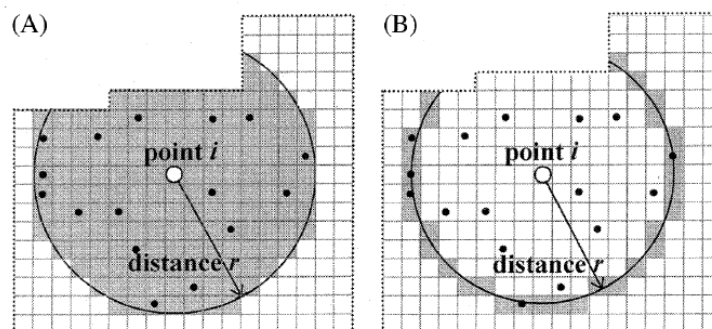


Figura 7 - Rappresentazione della Ripley's K-Funcion (A) e della O-ring Statistic (B)

La funzione cumulativa  $K$  rileva aggregazione o dispersione entro una certa distanza  $r$ , non è quindi in grado di discriminare la distanza corretta alla quale si realizzano i fenomeni distributivi che avvengono all'intero della classe di distanza analizzata. La

funzione dell'*O-ring statistic* rileva invece aggregazione o dispersione ad una determinata distanza dal punto considerato (Wiegand and A. Moloney, 2004).

L'*O-ring statistic* può quindi essere definita come il numero atteso di punti ad una data distanza  $r$  da un punto arbitrario del campione in esame, diviso l'intensità  $\lambda$  del campione. Tale concetto viene descritto dalla seguente equazione:

$$O(r) = \lambda^{-1}g(r)$$

### La metodologia applicata

Per l'analisi della distribuzione spaziale, nel presente elaborato, è stata utilizzata la

*O-ring Statistic*.

Il metodo di Ripley ha infatti il limite di non effettuare discriminazioni fra gli individui collocati a diverse classi di distanza, calcolando la media cumulando tutti gli individui all'interno dell'area circolare. Il metodo dell'*O-ring* ha invece il vantaggio di poter isolare gli individui per una classe di distanza stabilita.

Per la simulazione di Monte Carlo non è stato impiegato il modello di completa casualità spaziale (CSR) in quanto questo è adatto per campioni con distribuzioni di tipo omogeneo sulla superficie oggetto di studio. Applicando il modello CSR i punti casuali verrebbero distribuiti con uguale probabilità in ogni punto dell'area di studio.

Operando in un'area di studio eterogenea, con rocciosità superficiale e ostacoli che impediscono una distribuzione omogenea del campione di eventi, si è optato per il modello nullo definito *Heterogeneous Poisson process*. Attraverso tale modello il processo di distribuzione omogenea viene sostituito da una funzione probabilistica  $\lambda(x, y)$  che varia con la posizione  $(x, y)$  e che opera attraverso finestre mobili (*kernel*) di raggio  $R$ .

Il contesto tipico di applicazione per il modello nullo utilizzato è quello di un ambiente in cui vi sono eterogeneità dovute a suolo, rocce, topografia o ostacoli che determinano irregolarità nell'area di studio quindi irregolarità della distribuzione del campione, nel nostro caso gli alberi, in esame. La scelta di un modello nullo adeguato, che risponda alla domanda di tipo ecologico che è stata posta, è fondamentale.

L'analisi spaziale del popolamento collocato nell'area di monitoraggio C2 è stata condotta utilizzando il software di analisi *Programita*, sviluppato da Thorsten Wiegand.

L'analisi dell'*O-ring statistic* è stata condotta sia con modalità univariata, cioè quella descritta fino ad ora, sia bivariata.

L'analisi bivariata fornisce il numero atteso di punti del pattern 2, alla distanza  $r$ , da un punto arbitrario del pattern 1 (Wiegand, 2004). In questo modo è possibile analizzare aggregazione o dispersione di due pattern di punti con caratteristiche differenti come, ad esempio, la distribuzione di due specie (larice e pino cembro), di diverse classi di età (piante giovani o adulte) o di altezza (piante alte o basse).

Tramite *Programita* è possibile settare diversi parametri della simulazione, tra cui: raggio dell'anello dell'*O-ring statistic*, distanza massima entro la quale effettuare l'analisi, lato delle celle della griglia in cui viene suddivisa l'area di studio, numero di reiterazioni della simulazione di Monte Carlo, tipologia di modello nullo casuale applicata.

La scelta della corretta ampiezza  $r$  degli anelli è fondamentale per ottenere dati significativi. Utilizzando anelli di ampiezza troppo ridotta si avrà un numero insufficiente di piante per ogni classe di distanza, utilizzando anelli troppo ampi si andrà a escludere i fenomeni che possono avere luogo a classi di distanza inferiori e si rischia di ricadere nelle stesse problematiche, già menzionate, associate alla funzione K di Ripley.

L'area di studio inoltre viene suddivisa in una griglia composta da celle quadrate in cui vengono collocati i punti del campione. Aumentando la maglia della griglia si avrà un numero maggiore di punti all'interno di ogni cella.

Per l'analisi dell'*O-ring Statistic* tramite *Programita* sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- Raggio  $r$  dell'anello: 5 metri;
- Distanza massima entro cui effettuare la simulazione: 50 celle (50 metri);
- Lato delle celle in cui viene suddivisa l'area di studio: 1 m (celle di 1 m<sup>2</sup>);
- Numero (#) di reiterazioni del modello di Monte Carlo: 999 (95% di significatività);
- Modello nullo applicato: *Heterogeneous Poisson*.

### Correzione dei margini

Un problema che può sussistere nel processo di *point pattern analysis* è quello che viene definito "effetto margine". Le piante collocate a ridosso dei margini dell'area di studio, ma al di fuori di questa, avranno una certa influenza sulle piante interne all'area di studio ma non verranno considerate durante il processo di calcolo dell'*O-ring statistic*, causando delle possibili distorsioni nel modello statistico (Wiegand and A. Moloney, 2004). Tale effetto bordo diviene tanto più marcato al calare del rapporto tra area e margini della stessa.

Vi sono diverse metodologie per correggere l'effetto margine, tra cui quella di creare una zona di buffer attorno l'area di studio per comprendere anche gli individui a ridosso di questa.

Nel presente studio è stato scelto di non applicare nessuna correzione dell'effetto margine in quanto l'area di studio ha dimensioni notevoli (4 ettari) e la forma quadrata che garantisce, dopo la circonferenza, il migliore rapporto tra superficie e perimetro.

### 3.3.4 Analisi della struttura – *Surface Pattern Analysis*

Attraverso l'analisi della struttura spaziale (*Surface pattern analysis*) viene valutata la presenza di autocorrelazione tra le variabili misurate nel popolamento in esame.

Autocorrelazione spaziale tra individui si ha quando la presenza o l'assenza di qualche caratteristica in un individuo tende ad essere associata alla presenza o all'assenza di quella caratteristica negli individui vicini, o se il livello di una caratteristica in un individuo influenza il livello di quella caratteristica mostrata dagli individui vicini (Reed and Burkhart, 1985).

Nel dettaglio, una variabile si definisce autocorrelata quando è possibile prevedere i valori che questa assumerà in alcuni punti dello spazio, sulla base di valori noti di tale variabile assunti da altri punti con coordinate note (Legendre and Fortin, 1989).

Esempi di autocorrelazione spaziale possono essere la vicinanza di individui con dimensioni simili, l'aggregazione di piante morte, la vicinanza di piante più giovani rispetto a individui maturi.

L'autocorrelazione può essere positiva o negativa e può assumere diverso segno a diverse scale di distanza. Autocorrelazione positiva significa che gli individui presentano valori simili per una data variabile, mentre è negativa se gli individui assumono valori molto diversi per la stessa variabile.

In ecologia il più delle volte l'autocorrelazione è positiva nella breve distanza mentre è negativa per individui spazialmente lontani tra loro (Legendre and Fortin, 1989).

L'analisi dell'autocorrelazione è uno degli obiettivi principali nel campo dell'analisi spaziale e può avvenire a scala globale, cioè di intera area di studio, o a scala locale, cioè di singolo individuo.

Tra gli indici più utilizzati per la stima dell'autocorrelazione globale vi sono l'indice *Moran's I* e l'indice *Geary's c*. Per la stima dell'autocorrelazione locale i più usati sono gli indici locali *G*.

### Autocorrelazione spaziale globale

Per quantificare l'autocorrelazione a scala globale, cioè di intera area di studio, i coefficienti più impiegati sono quelli di *Moran's I* (1950) e *Geary's c* (1954). Entrambi richiedono che agli eventi sia associato un valore numerico che quantifichi la variabile da indagare.

La statistica *I* di Moran calcola il grado di correlazione tra i valori di una singola variabile come funzione della distanza (media pesata del valore della variabile assunto da eventi vicini a quello in esame).

Tale statistica è definita dalla seguente formula:

$$I(d) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}(d)(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})/W(d)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n}$$

- Dove:
- $n$  è il numero di eventi
  - $x_i$  il valore della variabile considerata nel punto "i"
  - $x_j$  il valore della variabile considerata nel punto "j"
  - $\bar{x}$  la media della variabile considerata
  - $w_{ij}$  fattore di ponderazione per la coppia di piante  $i$  e  $j$ , 1 se le piante  $i$  e  $j$  ricadono nella stessa classe di distanza, 0 negli altri casi
  - $W(d)$  somma ricavata dalla matrice dei pesi:  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$

Il valore della statistica *I* di Moran varia entro un range che va da -1, ad indicare autocorrelazione spaziale negativa, a +1, per indicare autocorrelazione positiva.

In assenza di autocorrelazione spaziale (indipendenza) il valore atteso è vicino a zero

(Fortin et al., 2002):  $E(I) = -\frac{1}{(n-1)}$



L'indice  $c$  di Geary misura invece la differenza tra il valore di una singola variabile in località vicine. Questo si comporta come una misura di distanza e varia da 0, per una perfetta autocorrelazione positiva, a circa 2, per una forte autocorrelazione negativa. In assenza di autocorrelazione spaziale significativa, il valore atteso  $E(c)$  è 1.

L'equazione che descrive tale indice è la seguente:

$$c(d) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - x_j)^2 / 2W(d)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}$$

Per la rappresentazione grafica delle statistiche  $I$  e  $c$  viene impiegato un correlogramma, avente, sull'asse delle ordinate i valori di autocorrelazione, sull'asse delle ascisse la distanza (suddivisa in classi) tra le località.

Per ottenere risultati apprezzabili dal punto di vista grafico, inoltre, i valori di  $I$  e  $c$  non sono stati plottati direttamente, ma sono stati standardizzati utilizzando il valore  $z$ - ( $I$  o  $c$ ) di devianza normale standardizzata, secondo la formula:

$$z(d) = \frac{(I, c)(d) - E[(I, c)(d)]}{\sqrt{\text{var}[(I, c)(d)]}}$$

Per i limiti di significatività è stato utilizzato il valore di  $\pm 1.96$ , che garantisce significatività di 0.05. I valori di  $z$ - ( $I$  o  $c$ ) superiori a tale limite evidenziano autocorrelazione spaziale positiva, viceversa per i valori inferiori a -1.96.

### Autocorrelazione spaziale locale

Gli indicatori di autocorrelazione spaziale globale si basano sull'assunto che il concetto di stazionarietà è soddisfatto, cioè che il pattern spaziale con cui gli individui si distribuiscono, è determinato da un unico processo ecologico generatore che agisce in tutta l'area di studio. Al giorno d'oggi risulta però chiaro che alla base della distribuzione degli individui, specialmente su aree vaste, non può esservi un'unica forzante ecologica. In caso di non stazionarietà, la stima dell'intensità dell'autocorrelazione spaziale, su scala locale, può risultare utile per identificare processi che agiscono in porzioni più ristrette dell'area di studio (Fortin et al., 2002).

Per questo motivo sono stati sviluppati altri indici che sono in grado di individuare forme di aggregazione locale attorno alla posizione di un singolo individuo (Lamedica et al., 2011).

In particolare, l'indice utilizzato, il *Local G*, permette di individuare e separare cluster con alti valori della variabile indagata, definiti come "hot-spots", da cluster con bassi valori, definiti "cold-spots" (Anselin, 1995).

Per l'analisi dell'autocorrelazione locale può essere utilizzata la statistica *G* di Getis e Ord, descritta dalle seguenti equazioni:

$$G_i^* = \frac{\sum_j c_{ij}(d)X_j}{\sum_j X_j} = j \qquad G_i = \frac{\sum_j c_{ij}(d)X_j}{\sum_j X_j} \neq j$$

Dove:

$c_{ij}(d)$  è il fattore di ponderazione per la coppia di piante  $i$  e  $j$ , 1 se le piante  $i$  e  $j$  ricadono nella stessa classe di distanza, 0 negli altri casi

$X_j$  valore della variabile in oggetto di studio nella localizzazione  $j$

Utilizzando la prima forma ( $G_i^*$ ) della funzione, viene incluso nell'algorithmo anche il punto attorno a cui viene misurata l'autocorrelazione, utilizzando l'altra variante ( $G_i$ ) il punto non viene considerato.

Non esistono particolari indicazioni riguardo quale delle due forme sia migliore, in ogni caso la differenza nei risultati è trascurabile (Getis and Ord, 1992; Shi and Zhang, 2003).

Valori positivi o negativi e significativi di  $G_i$  o  $G_i^*$  indicano la presenza di aggregazione in corrispondenza dei valori più alti o bassi della variabile in esame (Sokal et al., 1998).

Il risultato di tale statistica è associato alle coordinate di ciascun evento del campione quindi si rende necessaria una restituzione di tipo grafico. Per fare ciò si è deciso di plottare sugli assi x e y di un grafico le coordinate di ciascun evento e utilizzare una forma geometrica di tipo “bolla” la cui area è legata al valore di  $G_i^*$  e il colore è legato alla presenza di autocorrelazione positiva o negativa. È stato utilizzato il colore rosso per distinguere gli “*hot-spot*”, in cui si ha autocorrelazione positiva, mentre il colore blu per le zone di “*cold-spot*”, in cui l’autocorrelazione è negativa.

Anche per questa elaborazione è stato utilizzato il valore di  $z-G_i^*$  indicante la devianza normale standardizzata.

Per quanto riguarda il limite di significatività dei risultati, anche in questo caso è stata utilizzata la soglia di  $\pm 1.96$  che garantisce significatività del 0.05.

## 4. RISULTATI

### 4.1 Caratteristiche strutturali del popolamento

Per l'analisi delle caratteristiche strutturali del popolamento ci si è basati, per ognuna delle variabili considerate, sui dati aggiornati più recenti.

Per il numero di individui per specie, mortalità ed età del popolamento sono stati utilizzati i dati aggiornati al 2021.

Per quanto riguarda l'analisi dei diametri e delle altezze ci si è basati sui dati del campionamento del 2016.

L'analisi della rinnovazione è stata, invece, condotta per tutti gli anni di campionamento: 1994, 2004, 2008, 2011, 2016 e 2021. I dati dei campionamenti degli anni 2008 e 2011 sono stati accorpati in quanto nel 2011 è stata campionata la superficie originaria di 1 ettaro mentre nel 2008 il censimento aveva coinvolto gli altri 3 ettari.

Non sempre si dispone però dei numeri certi delle piante entrate nel censimento, cioè quelle che hanno superato la soglia di rilevazione di 1.30 m e che sono quindi classificate come rinnovazione. In assenza di tale dato, la rinnovazione è stata estrapolata come segue:

- Per il 1994 si è utilizzata la soglia di 1.60 m per distinguere le piante in rinnovazione da quelle più sviluppate; tale soglia corrisponde alla media delle altezze della rinnovazione per cui si dispone di dati certi;
- Per il 2008 è stata nuovamente utilizzata tale soglia sui 3 ettari campionati.

L'analisi strutturale del popolamento, inoltre, farà riferimento alle tre specie principali che compongono l'area di monitoraggio: larice, pino cembro e abete rosso in quanto il 99% circa degli individui del popolamento è rappresentato da queste tre specie.

### 4.1.1 Composizione specifica

L'area di monitoraggio permanente C2 è composta da un totale di 3697 individui censiti, ripartiti tra 5 specie: larice (*Larix decidua* Miller), pino cembro (*Pinus cembra* L.), abete rosso (*Picea abies* L.), pino mugo (*Pinus mugo* Turra) e sorbo degli uccellatori (*Sorbus aucuparia* L.).

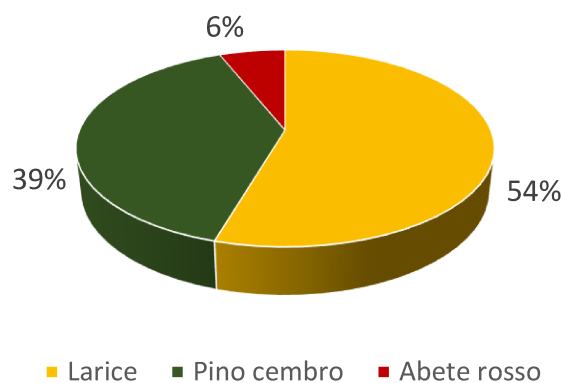


Figura 8 – Numero di individui per specie

La specie che domina per abbondanza è il larice, con il 54% degli individui (Fig. 8), seguita dal pino cembro, con il 39% degli individui e abete rosso, con il 6% degli individui.

La densità del popolamento è di 912 piante ad ettaro (Tab. 5).

Specie	Densità tot	Densità ad ha	Densità %
Larice	1974	493	54
P. cembro	1448	362	39
A. rosso	228	57	6
Totale	3650	912	99

Tabella 5 - Densità totale, ad ettaro e percentuale del popolamento

### 4.1.2 Mortalità

Le piante morte registrate al 2021 sono state 241. La specie più soggetta a mortalità è stata il pino cembro con 128 individui, seguono larice con 99 e abete rosso con 14.

Ulteriore analisi viene effettuata fissando una soglia di 5 metri di altezza al fine di distinguere le piante allo stato di rinnovazione e pre-rinnovazione da quelle considerabili come adulte e verificare così l'incidenza della mortalità legata alla copertura nevosa. È infatti possibile supporre che, durante i periodi invernali, le piante più alte di 5 metri abbiano la chioma per la maggior parte al di fuori dello strato nevoso, mentre quelle al di sotto di tale soglia abbiano la chioma in parte o del tutto coperta, con le relative implicazioni ecologiche (Carrer et al., 2013).

La copertura nevosa, infatti, da un lato garantisce protezione dalle temperature estreme e dai danni da gelo (Rixen et al., 2010), dall'altro può comportare danni meccanici alle giovani piante e diffusione di funghi legati alla neve (ad esempio *P. infestans*).

Per tutte e tre le specie, circa il 70% delle piante morte tra il 2016 e il 2021, ha altezza inferiore a 5 metri. La specie per cui si registra il maggior numero di piante morte entro i 5 metri è il pino cembro (Fig. 9).

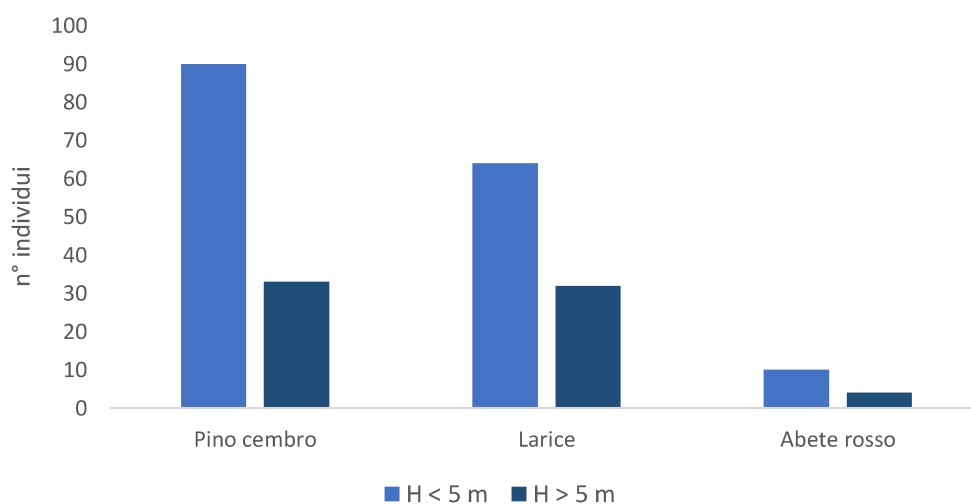


Figura 9 - Mortalità registrata all'anno 2021 per specie e per altezza inferiore o superiore a 5 m

Questo dato viene confermato anche analizzando la mortalità registrata al 2021 che vede circa l'80% di individui morti aventi altezza inferiore a 5 m.

Tra le cause più ricorrenti di morte delle giovani piante si registrano: attacchi fungini da *Phacidium infestans*, danni al cimale, rotture del fusto e schianti imputabili alla copertura nevosa.

### 4.1.3 Altezza

La struttura del popolamento è stata esaminata anche dal punto di vista dell'altezza, raggruppando gli individui in classi di 2 m. I dati utilizzati fanno riferimento agli individui vivi misurati durante il censimento del 2016.

L'altezza maggiore riscontrata nel popolamento è stata di 26 metri ma le classi più rappresentate sono quelle di 2 e 3 metri. L'altezza media del popolamento è invece di 7.3 metri.

Osservando la distribuzione degli individui ripartiti in classi di altezza (Fig. 10) si può notare, soprattutto per quanto riguarda larice e pino cembro, la presenza di una struttura biplana, con un numero notevole di individui di piccole dimensioni e un numero minore di individui distribuiti nelle classi successive.

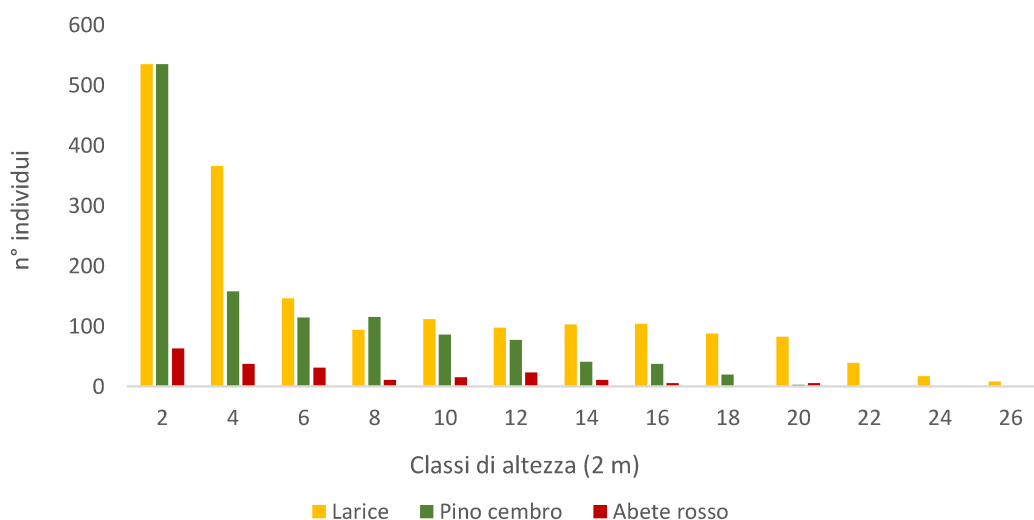


Figura 10 – Distribuzione delle tre specie nelle classi di altezza (2 m)

La specie che raggiunge l'altezza maggiore è il larice, con 6 individui che superano 25 metri. Le classi di altezza più rappresentate per questa specie sono quelle di 2 e 4 metri, mentre la distribuzione si mantiene stabile nelle classi successive per poi calare progressivamente oltre i 20 metri. L'altezza media delle piante di larice è di circa 8 metri.

Anche il pino cembro raggiunge altezze notevoli ma si ferma alla classe di 18 metri. Due soli individui si collocano nella classe di 22 e 24 metri. La classe più rappresentata è quella di 2 metri. Anche in questo caso il numero di individui per classe si mantiene stabile per poi calare oltre i 12 metri. L'altezza media del pino cembro è di circa 5.5 metri.

Anche l'abete rosso presenta la maggior parte degli individui all'interno della classe dei 2 metri ma presenta un secondo picco nella classe di 12 metri. L'altezza massima raggiunta è di oltre 22 metri. L'altezza media delle piante di abete rosso è di 6.7 metri, maggiore rispetto al pino cembro ma inferiore al larice.

#### 4.1.4 Diametro

L'analisi dei diametri degli individui componenti l'area di studio si basa, come per l'altezza, sui dati raccolti durante il campionamento del 2016.

I diametri noti degli individui dell'area di studio sono stati suddivisi in classi diametriche di 5 cm. Per tutte e tre le specie principali l'andamento del numero di individui nelle classi di diametro è di tipo esponenziale negativo con picchi nelle prime classi diametriche (Fig. 11). Questo tipo di distribuzione suggerisce una probabile disetaneità del popolamento (Soraru and Carrer, 2007).

La specie che raggiunge i valori maggiori di diametro è il pino cembro, con 3 individui che superano 90 cm, il diametro medio è di 14.6 cm. L'abete rosso raggiunge con due individui gli 80 cm e ha diametro medio di 15.8 cm. Il larice non supera la classe diametrica di 75 cm e ha diametro medio di 15.4 cm.



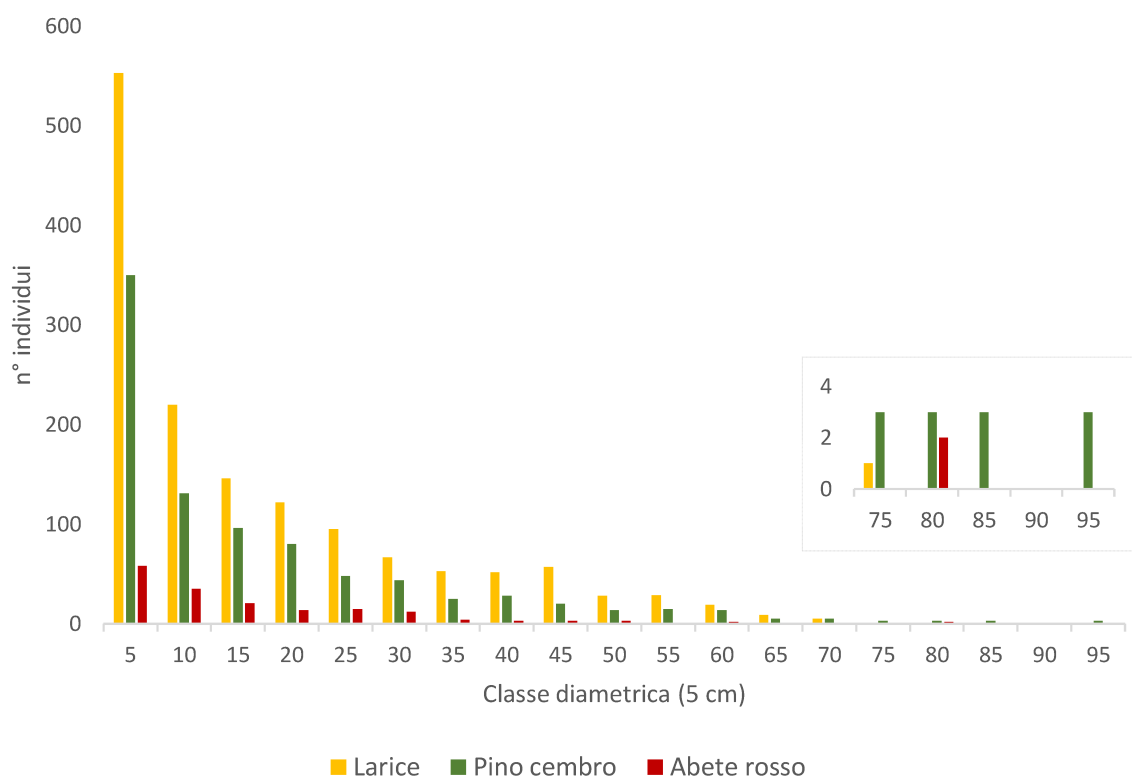


Figura 11 – Distribuzione delle tre specie nelle classi diametriche (5 cm)

#### 4.1.5 Età

Ulteriore elaborazione viene fatta per quanto riguarda l'età delle piante del popolamento. Per questa analisi ci si è basati sui dati raccolti durante il campionamento del 2011 a cui sono stati aggiunti 10 anni per ottenere l'età del popolamento al 2021.

Gli individui componenti il popolamento sono stati raggruppati per specie e in classi di età di 20 anni.

Comparando i dati delle età delle tre specie principali del popolamento, si nota che la distribuzione in classi d'età segue un andamento decrescente, con un elevato numero di individui nelle prime classi, in particolare entro gli 80 anni, alla quale segue una lunga coda fino a raggiungere l'età massima di 570 anni (Fig. 12).

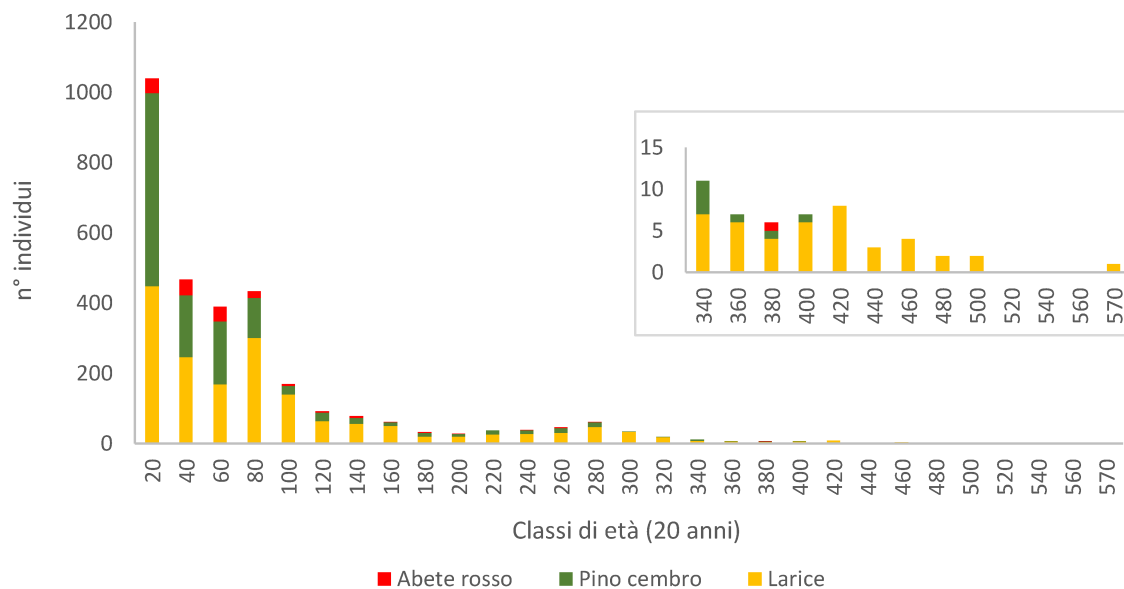


Figura 12 – Distribuzione delle tre specie in classi di età (20 anni)

Osservando la distribuzione si possono notare dei picchi: il primo in corrispondenza della classe d'età di 20 anni, in cui si collocano la gran parte degli individui, un secondo picco è osservabile intorno agli 80 anni mentre, un terzo picco, ma meno accentuato, è presente per la classe di 280 anni.

La specie più longeva del popolamento è il larice con due individui che superano i 500 anni di cui uno, che raggiunge i 570, rappresenta l'età massima registrata. L'età media del larice è di 84 anni.

Il pino cembro raggiunge età inferiori al larice, l'età massima si colloca intorno a 400 anni. L'età media degli individui di pino cembro è di 48 anni.

La curva di distribuzione delle età dell'abete rosso si interrompe nella classe di 200 anni. Quattro individui si collocano nelle classi di 260 e 280 (in corrispondenza del terzo picco di distribuzione), mentre un solo individuo si colloca nella classe di 380 anni. L'età media dell'abete rosso è di 53 anni.

#### 4.1.6 Relazione tra le variabili biometriche

Per verificare il grado di associazione tra le variabili in esame (altezza, diametro, età) è stato utilizzato il coefficiente di correlazione.

Per il calcolo del coefficiente di correlazione, riferito al popolamento di 4 ettari, ci si è basati sui dati del 2011 e del 2016. Per questi anni, infatti, si dispone dei dati aggiornati per tutte e tre le variabili considerate.

		ALTEZZA/DIAMETRO	ALTEZZA/ETÀ	DIAMETRO/ETÀ
2011	Larice	0.85	0.81	0.90
	P. cembro	0.85	0.84	0.93
	A. rosso	0.82	0.76	0.91
	TOT	0.89	0.82	0.82
2016	Larice	0.92	0.78	0.86
	P. cembro	0.90	0.79	0.82
	A. rosso	0.88	0.75	0.82
	TOT	0.88	0.78	0.81

*Tabella 6 - Valori del coefficiente di correlazione*

Gli alti valori di coefficiente di correlazione suggeriscono la presenza di una forte associazione tra le variabili analizzate, per entrambi gli anni e per tutte le specie (Tab. 6). Si può notare una tendenza generale al rafforzamento della correlazione, passando dal 2011 al 2016, per quanto riguarda altezza e diametro, mentre si osserva una riduzione per quanto riguarda le relazioni altezza-età e diametro-età.

Tale calo suggerisce che, in tempi più recenti, le piante siano cresciute meno in altezza e diametro in funzione dell'aumento di età mentre si è consolidata la correlazione tra altezza e diametro.

#### 4.1.7 La rinnovazione, caratteristiche strutturali dal 1994 al 2021

##### Composizione specifica

Per tutti gli anni di campionamento (eccetto per il 1994), la specie più frequente allo stadio di rinnovazione è stato il pino cembro, seguito da larice e abete rosso (Fig. 13).

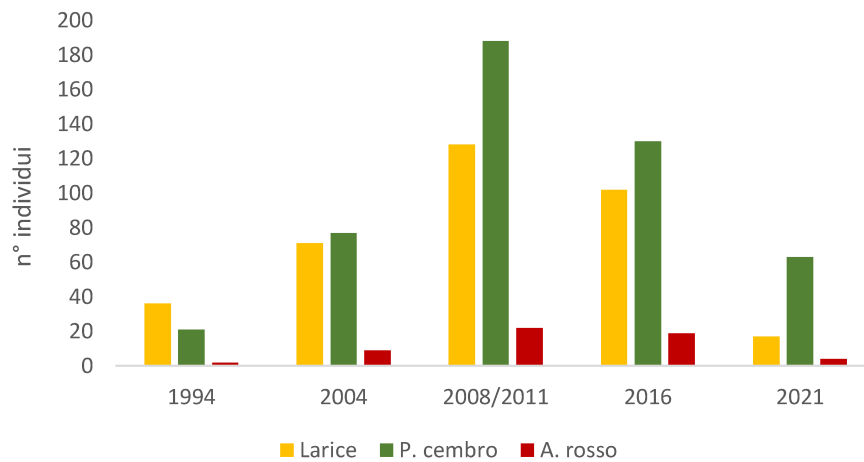


Figura 13 - Numero di individui che hanno superato 1.30 m, ripartiti per specie e per anno di campionamento

Questa tendenza di aumento della quota degli individui di pino cembro rispetto alle altre specie è confermata anche da studi dendrocronologici effettuati nell'area di monitoraggio qui indagata (Soraru and Carrer, 2007). Secondo tali studi, la tendenza in questione avrebbe avuto inizio circa 70 anni fa.

##### Diametro e altezza

Analizzando diametro e altezza della rinnovazione, si può osservare che l'abete rosso è la specie che generalmente si accresce più rapidamente, presentando mediamente i valori maggiori per le due variabili, in particolare per il diametro (Fig. 14 e 15).

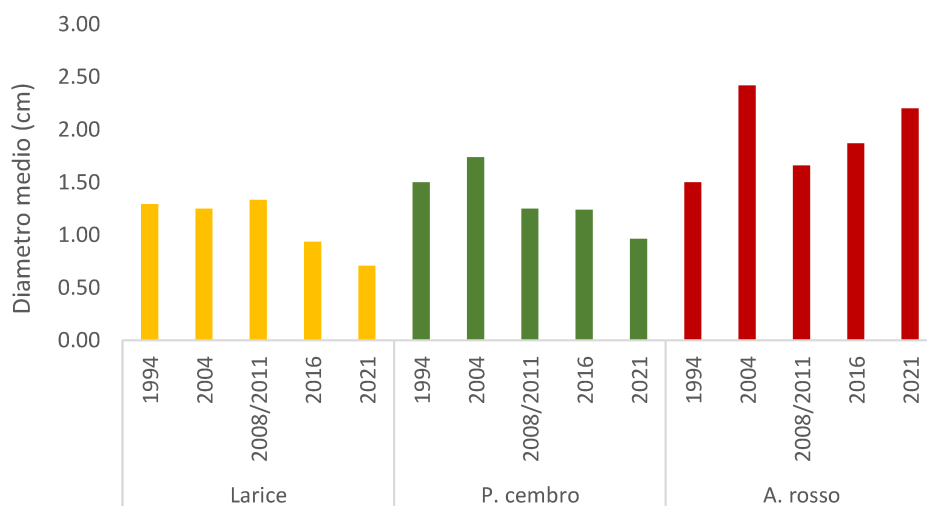


Figura 14 - Diametro medio della rinnovazione, per specie e anno di campionamento

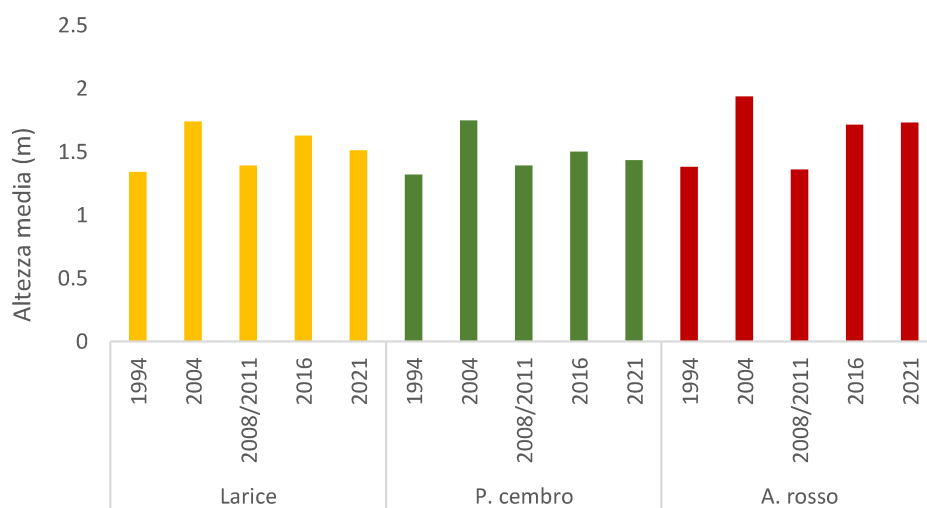


Figura 15 - Altezza media della rinnovazione, per specie e anno di campionamento

Diametro e altezza medi della rinnovazione di abete rosso sono rispettivamente di 1.93 cm e 1.66 m contro 1.10 cm e 1.54 m del larice e 1.34 cm e 1.51 m del pino cembro.

### La mortalità

Dal 1994 al 2016 un totale di 825 piante delle tre specie principali si sono aggiunte allo strato di rinnovazione, composte per circa il 50% da pino cembro, per il 43% da larice e per il 6% da abete rosso.

Al censimento del 2021, 27 anni dopo, si rileva una mortalità totale del 17%, pari a 139 individui. Il 67% degli individui totali morti è risultato essere di pino cembro, il 28% di larice e il 5% di abete rosso (Fig. 16).

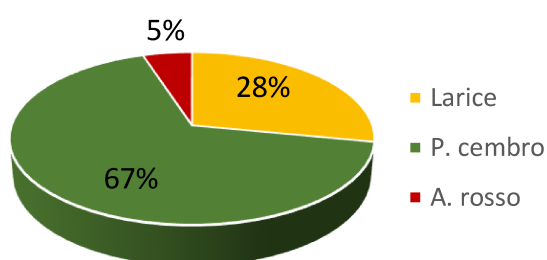


Figura 16 - Mortalità % totale a carico della rinnovazione

La mortalità relativa registrata al 2021, totale e per ogni specie, è riportata in tabella 7:

Specie	Piante totali in rinnovazione al 2016	Piante totali morte al 2021	Mortalità relativa per specie e totale
Larice	357	39	11 %
P. cembro	416	93	22 %
A. rosso	52	7	13 %
<b>Totale</b>	<b>825</b>	<b>139</b>	<b>17 %</b>

Tabella 7 - Mortalità % relativa per specie e totale

Dalla tabella è possibile constatare come il pino cembro dimostri alta suscettibilità nelle prime fasi di sviluppo. Il numero totale di individui aggiunti in rinnovazione per questa specie è superiore agli individui di larice di sole 60 piante, la mortalità risulta invece significativamente più alta.

Quanto affermato è stato verificato anche dal punto di vista statistico, per mezzo del test del *chi-quadrato* ( $X^2$ ).

Il test del *chi-quadrato* viene effettuato per valutare la possibilità di rifiutare l'ipotesi nulla di indipendenza tra mortalità a carico della rinnovazione e specie considerata, cioè che la mortalità si distribuisca casualmente tra le tre specie e non in modo dipendente dalla specie stessa. Il calcolo avviene mediante il confronto tra i valori osservati e quelli teorici calcolati in condizioni di casualità di distribuzione.

Il test effettuato ha restituito un valore di *chi-quadrato* di 18.37, superiore al valore teorico di 5.99 (con  $\alpha = 0.05$  e 2 gradi di libertà) e un *p-value* di  $0.0001 < 0.05$ .

Ciò permette di rifiutare l'ipotesi nulla di indipendenza tra le due variabili e di affermare che l'appartenenza ad una certa specie incide sul tasso di mortalità.

## 4.2 Point Pattern Analysis

Nell'analisi della distribuzione spaziale attraverso l'*O-ring statistic*, il primo step da compiere è quello di scegliere opportunamente i parametri e il modello nullo con cui effettuare la simulazione di Monte Carlo.

Il primo parametro da scegliere è l'ampiezza della corona circolare nelle quale svolgere le analisi. Per effettuare tale scelta ci si è basati sulla letteratura e su alcune simulazioni effettuate con diverse ampiezze: 1, 3, 5 e 10 metri (Fig. 17).

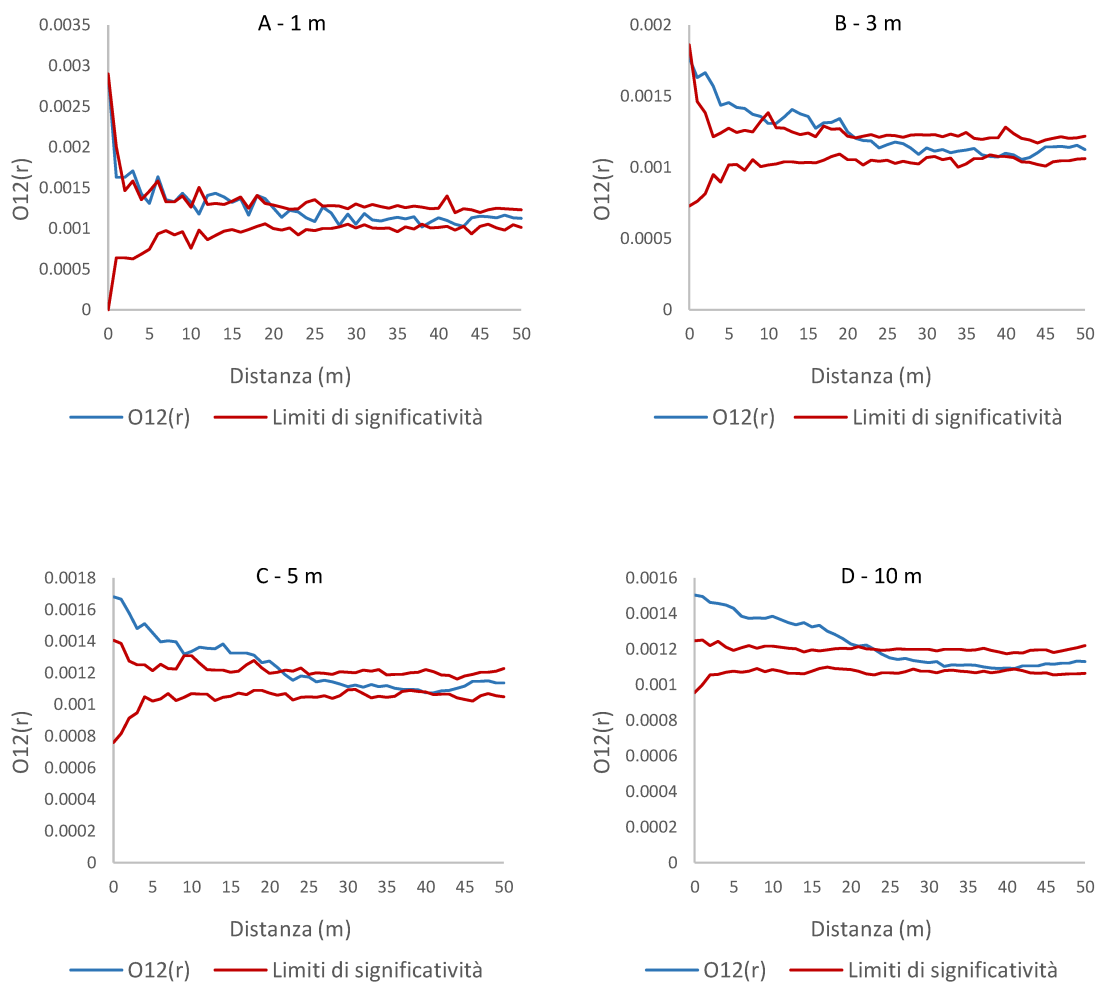


Figura 17 - Analisi bivariata con corona circolare di 1 (A), 3 (B), 5 (C) e 10 (D) metri di ampiezza



Per l'ampiezza della corona circolare si è optato per 5 metri. Utilizzando 1 o 3 metri si ottengono risultati eccessivamente instabili, probabilmente dovuti al numero troppo basso di individui che vengono intercettati nelle varie classi di distanza. Utilizzando 10 metri vengono considerati di volta in volta un numero eccessivo di individui, con risultati scarsamente significativi.

Successivamente è stato confrontato l'impiego di un modello nullo con una distribuzione totalmente casuale (CSR) (Fig. 18-A), con l'impiego di un modello nullo con una distribuzione di tipo "Poisson" (Fig. 18-B). Si è optato per l'impiego della distribuzione di Poisson per tenere conto della morfologia disomogenea dell'area di studio.

Il modello nullo con distribuzione di Poisson colloca i punti della simulazione secondo una probabilità maggiore o minore in funzione della distribuzione reale osservata, tenendo conto delle aree dove vi è assenza o un minor numero di individui a causa di ostacoli e peculiarità del terreno.

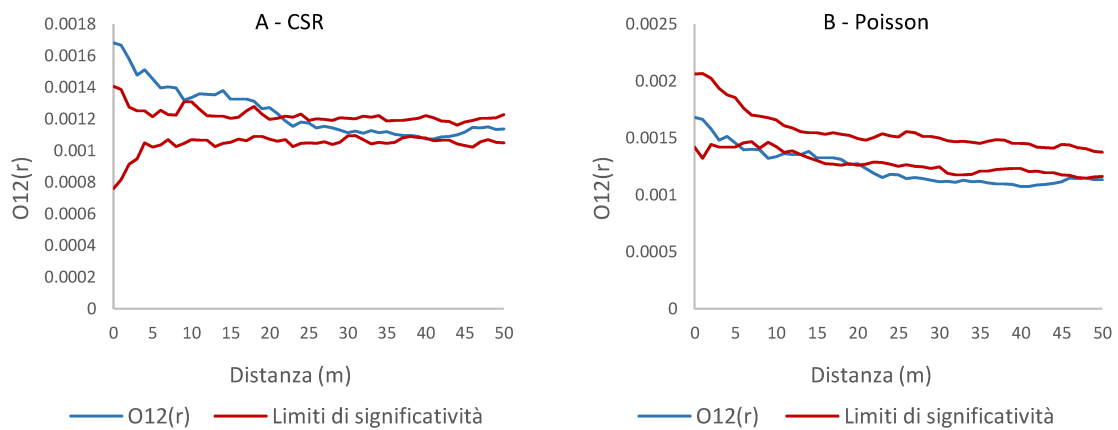


Figura 18 – Confronto tra modello nullo con distribuzione CSR (A) e modello nullo con distribuzione di Poisson (B)

Dai grafici è possibile notare come, quella che sembrava una tendenza delle piante esaminate all'aggregazione, fosse invece un falso effetto determinato dal modello nullo CSR.

Per quanto riguarda invece il calcolo dei limiti di significatività e il numero di reiterazioni della simulazione di Monte Carlo, si è optato per 999, cioè il numero che garantirebbe una significatività dei risultati pari al 95% (Soraru and Carrer, 2007).

### 4.2.1 Analisi della distribuzione spaziale dell'intero popolamento

La distribuzione spaziale degli individui componenti l'area di monitoraggio è stata indagata attraverso analisi univariata e bivariata. Per questo tipo di analisi è stato considerato l'intero popolamento esteso sui quattro ettari attuali. L'analisi univariata ha riguardato il popolamento nel suo insieme e le singole specie.

Con l'analisi bivariata sono invece state indagate le relazioni tra coppie delle tre specie principali del popolamento. Per la simulazione di Monte Carlo, le coppie sono state lasciate libere a spostamenti casuali.

#### Analisi univariata totale e delle tre specie principali

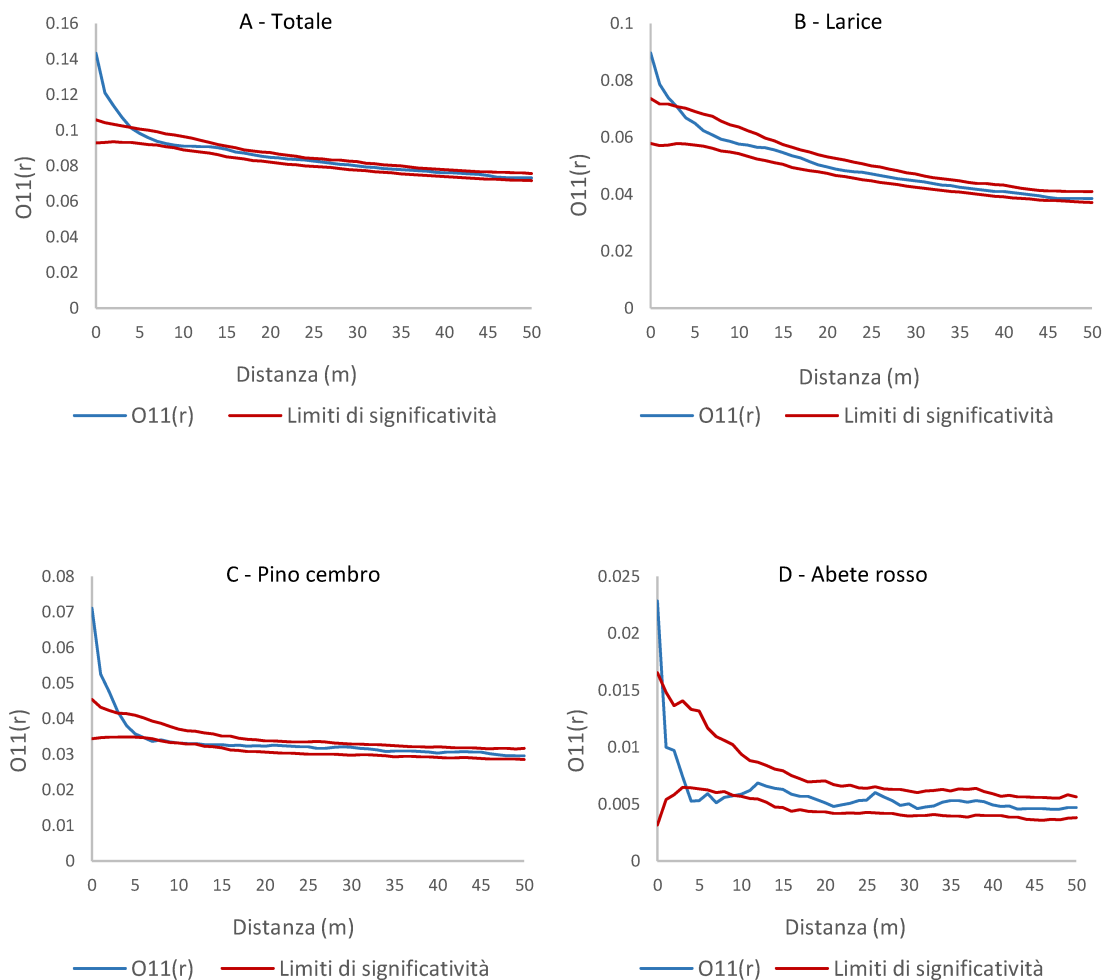


Figura 19 – Analisi univariata totale (A) e per specie (B, C, D)

I risultati dell'analisi univariata evidenziano una tendenza generale all'aggregazione degli individui a livello interspecifico (Fig. 19-A) e intraspecifico (Fig. 19-B, 19-C, 19-D). L'aggregazione rilevata è però limitata alla breve distanza, entro i 5 metri, per larice e pino cembro, mentre alla brevissima distanza per l'abete rosso. Questa specie manifesta anche una certa repulsione verso gli individui della stessa specie a distanze comprese tra 5 e 10 metri.

Analisi bivariata per coppie di specie

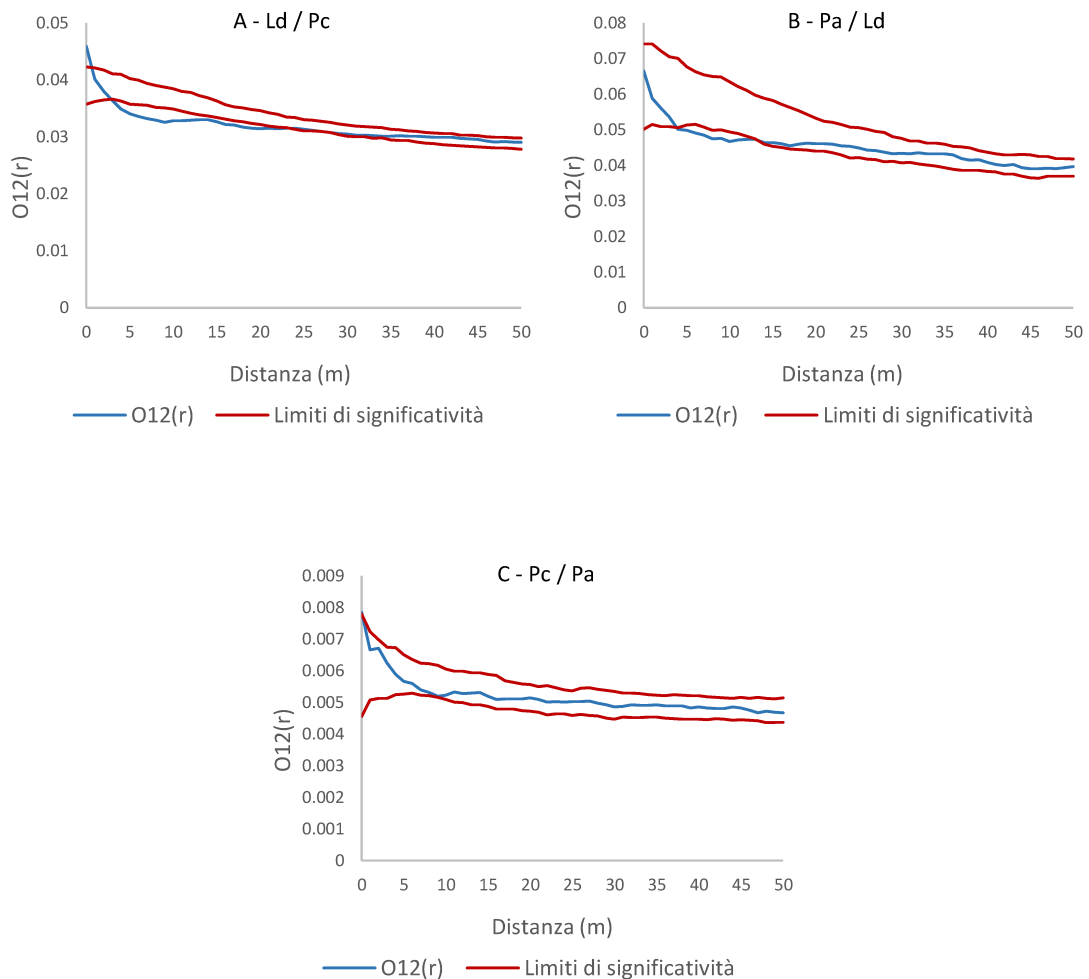


Figura 20 – Analisi bivariata condotta per coppie di specie

Dall'analisi bivariata condotta per le tre coppie di specie, emergono i seguenti risultati: le piante di pino cembro e larice (Fig. 20-A) dimostrano una chiara tendenza alla repulsione, dalla breve alla lunga distanza (da 4 a 24 metri), ciò indica che la probabilità di trovare piante di queste due specie, entro tale range di distanza, è bassa.

La distribuzione di larice e abete rosso (Fig. 20-B) è di tipo casuale sulla breve distanza, segue una tendenza alla segregazione tra 4 e 14 metri.

Le piante di pino cembro e abete rosso (Fig. 20-C) seguono invece una distribuzione totalmente casuale.

#### 4.2.2 Analisi della distribuzione spaziale della rinnovazione

L'analisi univariata e bivariata è stata condotta anche per le piante allo stato di rinnovazione, aggiunte durante i campionamenti dal 1994 al 2021.

Per ogni anno di campionamento è stata indagata la distribuzione della rinnovazione totale e delle singole specie attraverso l'analisi univariata, considerando però solo gli individui di larice e pino cembro, se in numero sufficiente per ottenere risultati significativi. La numerosità della rinnovazione di abete rosso non è mai stata tale da permettere l'esecuzione dell'analisi e la restituzione di risultati apprezzabili, così come la rinnovazione di larice riferita all'anno 2021.

L'analisi univariata è stata condotta anche cumulando tutte le piante aggiunte come rinnovazione, dal 1994 al 2021, a livello totale e per singole specie. Questa analisi viene effettuata per valutare la distribuzione delle piante considerabili come piante giovani del popolamento e per meglio apprezzare schemi distributivi che non si è potuto cogliere per gli anni in cui la rinnovazione censita è stata meno abbondante.

Analisi univariata della rinnovazione totale per ogni anno di campionamento

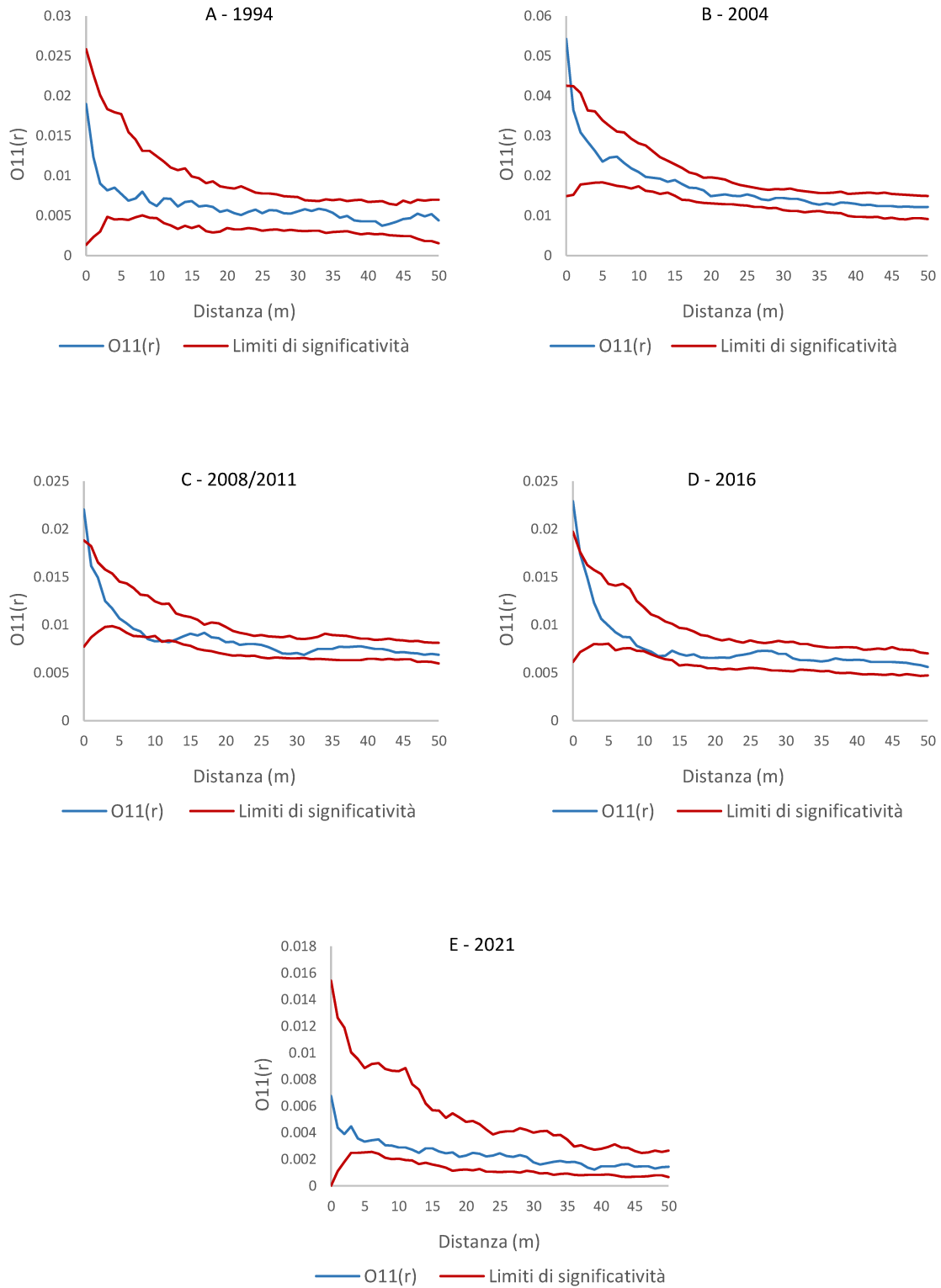


Figura 21 - Analisi univariata rinnovazione totale, al 1994 (A), 2004 (B), 2008/2011 (C), 2016 (D), 2021 (E)

Analisi univariata rinnovazione di larice

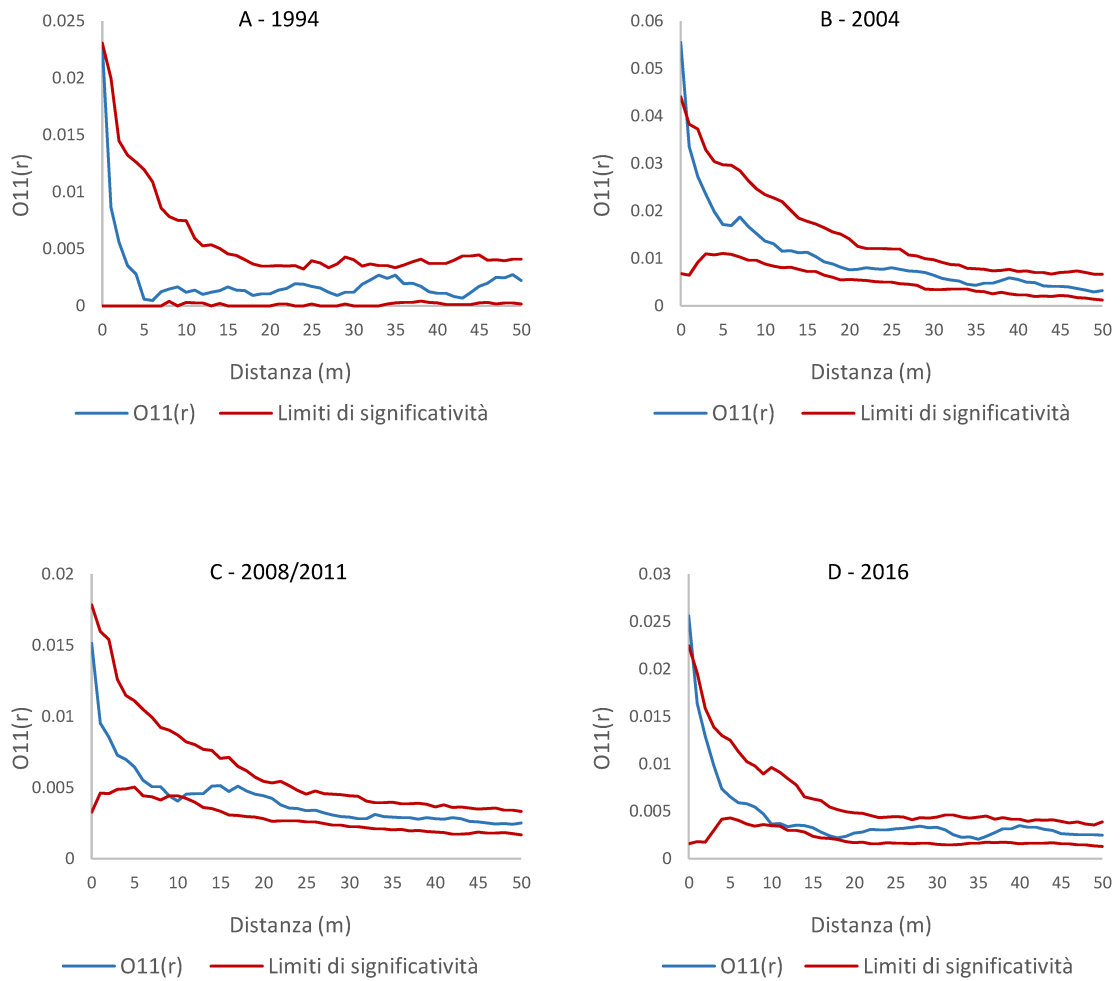


Figura 22 - Analisi univariata rinnovazione di larice, al 1994 (A), 2004 (B), 2008/2011 (C), 2016 (D)

Analisi univariata rinnovazione di pino cembro

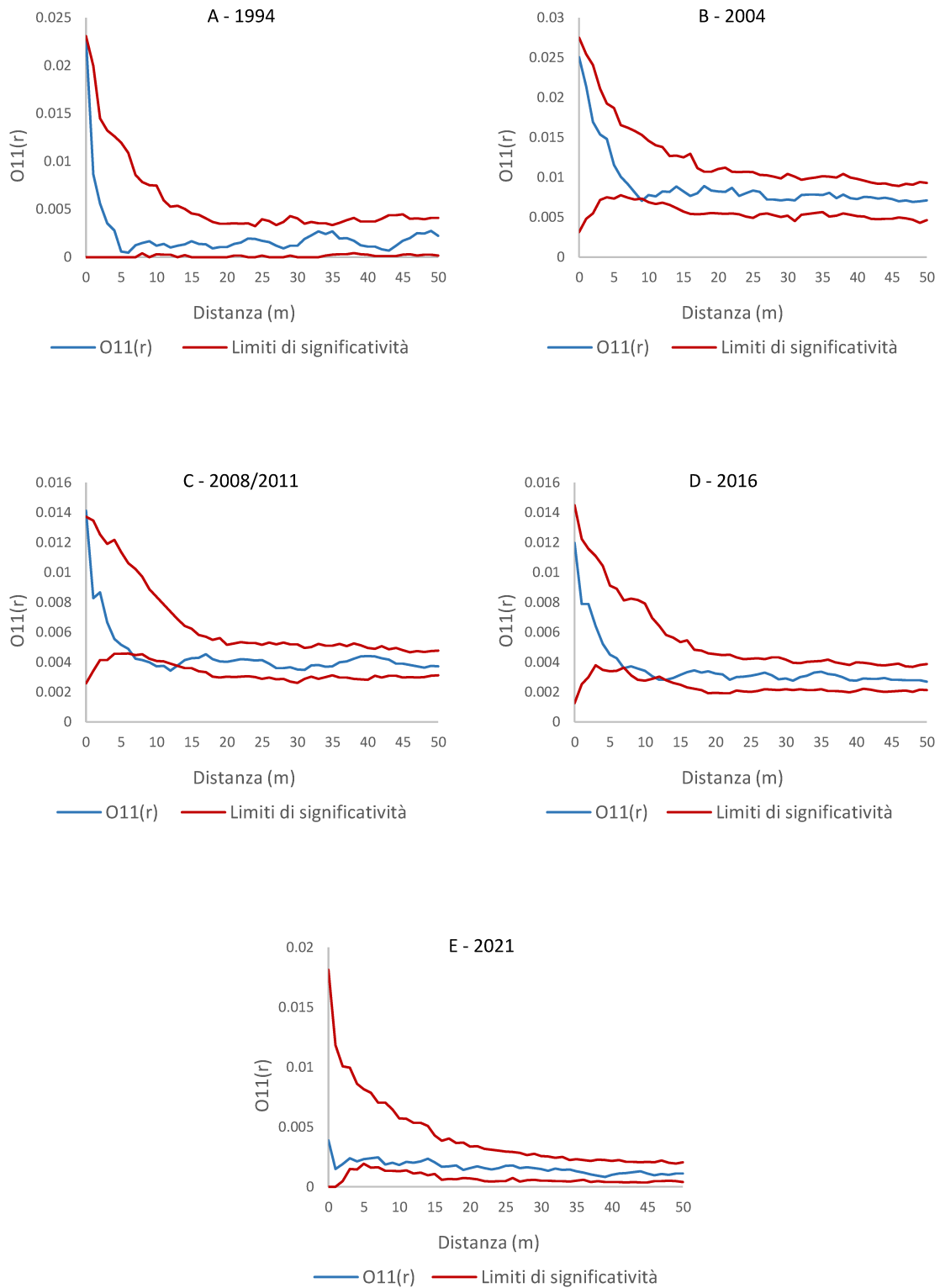


Figura 23 - Analisi univariata rinnovazione di pino cembro, al 1994 (A), 2004 (B), 2008/2011 (C), 2016 (D), 2021 (E)



Come è possibile constatare dai grafici, per tutti gli anni di campionamento, la rinnovazione tende a seguire una distribuzione di tipo casuale.

È possibile però osservare un certo grado di aggregazione interspecifica, nella breve distanza, quando si analizza la rinnovazione nel suo complesso, in particolare per gli anni 2004, 2008/2011 e 2016 (Fig. 21-B, 21-C, 21-D).

### Analisi univariata rinnovazione cumulata dal 1994 al 2021

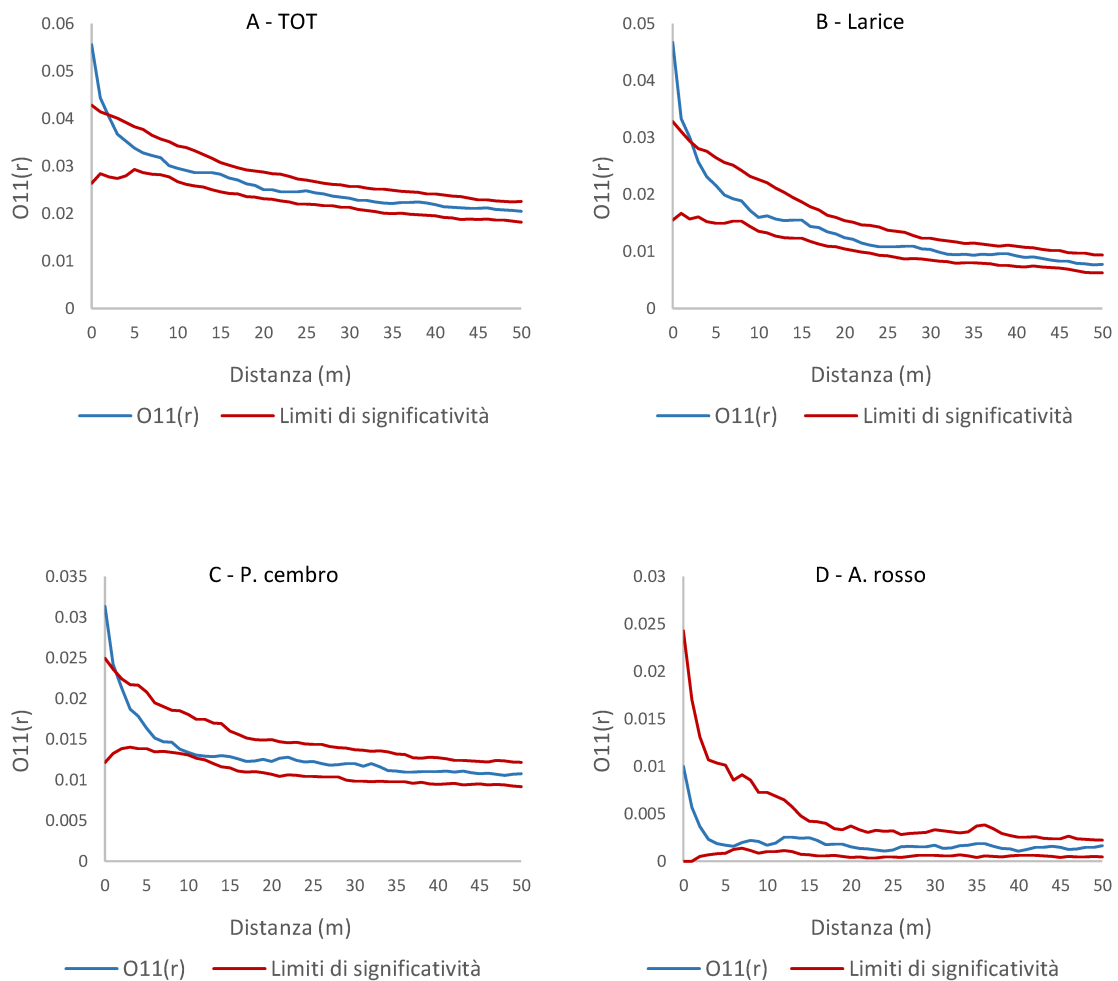


Figura 24 - Analisi univariata cumulata della rinnovazione dal 1994 al 2021, totale (A), di larice (B), di pino cembro (C), di abete rosso (D)

L'analisi univariata cumulata degli individui aggiunti come rinnovazione dal 1994 al 2021 restituisce risultati leggermente differenti rispetto a quella effettuata per ogni singolo anno di campionamento.

Dai risultati parrebbe emergere una tendenza globale della rinnovazione ad aggregarsi a livello interspecifico entro i 2 metri (Fig. 24-A). Tale risultato generale è in realtà da ascrivere alla sovrapposizione del pattern distributivo di due specie: larice e pino cembro (Fig. 24-B, 24-C) che, infatti, tendono ad aggregarsi a livello intraspecifico, rispettivamente fino a 3 metri e fino a 2 metri.

La rinnovazione di abete rosso (Fig. 24-D) denota una tendenza alla distribuzione casuale.

Conferma dell'assenza di aggregazione tra le specie in rinnovazione la si ottiene dai risultati dell'analisi bivariata.

#### *Analisi bivariata della rinnovazione cumulata*

La distribuzione spaziale è stata analizzata anche a livello interspecifico attraverso l'analisi bivariata.

Tale analisi è stata impostata confrontando la distribuzione della rinnovazione cumulata (dal 1994 al 2021) per coppie di specie al fine di indagare la presenza di particolari pattern di aggregazione o repulsione tra le tre specie principali.

Per la simulazione di Monte Carlo le specie vengono lasciate entrambe libere a distribuzioni casuali.

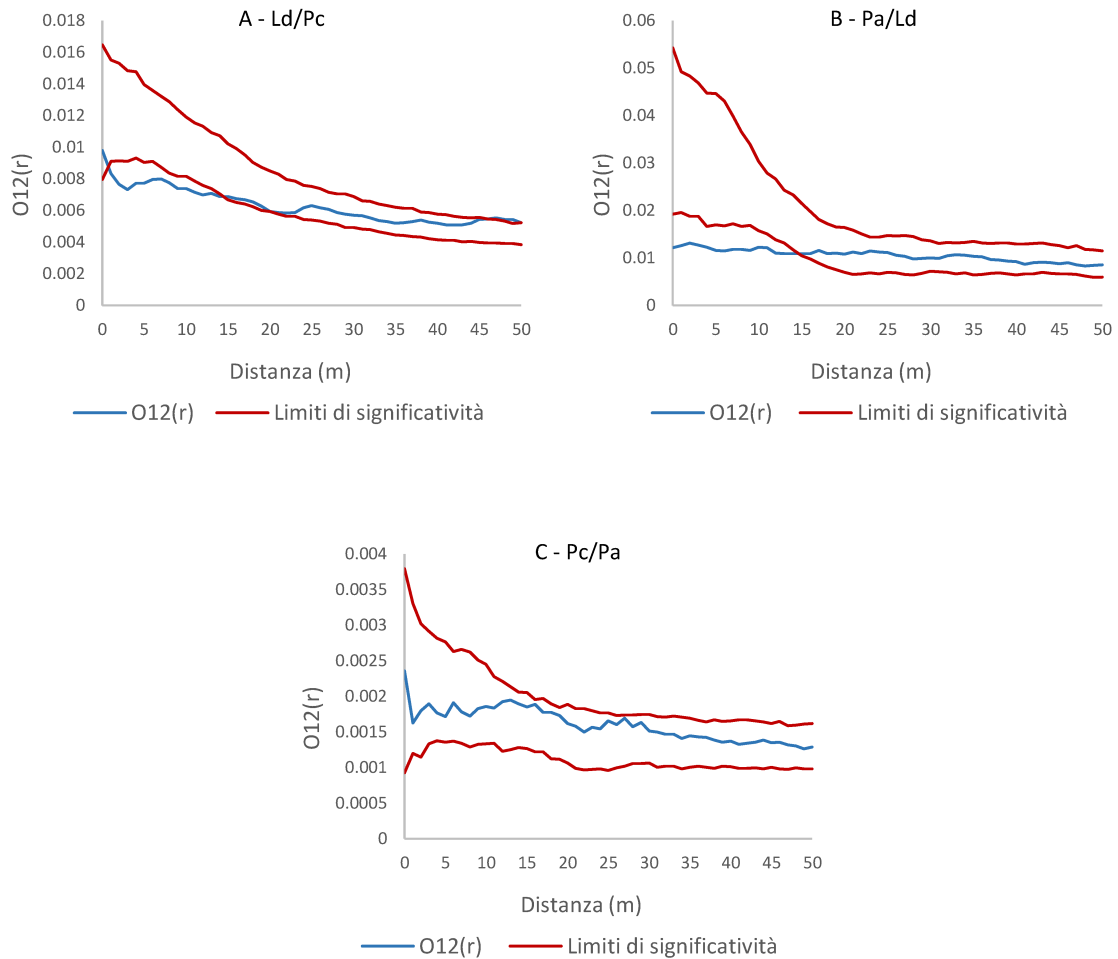


Figura 25 – Analisi bivariata intraspecifica della rinnovazione totale

I risultati che emergono da tale analisi dimostrano una forte repulsione tra la rinnovazione di larice e pino cembro e di abete rosso e larice (Fig. 25-A, 25-B). Tale repulsione si manifesta dalla brevissima distanza fino a circa 15 metri per entrambe le specie. Ciò indica che, generalmente, dove si insediano le nuove piante di larice, non si insediano quelle di pino cembro e abete rosso, fino anche a distanze considerevoli.

La rinnovazione di pino cembro e abete rosso non manifesta alcun tipo di interazione distribuendosi in modo tendenzialmente casuale (Fig.25-C).

### Analisi bivariata rinnovazione e piante più sviluppate

L'analisi bivariata è stata condotta anche per valutare la presenza di particolari pattern nella distribuzione della rinnovazione, nei confronti delle piante più sviluppate, a livello intraspecifico e interspecifico. L'analisi è stata condotta cumulando, per ogni specie, l'intera rinnovazione aggiunta dal 1994 al 2021 e confrontandone la distribuzione con quella delle piante più sviluppate. Per la simulazione di Monte Carlo le piante più sviluppate vengono mantenute fisse, quelle più giovani vengono lasciate libere.

Rinnovazione di larice e piante più sviluppate delle tre specie principali:

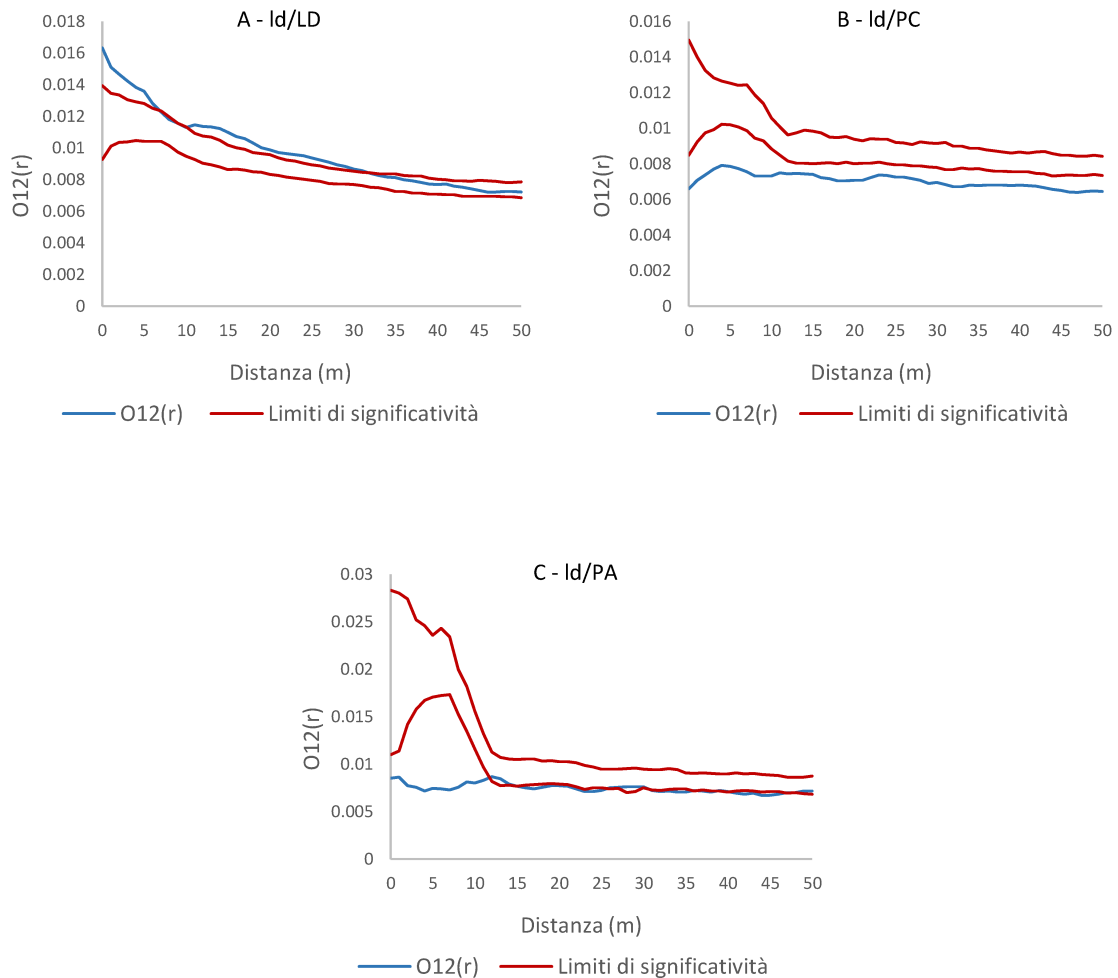


Figura 26 – Analisi bivariata rinnovazione di larice e piante più sviluppate di larice (A), pino cembro (B), abete rosso (C)

Rinnovazione di pino cembro e piante più sviluppate delle tre specie principali:

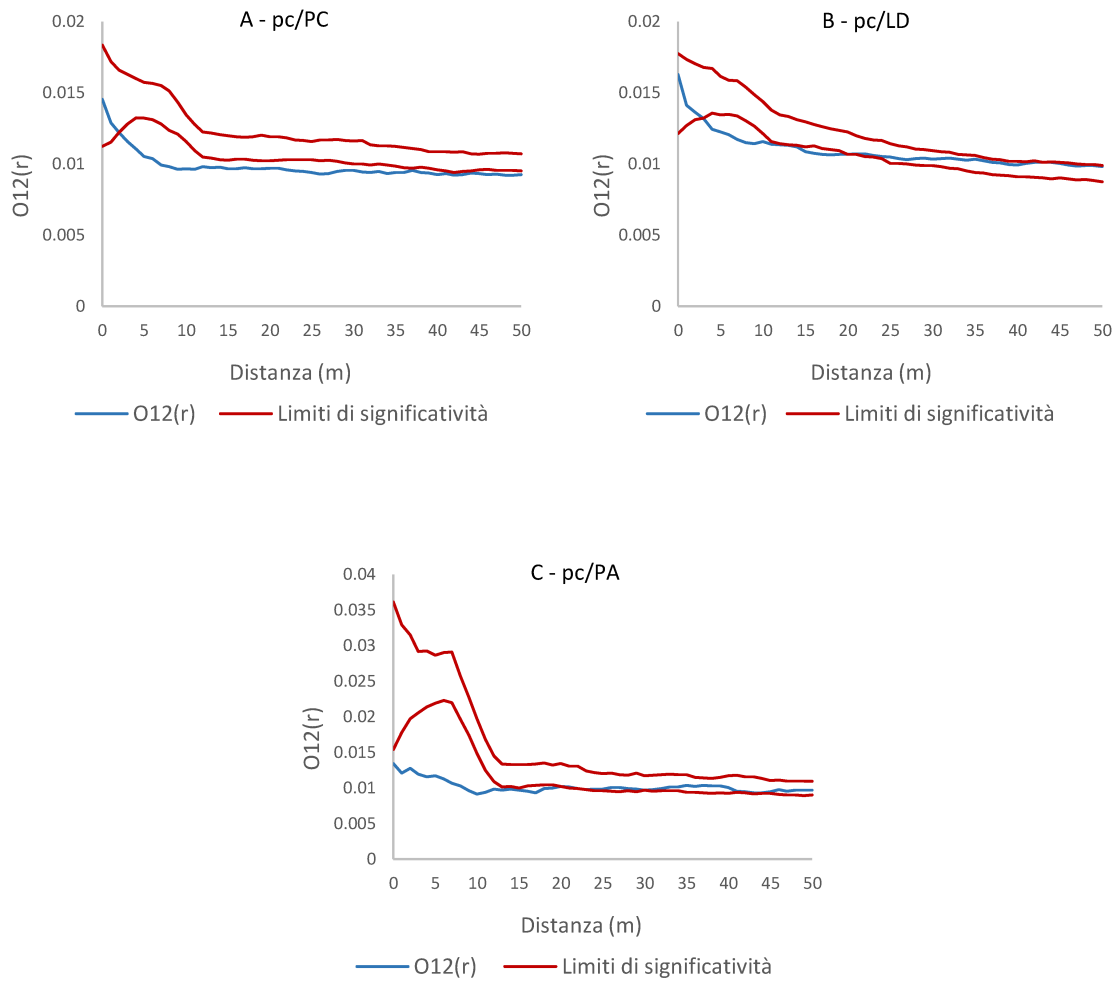


Figura 27 - Analisi bivariata rinnovazione di pino cembro e piante più sviluppate di pino cembro (A), larice (B), abete rosso (C)

## Rinnovazione di abete rosso e piante più sviluppate delle tre specie principali:

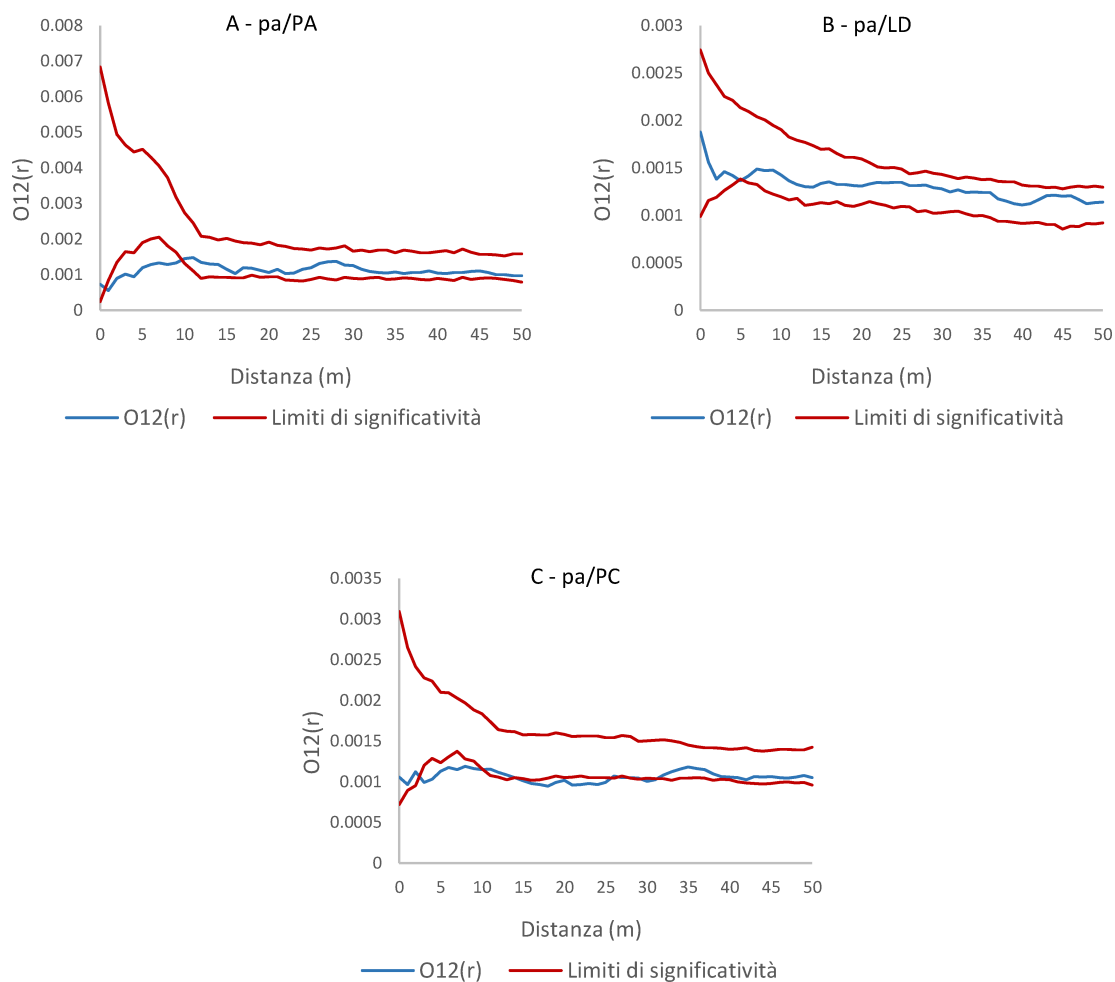


Figura 28 - Analisi bivariata rinnovazione di abete rosso e piante più sviluppate di abete rosso (A), larice (B), pino cembro (C)

Dai risultati ottenuti dall'analisi bivariata tra rinnovazione e individui più sviluppati, è possibile effettuare alcune considerazioni.

La rinnovazione di larice tende ad associarsi, dalla breve alla lunga distanza, alle piante più sviluppate della stessa specie (Fig. 26-A). Dimostra al contrario forte segregazione verso le piante più sviluppate di pino cembro e abete rosso (Fig. 26-B e 26-C). Il larice tende quindi a rinnovarsi solo al di sotto di piante della stessa specie.

La rinnovazione di pino cembro dimostra forte segregazione nei confronti delle piante più sviluppate di tutte le specie (Fig. 27-A, 27-B, 27-C), in particolare a livello intraspecifico. Le piante di pino cembro tendono quindi a rinnovarsi principalmente distanti dalle piante più sviluppate del popolamento.

Anche l'abete rosso tende a non rinnovare al di sotto delle piante adulte della propria specie e di quelle di pino cembro (28-A e 28-C), non dimostra preferenze per quanto riguarda il larice (Fig. 28-B).

### 4.2.3 Analisi della distribuzione spaziale delle piante morte

Viene infine proposta l'analisi della distribuzione spaziale delle piante morte, al fine di verificare come queste si distribuiscono a livello totale e specifico e per verificare il comportamento della rinnovazione verso di queste.

Per l'analisi bivariata è stata utilizzata la rinnovazione cumulata di tutti gli anni di campionamento. Per la simulazione di Monte Carlo le piante morte vengono mantenute fisse, la rinnovazione viene lasciata libera a spostamenti casuali.

#### Analisi univariata delle piante morte

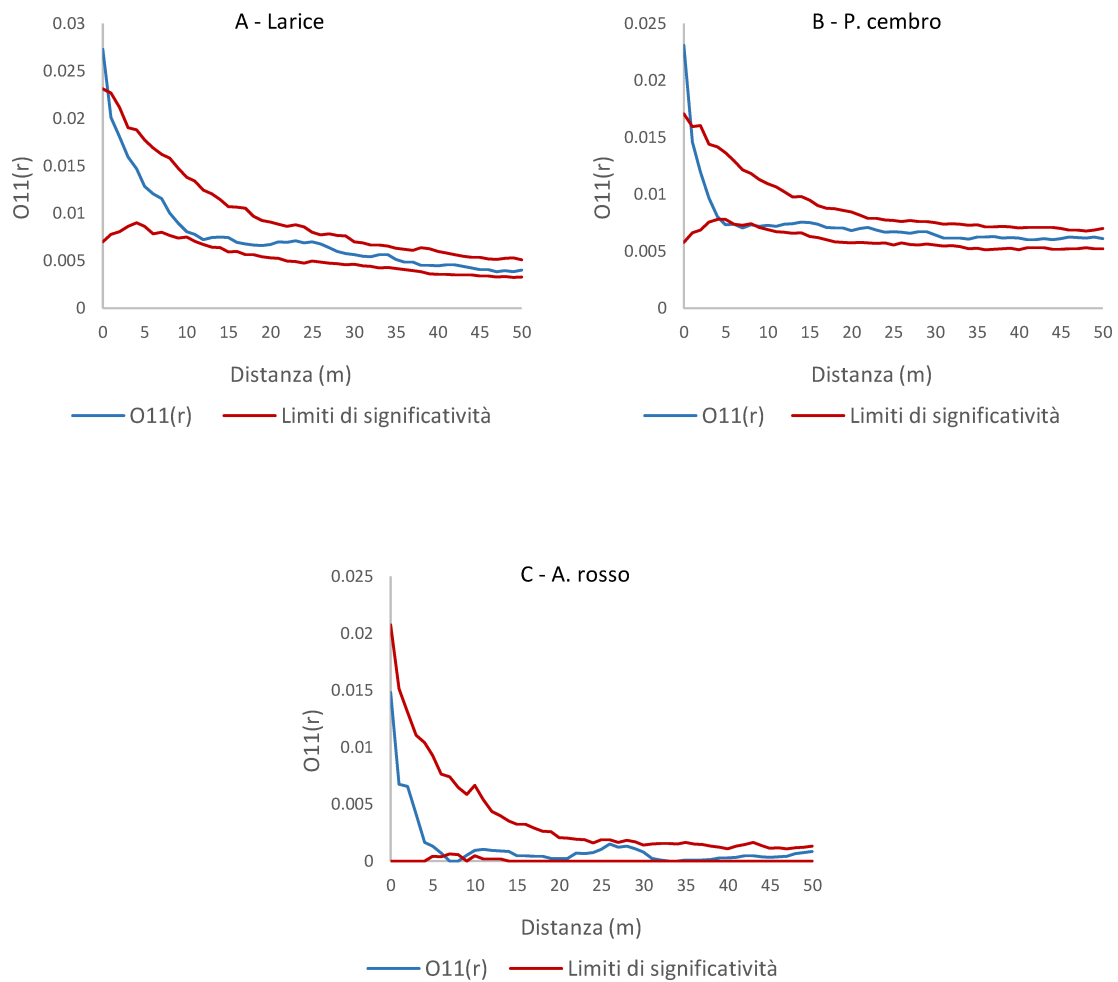


Figura 29 – Analisi univariata piante morte, di larice (A), di P. cembro (B), di A. rosso (C)



Dai grafici è possibile apprezzare come le piante morte di larice e di pino cembro dimostrano una tendenza all'aggregazione entro la brevissima distanza (1 metro) (Fig. 29-A, 29-B)

Le piante morte di abete rosso si distribuiscono invece casualmente (Fig. 29-C).

Analisi bivariata piante morte e rinnovazione

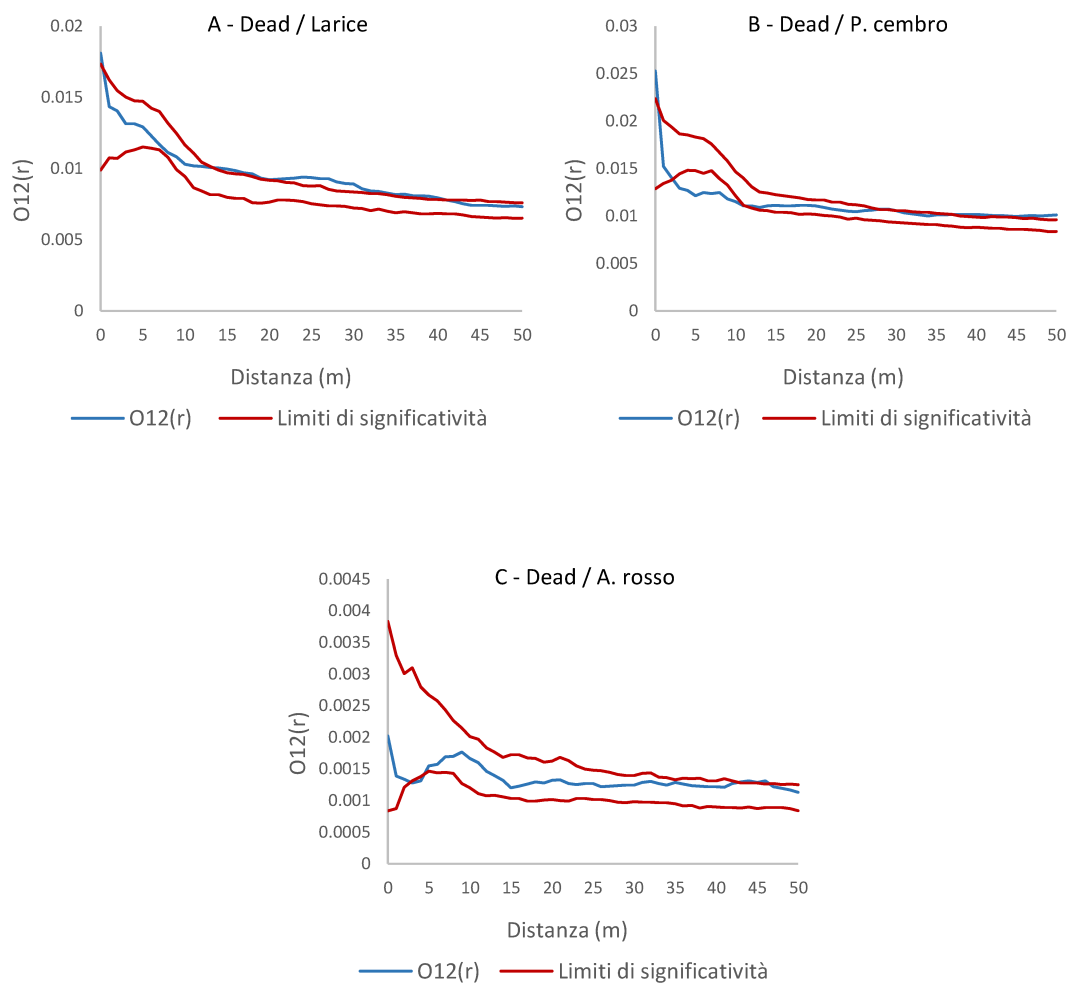


Figura 30 - Analisi bivariata piante morte e rinnovazione di Larice (A), di Pino cembro (B), di Abete rosso (C)

Dai grafici emerge che la rinnovazione di larice ha una distribuzione tendenzialmente casuale nei confronti delle piante morte, solo entro il primo metro evidenzia una minima aggregazione (Fig. 30-A).

Anche la rinnovazione di pino cembro dimostra una leggera aggregazione entro il primo metro di distanza dalle piante morte, successivamente denota segregazione tra 2 e 11 metri (Fig. 30-B).

La rinnovazione di abete rosso si distribuisce invece in maniera del tutto casuale nei confronti delle piante morte (Fig. 30-C).

## 4.3 Surface Pattern Analysis

Una volta indagata la distribuzione spaziale delle piante del popolamento, il passo successivo è stato quello di analizzare la struttura spaziale dell'area di studio, al fine di verificare se gli individui del popolamento presentano autocorrelazione (positiva o negativa) nei confronti di una o più variabili biometriche.

Tale analisi viene svolta a livello globale, tramite le statistiche  $I$  di Morans e  $c$  di Geary e l'impiego di correlogrammi e, a livello locale, tramite la statistica locale  $G$  e l'uso di grafici.

Per effettuare tale analisi viene utilizzata come variabile biometrica l'altezza. Avendo verificato l'elevato grado di correlazione tra questa e le variabili età e diametro, è possibile considerarla come rappresentativa anche di quest'ultime.

L'analisi della struttura a livello globale, riguardante l'età del popolamento, verrà effettuata per confermare la veridicità di quanto esposto.

Anche questa tipologia di analisi viene effettuata per l'intero popolamento e per la rinnovazione aggiunta durante i vari anni di campionamento (dal 1994 al 2021) e totale.

### 4.3.1 Analisi della struttura spaziale globale e locale del popolamento

La struttura spaziale globale e locale è stata analizzata per l'intero popolamento sui 4 ettari attuali, utilizzando l'altezza aggiornata al 2016.

Per quanto riguarda l'analisi della struttura a livello globale sono state utilizzate le classi di distanza di 3 metri e 5 metri, cioè quelle che restituiscono i risultati più facilmente interpretabili.

Per quanto riguarda invece l'analisi della struttura dell'intero popolamento, a livello locale, sono state utilizzate le distanze critiche di 10, 15 e 20 metri

Analisi della struttura spaziale globale dell'intero popolamento, con la variabile altezza

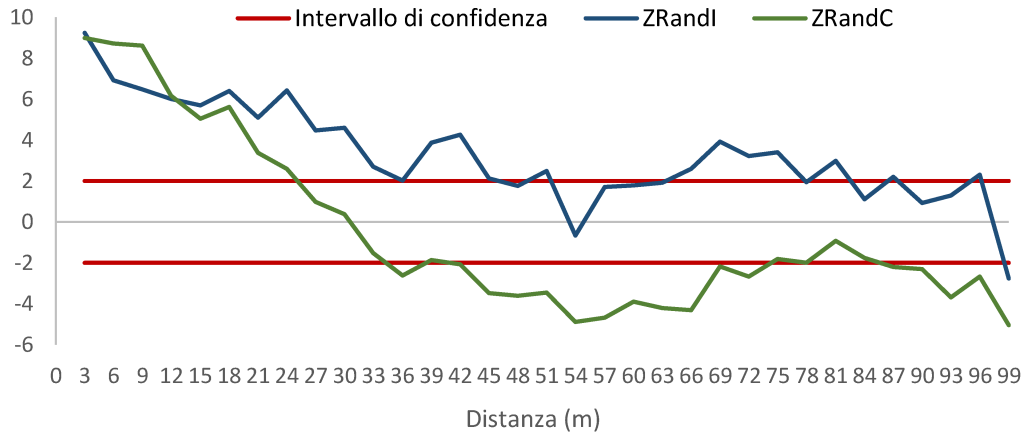


Figura 31 - Correlogramma calcolato con classe di distanza di 3 metri, per l'altezza dell'intero popolamento

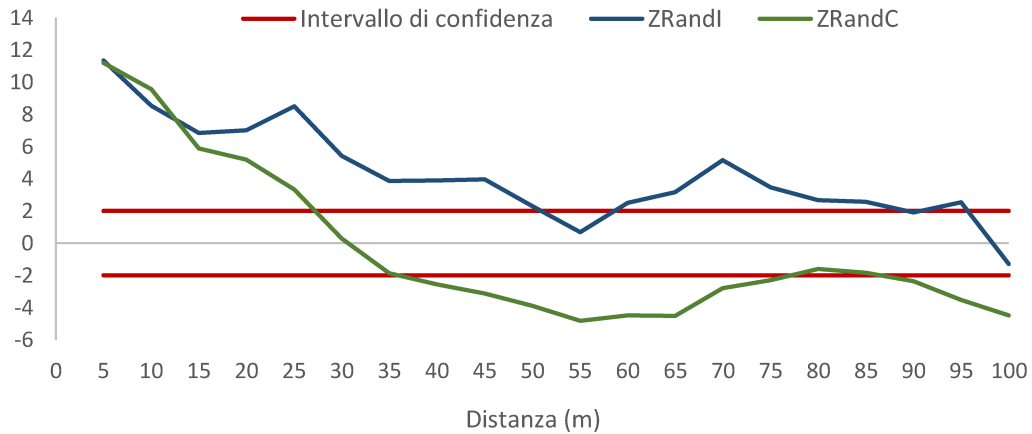


Figura 32 - Correlogramma calcolato con classe di distanza di 5 metri, per l'altezza dell'intero popolamento

Osservando gli andamenti delle curve dei due indici  $I$  di Moran e  $c$  di Geary, è possibile constatare come, per entrambe le classi di distanza considerate (Fig. 31 e 32), le piante del popolamento dimostrino valori significativi e maggiori di autocorrelazione positiva entro distanze più prossime e valori di autocorrelazione negativi a distanze più elevate. Le curve hanno quindi un andamento a gradiente tendenzialmente negativo.

Tale andamento indica che, a livello generale, piante vicine o mediamente vicine, tendono ad assumere valori di altezza simili tra loro, con l'aumentare della distanza i valori di altezza tenderanno alla casualità o ad essere estremamente differenti dai primi considerati. Ciò indica la presenza di gruppi, anche molto estesi, di piante con valori di altezza simili, alternati a fasce in cui vi è assenza di autocorrelazione, a cui seguono gruppi di piante con valori di altezza molto differenti dai primi.

Le curve che descrivono l'autocorrelazione del popolamento possono variare base all'indice considerato ed in base alla classe di distanza scelta. L'indice  $c$  di Geary appare più sensibile verso valori positivi di autocorrelazione, l'indice  $I$  di Moran è invece più sensibile verso valori negativi.

L'indice  $I$  di Moran restituisce valori positivi di autocorrelazione tra 0 e 51 e tra 63 e 84 per la classe di distanza di 3 metri. Valori positivi fino a 50 metri e tra 60 e 95 per la classe di distanza di 5 metri.

L'indice  $c$  di Geary, invece, denota, per la classe di distanza di 3 metri, autocorrelazione positiva fino a circa 24 metri, per poi restituire autocorrelazione negativa tra 36 e 75 metri. Per la classe di 5 metri l'autocorrelazione è positiva fino a 30 metri, mentre è negativa da 35 in poi.

Analisi della struttura spaziale locale dell'intero popolamento, con la variabile altezza

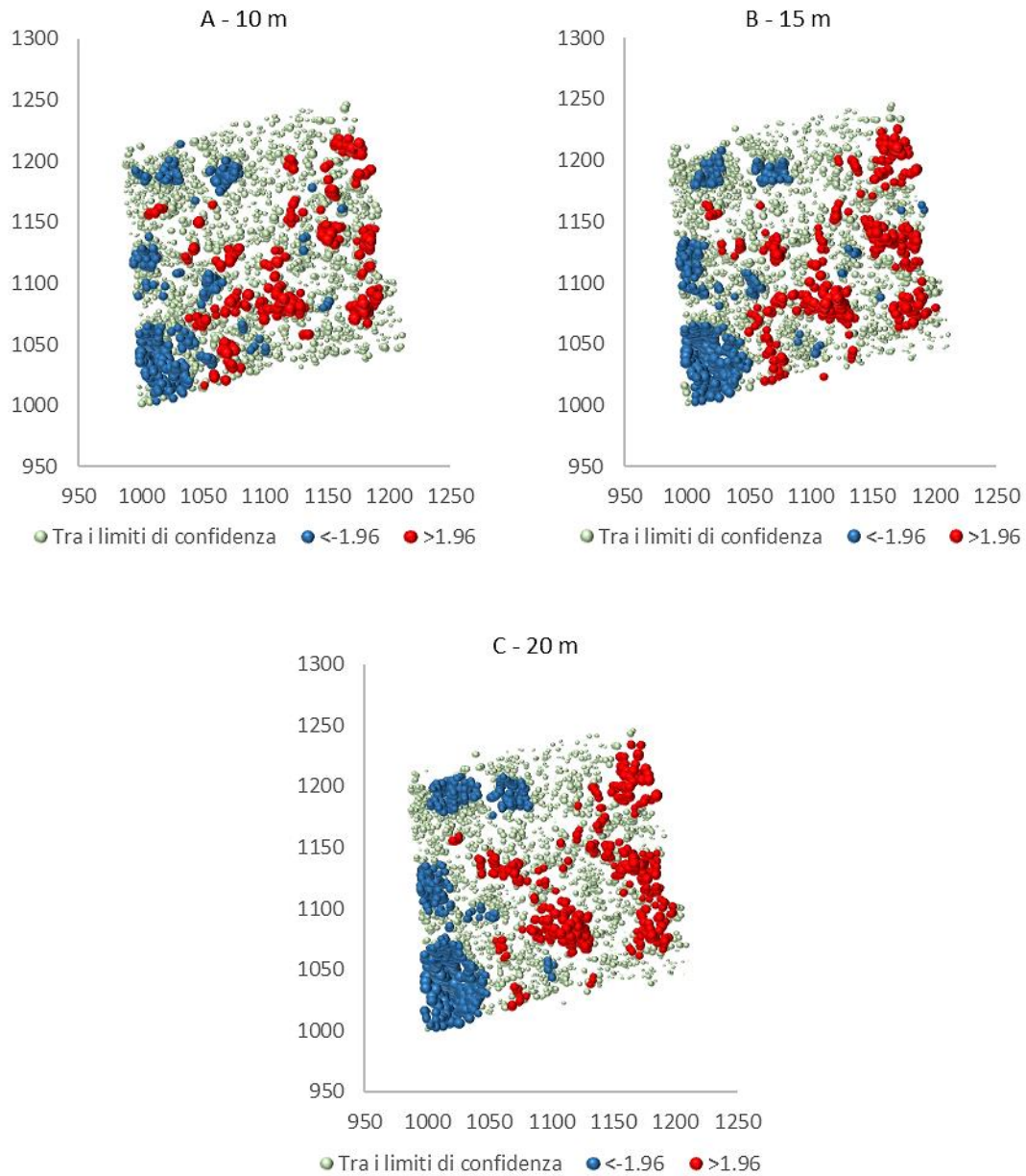


Figura 33 - Analisi locale della struttura del popolamento totale, per le distanze critiche di 10 metri (A), 15 metri (B), 20 metri (C)

Per interpretare correttamente i risultati si ricorda che l'area di studio ha esposizione Nord-Est e che quindi, sui grafici, si ritrovano le quote più elevate nella fascia di sinistra (Ovest) e le quote inferiori nella fascia di destra (Est).

I risultati dell'analisi locale del popolamento sono coerenti con quanto emerso dall'analisi globale. È infatti possibile apprezzare dai grafici la presenza di spot dove le piante dimostrano aggregazione per valori simili di altezza. Tali spot sono definiti *hot-spot* quando piante generalmente più alte di quelle attorno si aggregano o *cold-spot* se i nuclei hanno altezza media inferiore di quelle attorno.

L'analisi locale dell'area di monitoraggio denota, a livello generale, la presenza di *cold-spot*, anche di elevate dimensioni, ad Ovest, cioè nella fascia a quote maggiori, al di sotto della piattaforma rocciosa sovrastante l'area di studio, e la presenza di diversi *hot-spot* nella parte centrale e ad est, cioè alle quote inferiori (Fig. 33). Tale tendenza diviene più netta con l'aumento della distanza critica considerata.

#### 4.3.2 Analisi della struttura spaziale globale e locale della rinnovazione

Come detto in precedenza, l'analisi della struttura spaziale della rinnovazione viene effettuata per tutti gli anni di campionamento in cui questa è stata aggiunta, quindi per il 1994 e 2004 sul primo ettaro di superficie e per il 2008/2011, 2016 e 2021 sui 4 ettari attuali.

Per l'analisi della struttura a livello globale viene utilizzata la classe di distanza di 10 metri, l'unica che riesce a cogliere alcuni, seppur minimi, fenomeni di autocorrelazione. Il ridotto numero di piante in rapporto alla superficie molto elevata dell'area di studio, ha limitato in parte la riuscita di tale analisi.

Anche in questo caso si è quindi proceduto anche cumulando l'intera rinnovazione censita dal 1994 al 2021 e ripetendo l'analisi, impiegando però una classe di distanza pari a quella utilizzata per il popolamento totale.

Per quanto riguarda invece l'analisi locale sono state impiegate le distanze critiche di 15 e 20 metri.

Analisi globale della rinnovazione al 1994, 2004, 2008/2011, 2016 e 2021

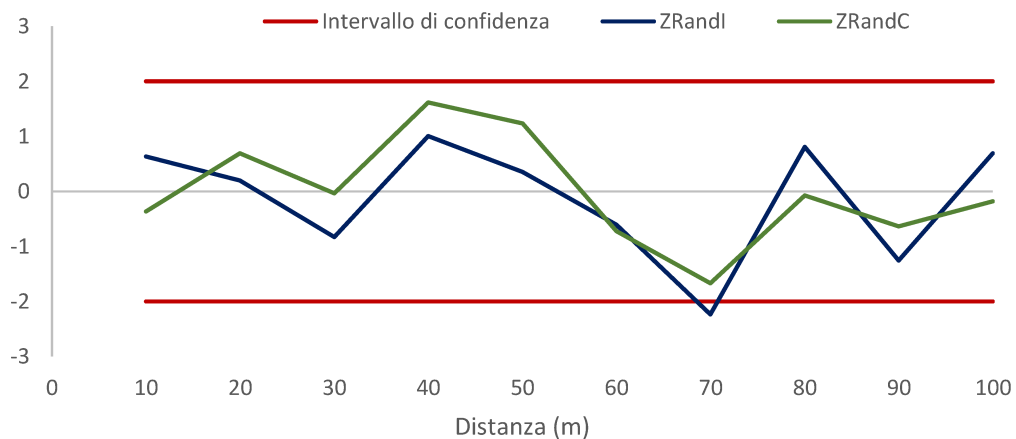


Figura 34 - Correlogramma calcolato con classe di distanza di 10 metri, per l'altezza della rinnovazione al 1994

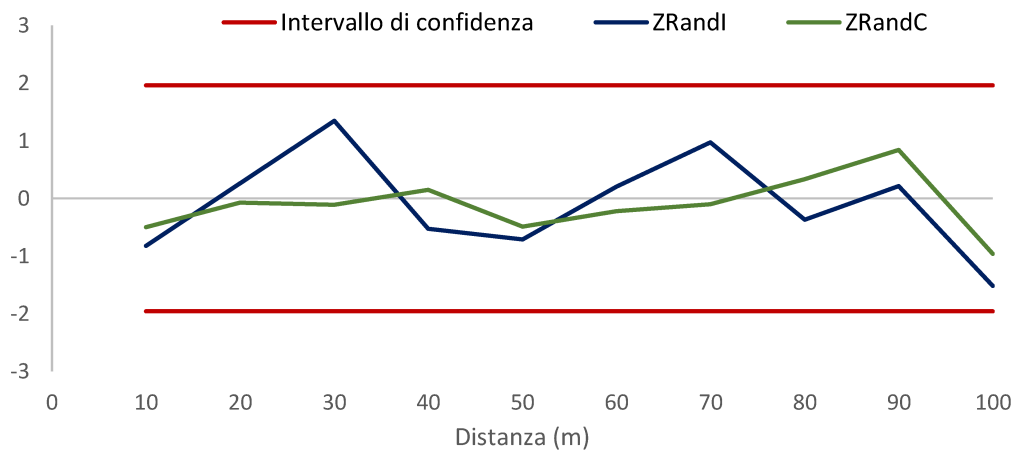


Figura 35 - Correlogramma calcolato con classe di distanza di 10 metri, per l'altezza della rinnovazione al 2004



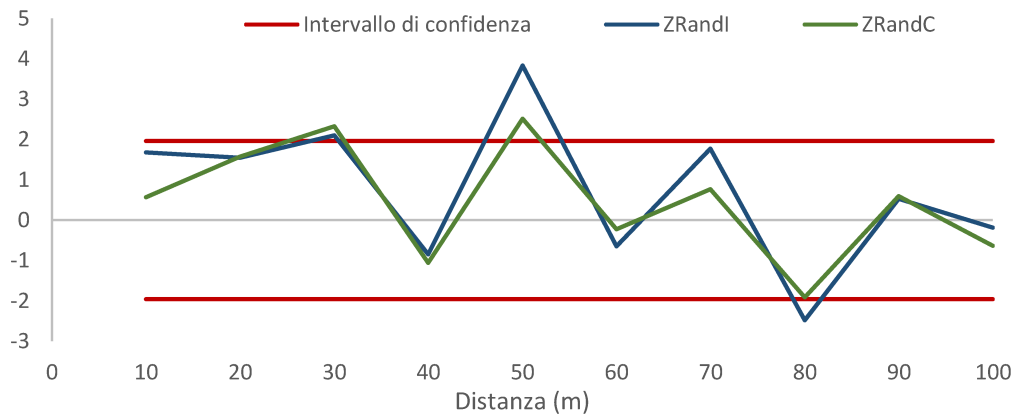


Figura 36 – Correlogramma calcolato con classe di distanza di 10 metri, per l'altezza della rinnovazione al 2008/2011

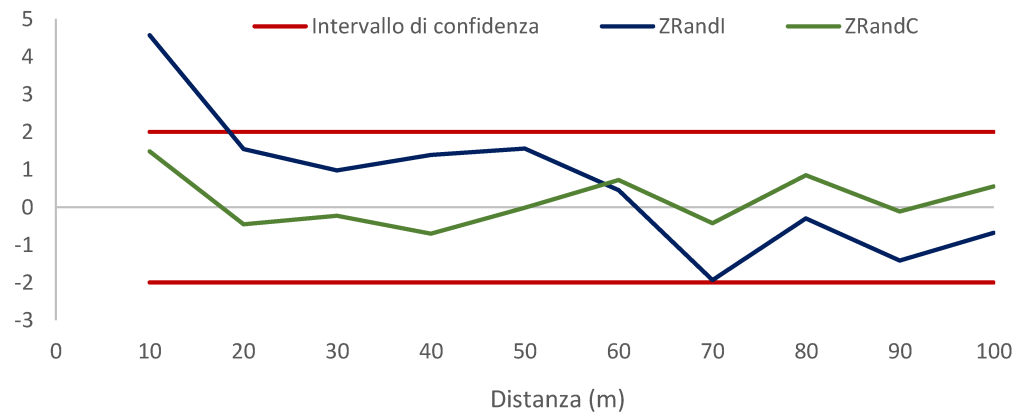


Figura 37 – Correlogramma calcolato con classe di distanza di 10 metri, per l'altezza della rinnovazione al 2016

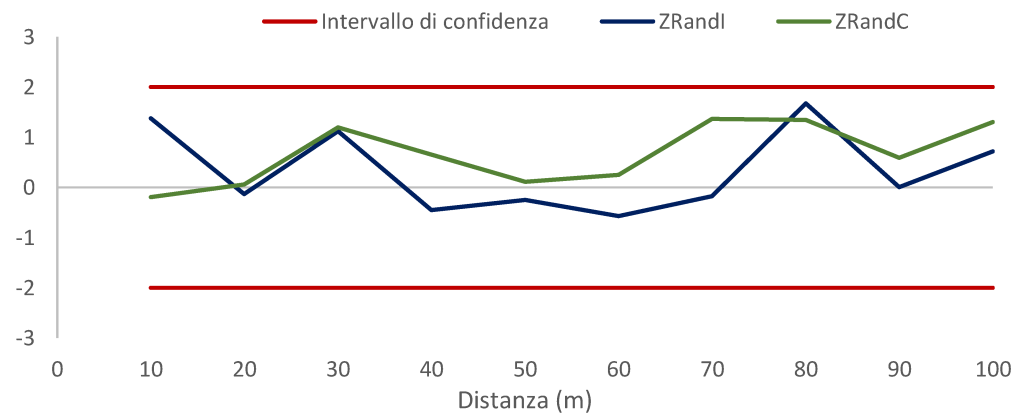


Figura 38 - Correlogramma calcolato con classe di distanza di 10 metri, per l'altezza della rinnovazione al 2021

Analisi locale della rinnovazione al 1994, 2004, 2008/2011, 2016 e 2021

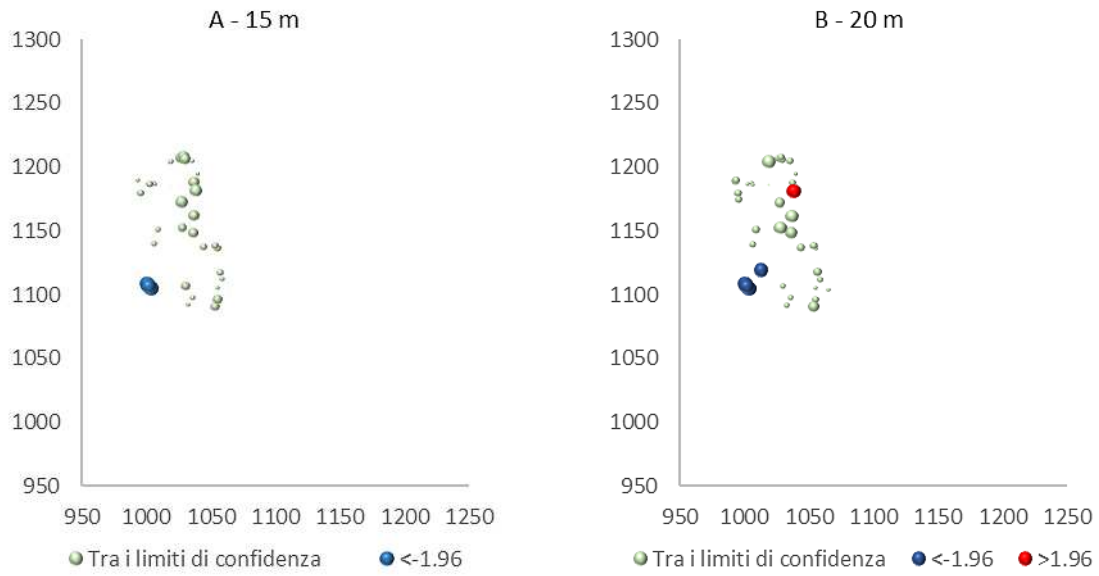


Figura 39 – Analisi locale della struttura della rinnovazione al 1994, per le distanze critiche di 15 metri (A), e 20 metri (B)

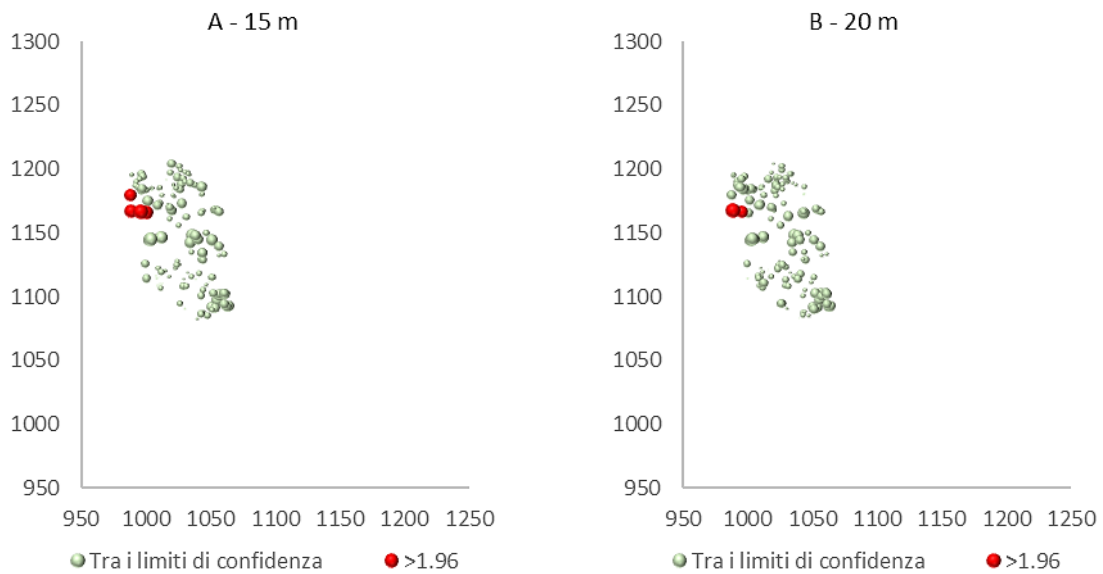


Figura 40 – Analisi locale della struttura della rinnovazione al 2004, per le distanze critiche di 15 metri (A), e 20 metri (B)

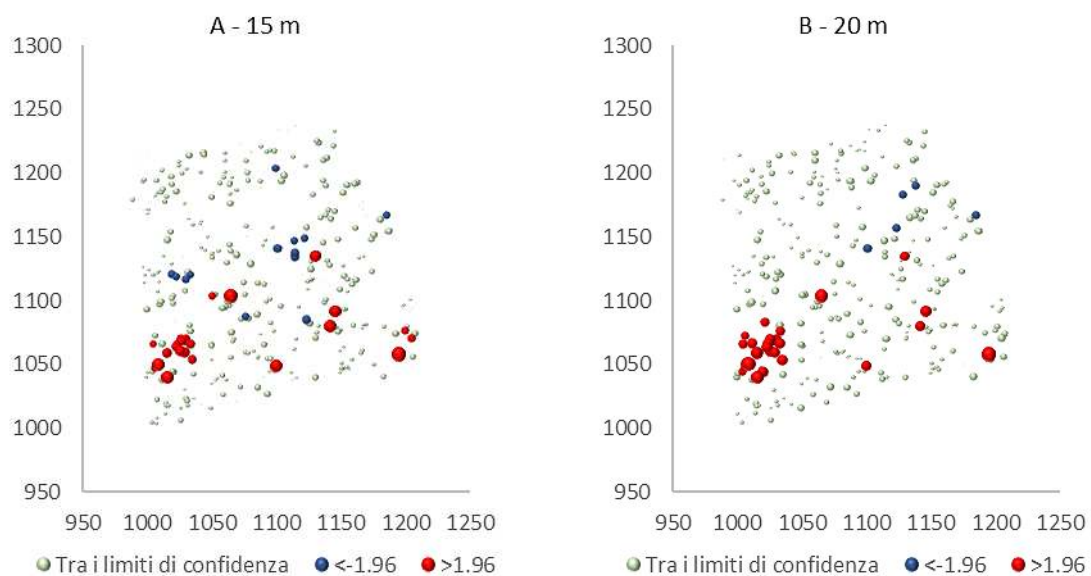


Figura 41 – Analisi locale della struttura della rinnovazione al 2008/2011, per le distanze critiche di 15 metri (A), e 20 metri (B)

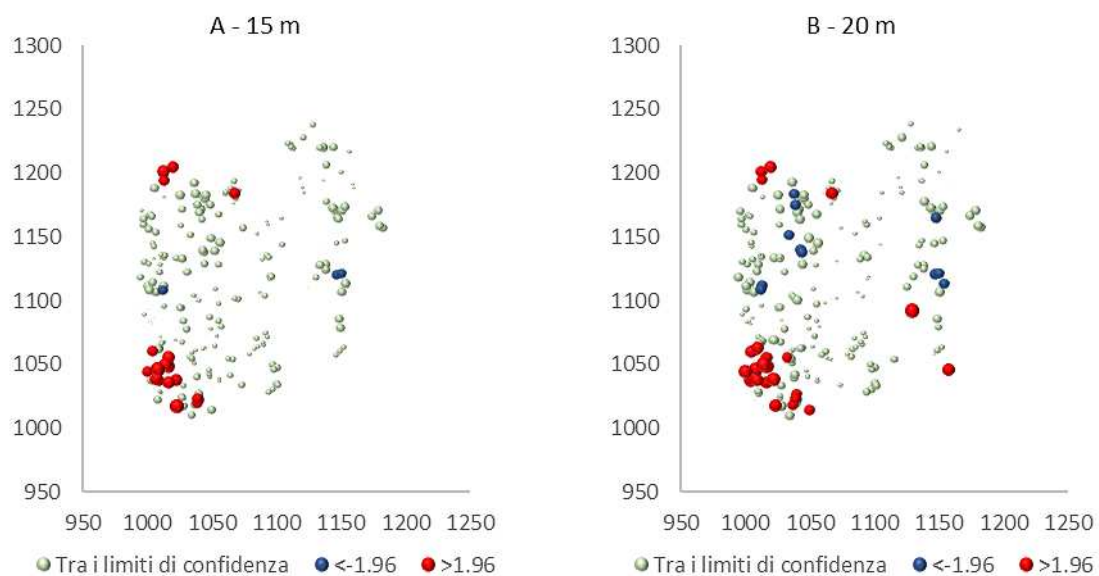


Figura 42 - Analisi locale della struttura della rinnovazione al 2016, per le distanze critiche di 15 metri (A), e 20 metri (B)

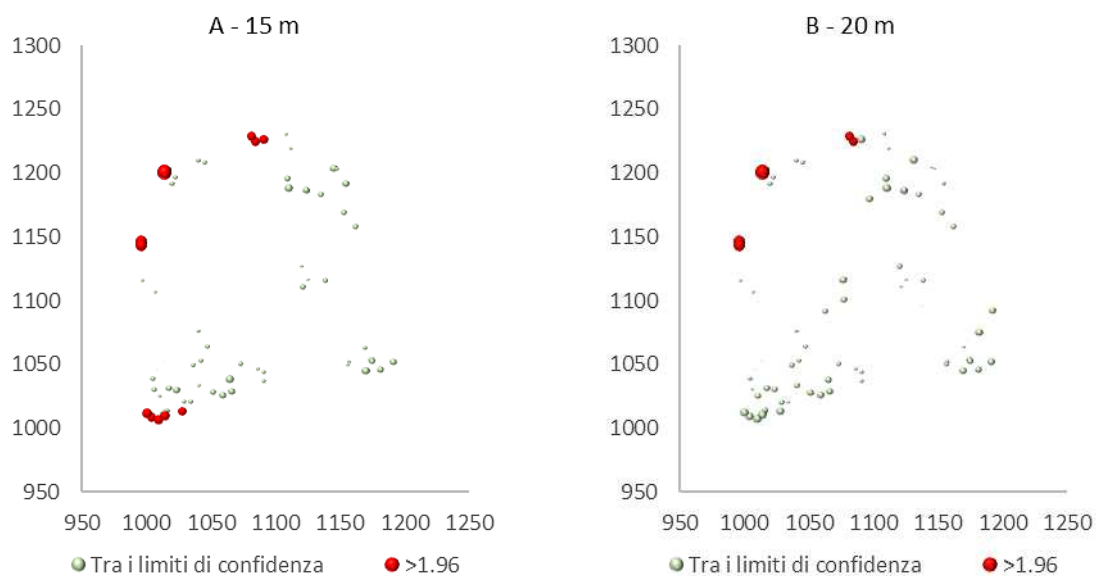


Figura 43 - Analisi locale della struttura spaziale della rinnovazione al 2021, per le distanze critiche di 15 metri (A), e 20 metri (B)

Dall'analisi della struttura spaziale globale, riferita all'altezza della rinnovazione, non risulta la presenza di particolari valori di autocorrelazione significativi. Unica eccezione si ha per l'anno 2016 (Fig. 37) in cui l'indice  $I$  di Moran restituisce autocorrelazione positiva, dalla breve distanza fino a circa 18 metri.

Osservando invece l'analisi della struttura spaziale locale, è possibile notare la presenza di due *cold-spot*, all'interno dell'area di 1 ettaro, nelle zone a quote più elevate, mentre vi è un *hot-spot* a quote inferiori (Fig. 39). Tale tendenza sparisce dall'anno 2004 (Fig. 40), quando si manifesta invece un *hot-spot* ad Ovest, cioè alle quote più elevate.

Osservando invece l'analisi effettuata per la superficie di 4 ettari, agli anni 2008/2011 e 2016 (Fig. 41 e 42), si può notare come a Sud-Ovest dell'area di studio, alle quote maggiori, vi sia la presenza di un *hot-spot* di grandi dimensioni, riscontrabile per entrambi i periodi considerati e per entrambe le distanze critiche. Sul resto della superficie si alternano piccoli *hot-spot* e *cold-spot* di minori dimensioni.

L'analisi locale effettuata per l'anno 2021 conferma nuovamente la presenza degli *hot-spot* alle quote maggiori (Fig. 43)

Confrontando l'analisi della struttura spaziale locale effettuata per il popolamento totale, con quella effettuata per la sola rinnovazione nei vari anni di campionamento, emerge che quest'ultima tende a strutturarsi, per quanto riguarda l'altezza, in modo opposto rispetto agli individui più sviluppati.

La rinnovazione dimostra infatti di presentare i valori più elevati di altezza nella fascia ad ovest, quindi alle quote maggiori, dove invece il soprassuolo adulto tende ad avere altezze minori.

### Analisi globale e locale della rinnovazione cumulata

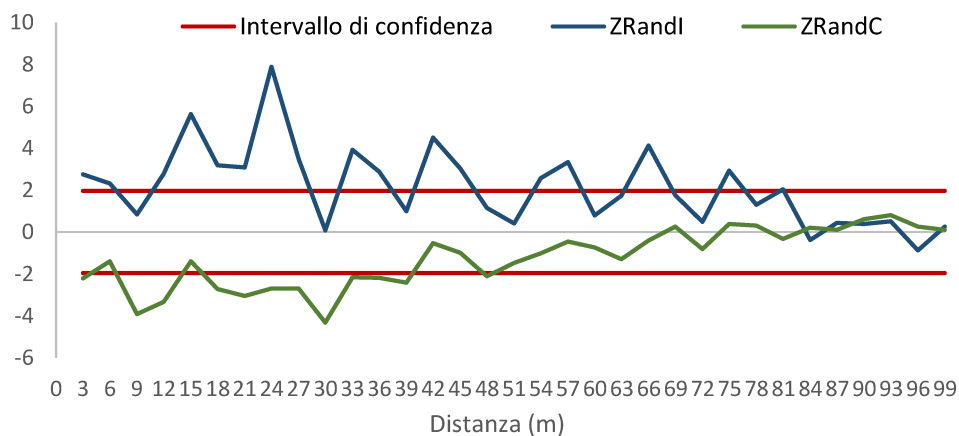


Figura 44 - Correlogramma calcolato con classe di distanza di 3 metri, per l'altezza della rinnovazione cumulata

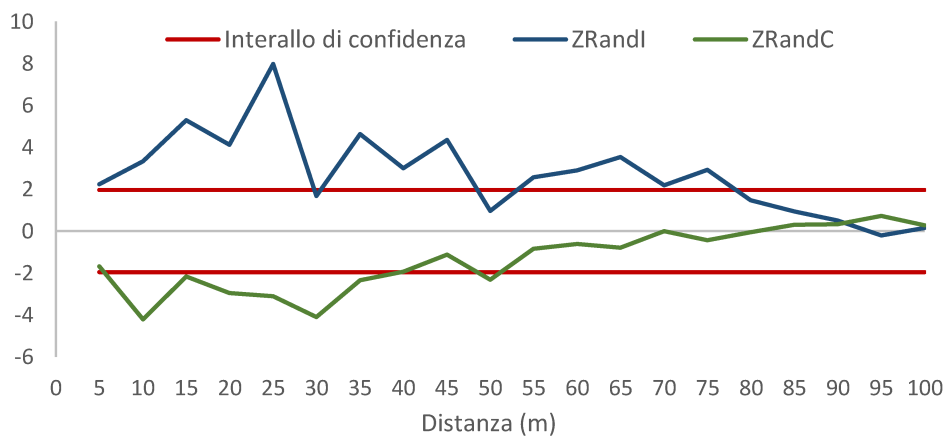


Figura 45 - Correlogramma calcolato con classe di distanza di 5 metri, per l'altezza della rinnovazione cumulata

I grafici riferiti all'analisi della struttura globale dell'intera rinnovazione aggiunta tra il 1994 e il 2021 (Fig. 44 e 45), evidenziano un andamento dell'autocorrelazione caratterizzato da picchi di autocorrelazione positiva (per l'indice *I*) cui si alternano picchi con valori nulli o negativi (per l'indice *c*). Ciò diviene particolarmente apprezzabile osservando il grafico relativo alla classe di distanza di 3 metri.

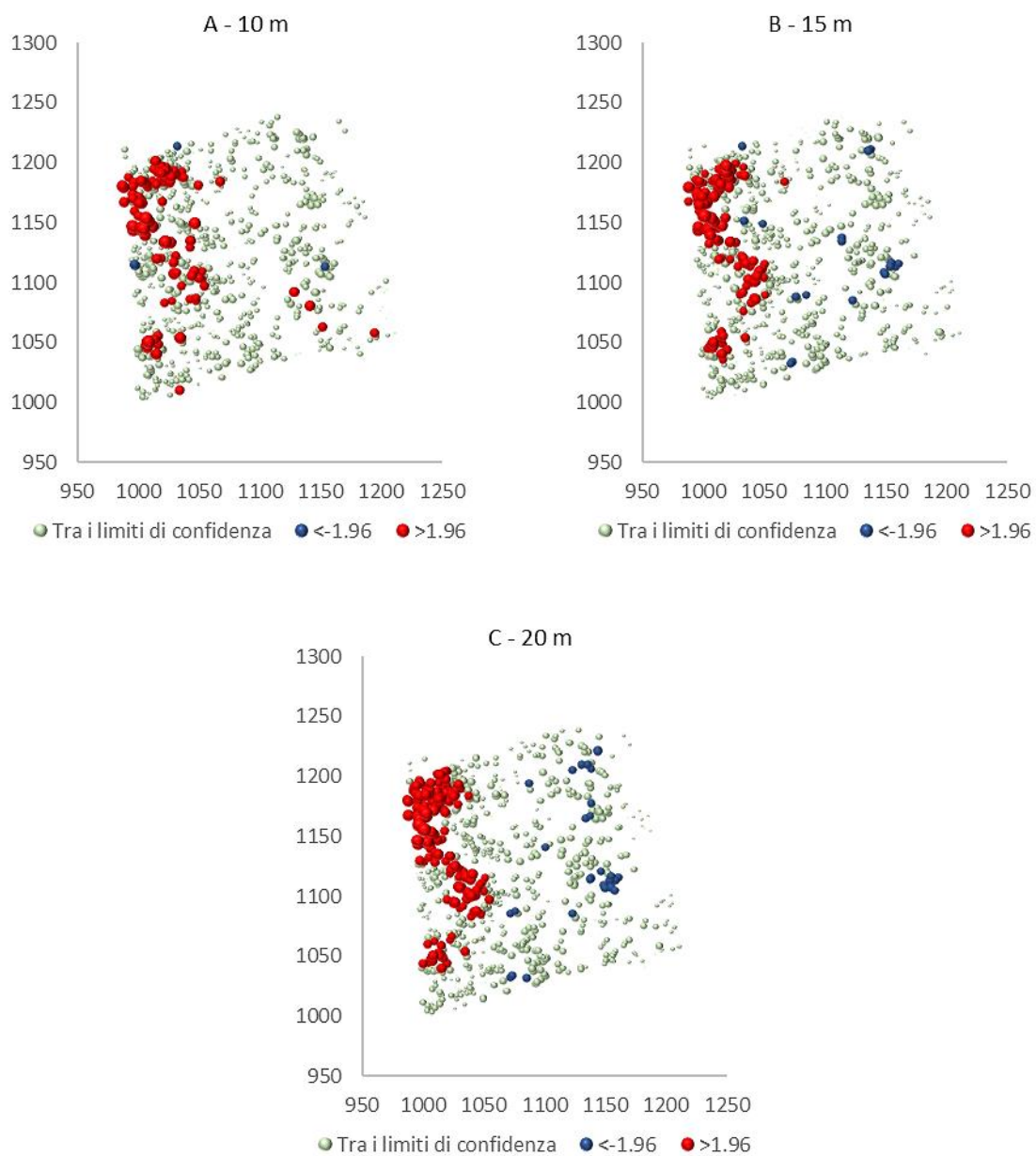


Figura 46 - Analisi locale della struttura della rinnovazione cumulata, per le distanze critiche di 10 metri (A), 15 metri (B), 20 metri (C)

I risultati dell'analisi della struttura spaziale, a livello locale, della rinnovazione aggiunta tra il 1994 e il 2021, avvalorano quanto emerso dalle analisi riferite ai singoli anni di campionamento.

Come emerge dai grafici (Fig. 46) è possibile nuovamente osservare la presenza di un *hot-spot* molto esteso, con piante generalmente più alte di quelle attorno, nella fascia

ovest dell'area di monitoraggio (a quote maggiori) e la presenza di alcuni *cold-spot*, di minori dimensioni, nella parte centrale e alle quote minori dell'area. In particolare, utilizzando la distanza critica di 20 metri, questo fenomeno appare in modo netto.

### 4.3.3 Analisi della struttura spaziale globale e locale del popolamento, con la variabile età

L'analisi globale e locale della struttura del popolamento, effettuata per la variabile biometrica "età", rende più chiara la comprensione dei fenomeni di autocorrelazione rilevati in precedenza per la variabile "altezza".

L'analisi viene svolta per l'intero popolamento, a livello globale, utilizzando le classi di distanza di 3 e 5 metri e a livello locale con le distanze critiche di 10, 15 e 20 metri.

#### Analisi globale

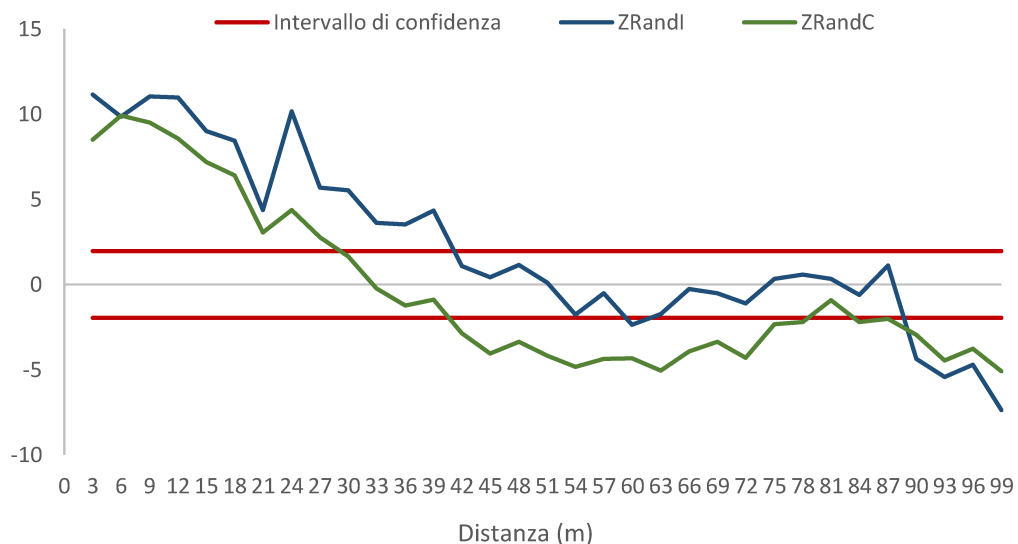


Figura 47 – Correlogramma calcolato con classe di distanza di 3 metri, per l'età dell'intero popolamento



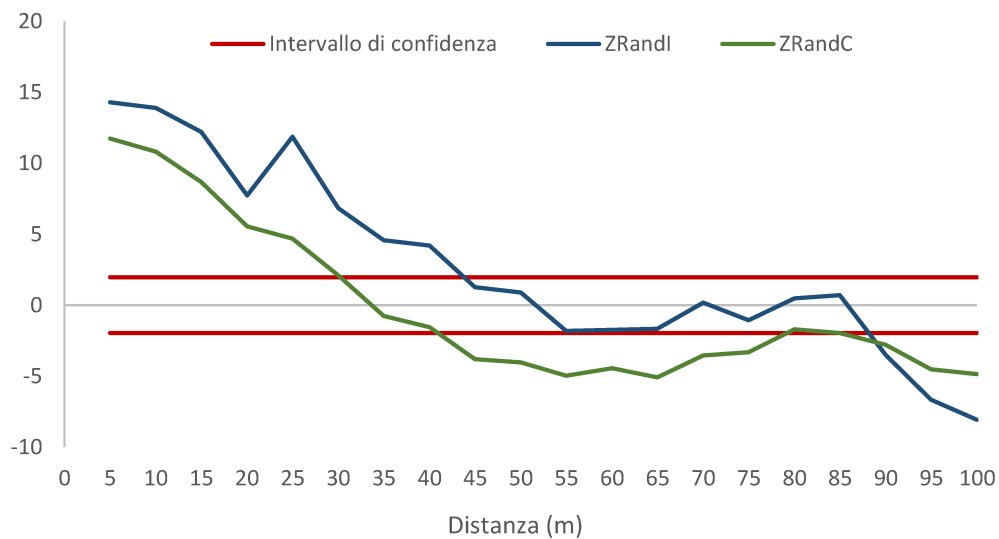


Figura 48 – Correlogramma calcolato con classe di distanza di 5 metri, per l'età dell'intero popolamento

L'andamento delle curve degli indici *I* e *c* (Fig. 47, 48), calcolati per la variabile biometrica "età", è paragonabile a quello rilevato per la variabile altezza. Anche in questo caso si hanno curve che seguono un gradiente negativo, con valori di autocorrelazione positivi alle distanze più prossime, valori nulli a distanze intermedie, cui segue una lunga fase con valori negativi, specie per l'indice *c*.

Come è stato rilevato per la variabile altezza, anche riguardo l'età, gli individui tendono a creare nuclei di piante con altezza simile a cui si contrappongono gruppi di piante con altezze molto differenti rispetto ai primi.

## Analisi locale

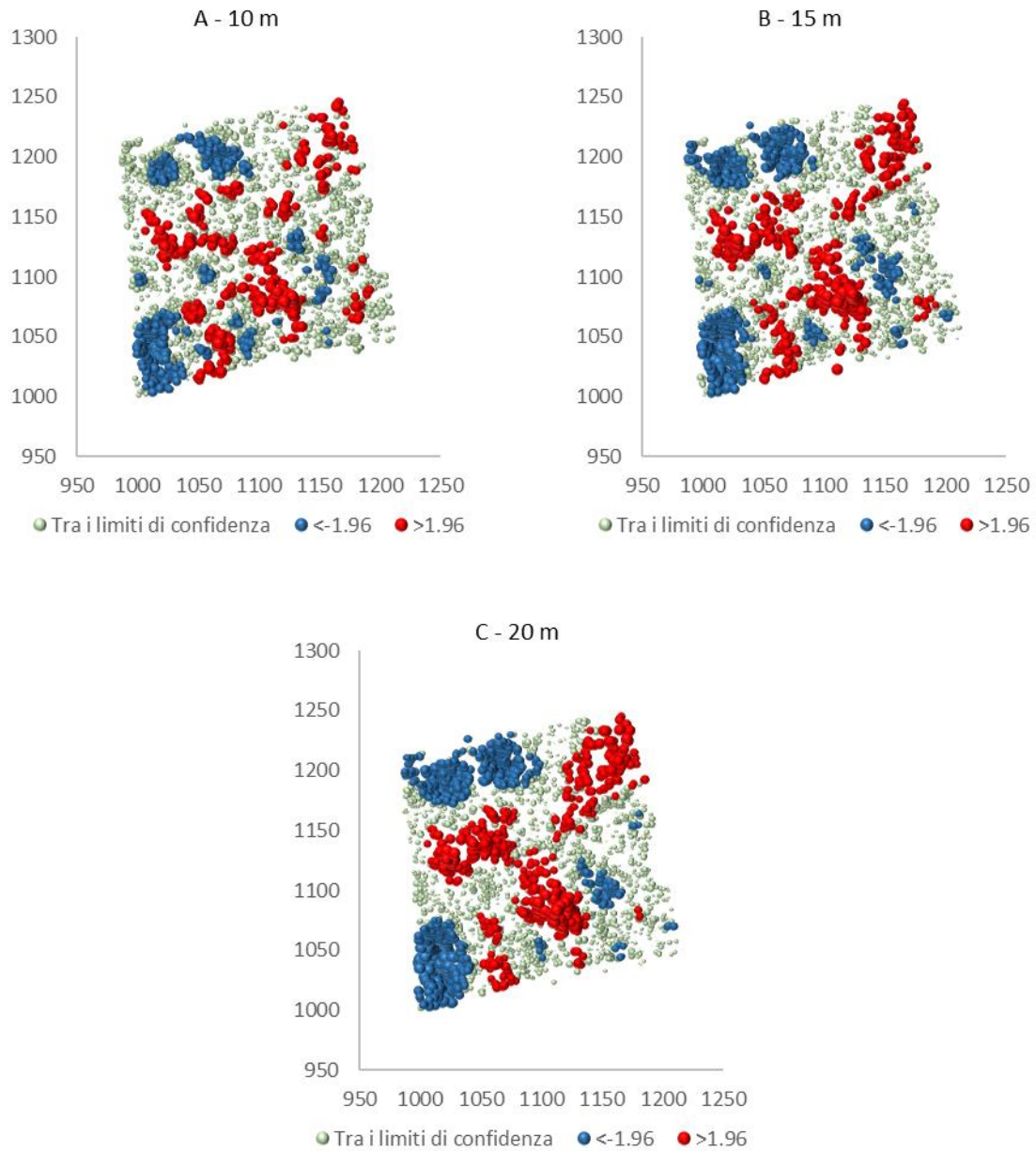


Figura 49 - Analisi locale della struttura dell'età dell'intero popolamento, per le distanze critiche di 10 metri (A), 15 metri (B), 20 metri (C)

La conferma di quanto esposto precedentemente la si ritrova nell'analisi locale. È infatti rilevabile dai grafici (Fig. 49) la presenza di nuclei con piante generalmente più giovani (*cold-spot*) e di grandi dimensioni a Sud-Ovest e a Nord-Ovest dell'area di studio e nuclei con piante mediamente più mature nella fascia centrale e a Nord-Est.

Altri *cold-spot*, di minori dimensioni, li si ritrova sparsi all'interno dell'area. Questo fenomeno appare evidente per tutte le distanze critiche ma in particolare per i 20 metri.

Comparando però il grafico dell'analisi a livello locale riferito all'altezza con quello riferito all'età è possibile notare alcune incongruenze, nonostante l'elevata correlazione tra le due variabili.

Per il confronto viene utilizzato il grafico riferito alla classe di distanza di 15 metri.

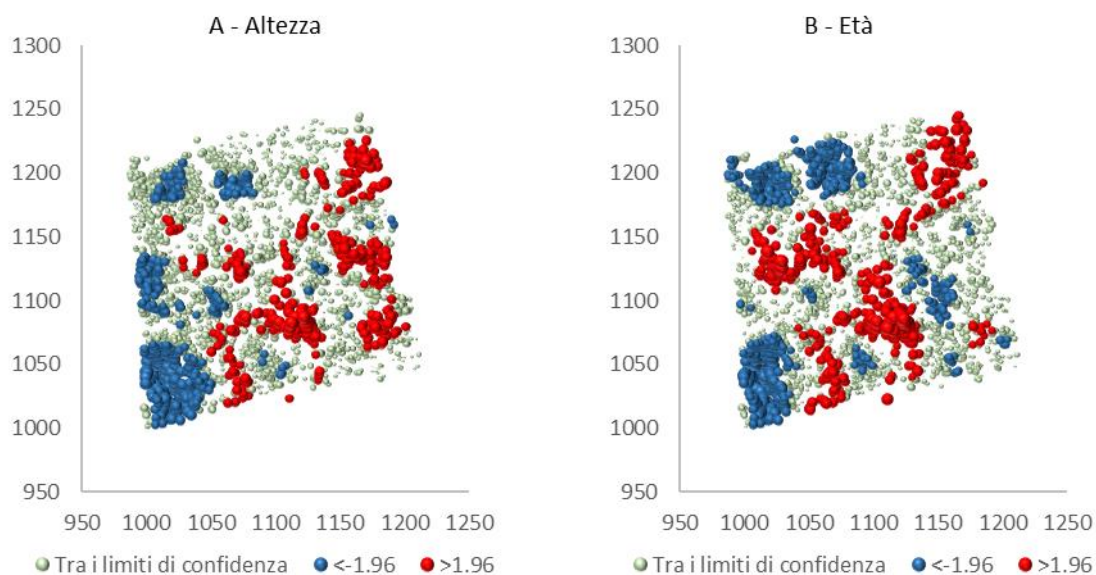


Figura 50 – confronto tra l'analisi della struttura spaziale locale dell'intero popolamento, effettuata con la variabile altezza (A) e con la variabile età (B)

Le incongruenze principali che è possibile osservare sono due: il grande *cold-spot* di piante generalmente più basse di quelle attorno, presente nella parte centrale ad Ovest dell'area di monitoraggio, cui non corrisponde un *cold-spot* per la variabile età e il grande *hot-spot* con piante generalmente più alte, collocato nella parte centrale ad Est del plot, cui non corrisponde un *hot-spot* con piante più mature.

Ciò indica che ad ovest, alle quote maggiori, vi è un consistente gruppo di piante particolarmente basse ma di età simile o superiore rispetto a quelle attorno e che ad est, alle quote minori, vi è un grande nucleo di piante particolarmente alte di età simile a quelle più prossime.

## 5. DISCUSSIONE

### Analisi strutturale

Da questo studio si è potuto rilevare e confermare, innanzi tutto, come il popolamento in esame, nonostante la relativa stabilità del soprassuolo, stia attraversando una dinamica fase evolutiva che vede un continuo aumento della quota di pino cembro e, in misura minore, di abete rosso a discapito del larice.

Osservando, infatti, la distribuzione delle specie nelle classi d'età, è possibile apprezzare come il numero di individui di pino cembro sia nel tempo cresciuto e che, nonostante vi siano quasi due secoli tra le età massime censite rispetto a quelle del larice, attualmente rappresenti quasi il 40% degli individui totali. La quota di individui di pino cembro è particolarmente alta nelle classi d'età inferiori, soprattutto entro gli 80 anni. Tendenza che si conferma anche analizzando la rinnovazione censita in tempi più recenti (1994 – 2021).

Il pino cembro dimostrerebbe quindi, almeno negli ultimi decenni, di essere favorito rispetto al larice e ciò potrebbe essere dovuto alla sua maggiore tolleranza all'ombra e al maggiore successo germinativo dovuto alla modalità di disseminazione zoocora portata avanti dalla nocciolaia (*Nucifraga caryocatactes* L.) (Fig. 51), uccello passeriforme della famiglia dei corvidi. Questa, infatti, a partire dal mese di settembre, estrae i semi dagli strobili e li occulta in piccoli gruppi in nascondigli nel terreno per farne delle riserve alimentari (Gellini and Grossoni, 2014). Tali nascondigli solitamente coincidono con zone dove la neve si scioglie più precocemente (Crocq, 1990) e così facendo, assicurerebbe ai semi condizioni di germinazione e sviluppo ideali.



Figura 51 - Nocchiolaia (*Nucifraga caryocatactes* L.)

Dall'altra parte, la rinnovazione di larice, si troverebbe svantaggiata dalla copertura del soprassuolo che, interferendo sulla dispersione anemofila del seme ma soprattutto sulla disponibilità radiativa, ne limiterebbe l'insediamento (Soraru and Carrer, 2007).

La fase di transizione in cui si trova il popolamento è però rallentata da alcuni fenomeni di disturbo che limitano la diffusione del pino cembro a favore del larice e che permetterebbero la convivenza delle due specie per lungo tempo.

Analizzando, infatti, come la mortalità si distribuisce tra le giovani piante, è stata rilevata una particolare suscettibilità del pino cembro nelle prime fasi di sviluppo alla presenza di muffe della neve, tra cui *Phacidium infestans*. I rilievi effettuati durante la fase di campionamento hanno infatti registrato un elevato numero di individui giovani portati a morte, deperenti o nelle prime fasi di infezione fungina.

A differenza del pino cembro, il larice, anche se in condizioni di prolungata copertura nevosa, non è suscettibile a questo tipo di attacchi di micopatogeni (Holtmeier, 1995).

Un discorso diverso riguarda l'abete rosso. Tra le specie analizzate è quella entrata nel popolamento in tempi più recenti: nonostante l'età massima registrata sia di 380 anni, la specie ha iniziato a insediarsi con maggiore regolarità solo un secolo più tardi, senza però dimostrare incrementi in abbondanza paragonabili a quelli del pino cembro.

Attualmente l'abete rosso rappresenta solo il 6% degli individui totali. Nonostante ciò, è interessante notare come la rinnovazione di questa specie faccia registrare i valori più elevati di altezza media, ma soprattutto di diametro medio. Valori ben superiori rispetto quelli riferiti alla rinnovazione delle altre due conifere. Ciò confermerebbe le note caratteristiche di specie plastica, capace di adattarsi alla micromorfologia dell'area, esprimendo al meglio le sue potenzialità nelle situazioni favorevoli (Antos and Parish, 2002). Le caratteristiche del suolo dell'area indagata risultano, inoltre, particolarmente favorevoli per lo sviluppo di questa specie, che ritrova il proprio optimum proprio nei suoli di tipo rendzina (Gellini and Grossoni, 2014).

Oltre alla presenza di microstazioni particolarmente favorevoli, ciò che realmente starebbe determinando a queste quote un significativo aumento di competitività in questa specie, lo si potrebbe ricondurre nelle modificazioni climatiche in corso in misura significativa ormai da diversi decenni.

L'abete rosso, tipica specie della fascia subalpina, risultava un tempo fortemente limitato verso le aree di *timberline*, spingendosi tendenzialmente non oltre i 2.000 metri (Gellini and Grossoni, 2014). Attualmente, con l'innalzamento dei limiti del bosco, dovuto alle modificazioni climatiche, tale specie risulta meno limitata ed è quindi in grado di esprimere con maggior vigore tutto il suo potenziale competitivo anche a quote maggiori. Considerando, infatti, per la regione alpina un incremento nelle temperature di circa 1.5°C nell'ultimo secolo, noi staremmo oggi sperimentando uno spostamento delle isoterme di oltre 200 metri di quota. Considerando l'area di monitoraggio qui analizzata, dai limiti superiori del bosco dove climaticamente era collocata un tempo, ci si troverebbe ora in condizioni climatiche molto più prossime alla fascia superiore subalpina, dominata appunto dall'abete rosso.

### Analisi della distribuzione spaziale

Dall'analisi della distribuzione spaziale degli individui del popolamento emerge, innanzi tutto, un fenomeno di aggregazione intraspecifica, nella breve distanza, degli individui più sviluppati di larice e pino cembro.

I fenomeni di aggregazione mostrati da queste specie potrebbero risalire al momento in cui queste si sono insediate e quindi dipendere dalle modalità di disseminazione, affidata alla nocciolaia per il pino cembro e di tipo anemofila per il larice. Quest'ultimo, inoltre, particolarmente sfavorito dalla copertura di arbusti e cotico erboso, tenderebbe a formare nuclei nelle poche zone in cui la copertura del suolo è più rada e il seme riesce a toccare il terreno (Soraruuf and Carrer, 2007). La conferma la si avrebbe osservando la distribuzione della rinnovazione attuale sia di pino cembro, che di larice, le quali, ancora una volta, dimostrano di aggregarsi a livello intraspecifico, quindi tra individui della stessa specie.



*Figura 52 - Denso tappeto di rododendro*

L'abete rosso, al contrario, dimostrando repulsione, se si considerano gli individui maturi di questa specie, o casualità di distribuzione per la rinnovazione, denoterebbe un tipo di colonizzazione legata a particolari nicchie favorevoli, anche lontane tra loro e sparse

all'interno dell'area di studio, caratterizzate da disponibilità di luce e condizioni stagionali ottimali.

Per quanto riguarda invece i rapporti spaziali che intercorrono tra le piante in rinnovazione e gli individui adulti, sono emersi differenti pattern di distribuzione a livello intra e interspecifico.

La rinnovazione di larice dimostra aggregazione molto marcata, dalla breve alla lunga distanza, per gli individui più sviluppati della stessa specie, mentre dimostra segregazione dalla breve alla lunga distanza nei confronti degli individui più sviluppati di pino cembro e abete rosso. Questo fenomeno indicherebbe che il larice, trovandosi coperto dal soprassuolo, riuscirebbe a rinnovarsi principalmente al di sotto di individui della stessa specie. Il larice, essendo specie esigente in termini di radiazione luminosa (Gellini and Grossoni, 2014), potrebbe risentire della copertura esercitata dalle chiome particolarmente dense di abete rosso e pino cembro, mentre potrebbe avvantaggiarsi dalla copertura più rada di piante della stessa specie. L'ombreggiamento al suolo determinato dal piano superiore del bosco, insieme alla presenza di vasti nuclei di specie erbacee ed arbustive che coprono le chiare e che rendono difficile l'arrivo dei semi leggeri al suolo, risulterebbero essere i principali fattori limitanti per il larice.

Le piante più sviluppate sembrano non interferire con la rinnovazione di pino cembro unicamente entro i primissimi metri. A distanze maggiori le giovani piante dimostrano una forte repulsione. Questo fenomeno potrebbe essere dovuto al fatto che, nell'immediato intorno della pianta adulta, lo scioglimento della neve è più rapido rispetto alle zone circostanti dove questa rimane più a lungo. La nocciolaia potrebbe quindi utilizzare la base dei fusti tra i nascondigli preferenziali in cui collocare i semi di pino cembro. La discreta tolleranza l'ombra di questa specie potrebbe quindi permettergli di germinare in un ambiente parzialmente ombreggiato.

La diversità di ambienti in cui le due specie riescono a rinnovare viene evidenziata anche dalla segregazione emersa dall'analisi spaziale bivariata condotta per la rinnovazione di larice e pino cembro.



Anche la rinnovazione di abete rosso dimostra di non gradire la presenza del soprassuolo adulto, in particolare gli individui di pino cembro e lo stesso abete rosso. Le piante più mature di larice non sembrano invece esercitare particolari interferenze nella prime fasi di vita di questa specie. Anche in questo caso, quindi, l'esigenza di luce appare il principale fattore limitante lo sviluppo della rinnovazione.



*Figura 53 - Rinnovazione di larice e pino cembro in un gap nel soprassuolo*

Per quanto riguarda l'analisi spaziale della distribuzione delle piante morte dell'intero soprassuolo, non si notano particolari fenomeni a livello intraspecifico, solo lieve aggregazione entro la brevissima distanza per pino cembro e larice. Nel caso del pino cembro, questo potrebbe indicare la presenza di piccoli focolai dove piante che si trovano vicine vengono infettate e portate a morte. Tale fenomeno non risulterebbe ancora così preponderante da determinare la morte di estesi nuclei di individui.

Nel caso del larice, che vede come principale causa di mortalità la rottura di branche e fusto indotta dalla neve, il fenomeno aggregativo tra piante morte potrebbe indicare la presenza di aree soggette a piccole slavine o elevato accumulo nevoso. Data l'aggregazione intraspecifica e la numerosità evidenziata dalle piante di larice, è

probabile che, in caso di piccoli disturbi di tipo abiotico, più piante di questa specie vengano colpite simultaneamente (Fig. 54).



*Figura 54 - Nucleo di piante di larice atterrate dalla copertura nevosa*

Osservando invece la distribuzione della rinnovazione nei confronti delle piante morte, è possibile osservare fenomeni di minima aggregazione, entro il primo metro di distanza, per quanto riguarda pino cembro e larice. Con la morte di un individuo, in particolare se di grandi dimensioni, e la conseguente apertura di un *gap* nel soprassuolo, si ha una modificazione delle condizioni ambientali locali con, soprattutto, incremento di energia luminosa e quindi di calore al suolo. Questo potrebbe creare condizioni favorevoli per l'insediamento della rinnovazione e spiegare i minimi fenomeni aggregativi.

Oltre il fenomeno aggregativo entro la brevissima distanza, la rinnovazione di pino cembro dimostra anche forte segregazione, fino a distanze considerevoli, verso le piante morte. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che, come detto in precedenza, la nocciolaia predilige come aree per l'occultamento delle riserve di semi le zone dove la neve si scioglie precocemente. Le chiarie che si aprono con la morte di un individuo adulto risulterebbero invece zone preferenziali di accumulo e persistenza del manto nevoso.

### Analisi della struttura spaziale

Dall'analisi della struttura spaziale emerge la presenza di due grandi nuclei di piante di altezze mediamente più basse in tutta la parte Ovest dell'area a quote più elevate. Scendendo di quota, nella parte centrale e ad est, si ritrovano invece cluster dove si aggregano piante con altezze maggiori. Tale fenomeno viene confermato anche dall'analisi dell'autocorrelazione effettuata per la variabile età.

La presenza del grande nucleo di piante di dimensioni mediamente più ridotte a nord-ovest sarebbe da ricondurre a fenomeni di disturbo particolarmente significativi avvenuti in tempi passati. Da studi effettuati sulla superficie originaria di 1 ettaro (Carrer and Urbinati, 2001), è emerso infatti che circa due secoli fa la parte nord del plot venne interessata da un importante disturbo che causò la rimozione del soprassuolo adulto, aprendo la strada alla rinnovazione di larice. Il grande gruppo di piante di altezze mediamente inferiori presente in quella zona sarebbe quindi da ricondurre a tale evento con la conseguente rinnovazione che negli anni si è sviluppata mantenendo però dimensioni ancora inferiori rispetto agli individui circostanti.

Osservando le caratteristiche della fascia Sud-Ovest, dove è presente il secondo grande nucleo di piante mediamente più basse, è possibile ipotizzare che anche questa zona possa essere stata interessata da un evento di disturbo di pari entità, che ha favorito l'insediarsi di un grande nucleo di rinnovazione. Il piano dominante del popolamento, in quest'area, risulta particolarmente rado, mentre vi è un'elevata presenza di individui nel piano dominato. Tale zona, inoltre, è interessata da continui fenomeni di frana, rotolamento di massi e slavine, provenienti dalla piattaforma rocciosa soprastante, che possono arrecare danni alle piante collocate a valle, talvolta portandole a morte e contribuendo a mantenere il soprassuolo più rado, mantenendo quindi la formazione in uno stadio giovane e favorendo la rinnovazione.

Quanto esposto trova conferma analizzando anche la struttura spaziale riferita all'età del popolamento. Le piante con età inferiori si raggruppano principalmente nelle zone dove le altezze sono minori e viceversa.

Le anomalie rilevate confrontando i grafici di altezza ed età del soprassuolo adulto, cioè la presenza di *hot-spot* di altezza a quote inferiori, a cui non corrispondono *hot-spot* di età e il *cold-spot* di altezza alle quote maggiori, a cui non corrisponde un *cold-spot* di età, si possono interpretare considerando le caratteristiche stazionali di tali zone.

La fascia dove si raggruppano le piante mediamente più basse risulta infatti essere quella a quote più elevate, a circa 2.100 metri. In questa zona, inoltre, il suolo è caratterizzato da una maggiore matrice ghiaiosa, è più scoperto e soggetto a erosione. La differenza di quota, che determina una differenza di temperatura media, e le caratteristiche del suolo, possono avere in parte limitato lo sviluppo degli individui lì vegetanti. Nella parte più bassa, dove le condizioni stazionali sono meno limitanti, si assiste infatti al fenomeno opposto.

Per quanto riguarda l'analisi della struttura spaziale riferita alla rinnovazione, è possibile notare una tendenza opposta rispetto a quella osservata per gli individui più sviluppati del soprassuolo. Questa, infatti, dimostra valori più elevati di altezza esattamente in quelle aree dove le piante adulte presentano le altezze inferiori e viceversa.

Le piante in rinnovazione con altezze maggiori si concentrano nella fascia ad ovest, dove la copertura del soprassuolo adulto è più rada. Nonostante le condizioni climatiche e stazionali più limitanti, l'arrivo di una maggiore quantità di energia avvantaggerebbe la rinnovazione creando un ambiente leggermente meno limitante. Questo, inoltre, risulterebbe essere un'ulteriore conferma delle forti esigenze radiative, da parte della rinnovazione di molte specie, per il loro sviluppo.



*Figura 55 - Abbondante rinnovazione nella fascia sud-ovest dell'area di monitoraggio*

## 6. CONCLUSIONI

Dallo studio condotto nell'area di monitoraggio permanente di Croda da Lago, si è potuto dimostrare come, nonostante l'età cronologica avanzata del soprassuolo e nonostante l'assenza di pressione antropica, che generalmente caratterizza i popolamenti alpini, il larici-cembreto in esame non abbia ancora raggiunto uno stato di equilibrio, quindi di stabilità rispetto alle condizioni ambientali esterne, ma si trovi tuttora in una chiara fase dinamica.

Le principali determinanti delle fluttuazioni del popolamento sono risultate essere i disturbi, specie su piccola scala, e più recentemente i cambiamenti climatici, che, nel lungo periodo, tenderebbero a favorire pino cembro e abete rosso.

Eventi di disturbo pregressi, o recenti, hanno determinato e possono tuttora determinare la distruzione parziale del soprassuolo adulto e l'ingresso di nuclei di rinnovazione permettendo il ricambio generazionale.

I cambiamenti climatici, invece, tenderebbero a favorire determinate specie come l'abete rosso che, grazie alle attuali condizioni sempre meno limitanti, in particolare per quanto riguarda l'aspetto termico, spingendosi verso quote superiori sta registrando un aumento della propria quota di presenza all'interno del popolamento.

L'aumentare delle temperature, le nevicate meno abbondanti e lo scioglimento precoce della neve potrebbero inoltre diminuire la pressione esercitata dalle muffe della neve a carico delle giovani piante di pino cembro. Queste potrebbero in futuro godere di migliori condizioni vegetative, determinando, nel lungo periodo, un cambio di dominanza a favore di questa specie sul larice. La pineta di pino cembro, con presenza di abete rosso, sarebbe infatti lo stadio più avanzato di evoluzione del larici-cembreto, in assenza di disturbi (Gellini and Grossoni, 2014).

La rinnovazione di tutte le specie è risultata essere particolarmente influenzata da fattori come disponibilità luminosa, modalità di disseminazione e condizioni stazionali, fattori che determinano i pattern distributivi riscontrabili all'interno della formazione. La disponibilità di luce, in particolare, è risultata essere fondamentale per tutte le specie

che tendono a evitare la copertura e insediarsi con più abbondanza e con tassi di accrescimento più elevati nelle aree più rade.

Infine, si è registrata una significativa incidenza nella mortalità indotta dalle muffe della neve. Queste risultano essere tra le prime cause di morte per le giovani piante di pino cembro.

Il larici-cembreto di *timberline* di Croda da Lago appare quindi diretto verso una fase evolutiva più avanzata e di maggiore stabilità che vedrebbe una dominanza di pino cembro sul larice ed una sempre maggiore presenza di abete rosso. I cambiamenti climatici potrebbero contribuire nell'accelerare questa transizione ma l'azione dei disturbi, specialmente di natura abiotica, potrebbe incidere in tale dinamismo interrompendo parzialmente la successione e favorendo l'ingresso di rinnovazione di larice, tipica specie che si insedia in abbondanza nelle condizioni di post-disturbo (Gellini and Grossoni, 2014).

In conclusione, lo studio del soprassuolo dal punto di vista strutturale, unito all'analisi di tipo spaziale, ha permesso di comprendere: i) come è strutturato il popolamento dal punto di vista dimensionale; ii) quali interazioni vi sono tra le specie e tra gli individui adulti e la rinnovazione; iii) di verificare l'impatto che i disturbi di natura biotica e abiotica hanno avuto, o stanno avendo tuttora, sull'evoluzione del popolamento in esame; e, infine, iv) di verificare in che fase evolutiva si trova il larici-cembreto di *timberline* di Croda da Lago e quali potrebbero essere le prospettive future.

Ciò evidenzia l'importanza di proseguire con i monitoraggi periodici per meglio comprendere gli sviluppi futuri e ottenere un quadro più esaustivo, specialmente in funzione dei cambiamenti climatici e dei disturbi sempre più frequenti e su scala sempre maggiore che interessano le foreste europee (Seidl et al., 2014).

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Anfodillo, T., 2007. Cambiamenti climatici e dinamica di popolazione al limite superiore del bosco: importanza delle ricerche di lungo termine. *Forest@* 4, 3–5.
- Anselin, L., 1995. Local Indicators of Spatial Association-LISA. *Geographical Analysis* 27, 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Antos, J.A., Parish, R., 2002. Dynamics of an old-growth, fire-initiated, subalpine forest in southern interior British Columbia: tree size, age, and spatial structure. *Canadian Journal of Research* 32, 1935–1946. <https://doi.org/10.1139/x02-116>
- Barbeito, I., Brücker, R.L., Rixen, C., Bebi, P., 2013. Snow Fungi—Induced Mortality of *Pinus cembra* at the Alpine Treeline: Evidence from Plantations. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 45, 455–470. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-45.4.455>
- Berretti, R., Caffo, L., Camerano, P., De Ferrari, F., Domaine, A., Dotta, A., Gottero, F., Haudemand, J.-C., Letey, C., Meloni, F., Motta, R., Terzuolo, P.G., 2006. *Selvicoltura nelle foreste di protezione: esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e Valle d’Aosta*. Compagnia delle foreste, Arezzo.
- Besag, J., Diggle, P.J., 1977. Simple Monte Carlo Tests for Spatial Pattern. *Applied Statistics* 26, 327. <https://doi.org/10.2307/2346974>
- Bolli, J., Rigling, A., Bugmann, H., 2007. The influence of changes in climate and land-use on regeneration dynamics of Norway spruce at the treeline in the Swiss Alps. *Silva Fenn.* 41. <https://doi.org/10.14214/sf.307>
- Carrer, M., 1997. *Analisi dendroecologica e della struttura spaziale in una cenosi forestale del limite superiore nelle Alpi orientali (Ph.D. Dissertation)*. Università degli studi di Padova.
- Carrer, M., Soraruf, L., Lingua, E., 2013. Convergent space–time tree regeneration patterns along an elevation gradient at high altitude in the Alps. *Forest Ecology and Management* 304, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.04.025>



- Carrer, M., Urbinati, C., 2001. Spatial analysis of structural and tree-ring related parameters in a timberline forest in the Italian Alps. *Journal of Vegetation Science* 12, 643–652. <https://doi.org/10.2307/3236904>
- Crocq, C., 1990. *Le Casse-noix moucheté (Nucifraga caryocatactes)*. Lechevalier - R. Chabaud, France.
- Del Favero, R., 2000. Biodiversità e indicatori nei tipi forestali del Veneto.
- Dray, S., Pélissier, R., Couteron, P., Fortin, M.-J., Legendre, P., Peres-Neto, P.R., Bellier, E., Bivand, R., Blanchet, F.G., De Cáceres, M., Dufour, A.-B., Heegaard, E., Jombart, T., Munoz, F., Oksanen, J., Thioulouse, J., Wagner, H.H., 2012. Community ecology in the age of multivariate multiscale spatial analysis. *Ecological Monographs* 82, 257–275. <https://doi.org/10.1890/11-1183.1>
- FAO, 2010. *Global Forest Resources Assessment 2010* (No. 0258–6150). Roma.
- Fortin, M., Dale, M.R.T., Hoef, J., 2002. Spatial Analysis in Ecology, in: El-Shaarawi, A.H., Piegorisch, W.W. (Eds.), *Encyclopedia of Environmetrics*. Wiley, pp. 2051–2058. <https://doi.org/10.1002/9780470057339.vas039>
- Gellini, R., Grossoni, P., 2014. *Botanica forestale*. CEDAM.
- Getis, A., Ord, J.K., 1992. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis* 24, 189–206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- Grassi, G., Minotta, G., Tonon, G., Bagnaresi, U., 2004. Dynamics of Norway spruce and silver fir natural regeneration in a mixed stand under uneven-aged management. *Canadian Journal of Forest Research* 34, 141–149.
- Holtmeier, F.-K., 1995. European larch in Middle Europe with special reference to the Central Alps, in: *Ecology and Management of Larix Forests: A Look Ahead Proceedings of an International Symposium*. USDA, Forest Service Intermountain Research Station, Whitefish, MT, USA, pp. 41–49.

- Lamedica, S., Lingua, E., Popal, I., Motta, R., Carrer, M., 2011. Spatial structure in four Norway spruce stands with different management history in the Alps and Carpathians. *Silva Fennica* 45, 865–873.
- Legendre, P., Fortin, M.J., 1989. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio* 80, 107–138. <https://doi.org/10.1007/BF00048036>
- Marchetti, M., 2011. Radici globali. *La nuova ecologia* 31, 45–46.
- Moriondo, F., Capretti, P., Ragazzi, A., 2006. Malattie delle piante in bosco, in vivaio e delle alberature. Pàtron Editore, Bologna.
- Motta, R., 2015. Foreste di protezione diretta, in: *Selvicoltura Generale. Boschi, Società e Tecniche Colturali*. Compagnia delle foreste, pp. 343–347.
- Neri, C., Gianolla, P., Furlanis, S., Caputo, R., Bosellini, A., 2006. Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 - foglio 029 Cortina d'Ampezzo. APAT.
- Pommerening, A., 2002. Approaches to quantifying forest structures. *Forestry* 75, 305–324. <https://doi.org/10.1093/forestry/75.3.305>
- Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, B., 2022. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Reed, D.D., Burkhart, H.E., 1985. Spatial Autocorrelation of Individual Tree Characteristics in Loblolly Pine Stands. *Forest Science* 31, 587–594.
- Rixen, C., Schwoerer, C., Wipf, S., 2010. Winter climate change at different temporal scales in *Vaccinium myrtillus*, an Arctic and alpine dwarf shrub. *Polar Research* 29, 85–94. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2010.00155.x>
- Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lexer, M.J., 2011. Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe: DRIVERS OF FOREST DISTURBANCE

INTENSIFICATION. *Global Change Biology* 17, 2842–2852.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x>

Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Rammer, W., Verkerk, P.J., 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change* 4, 806–810. <https://doi.org/10.1038/nclimate2318>

Servizio Osservatorio Suolo e Rifiuti, 2006. Rapporto sullo stato dell'ambiente della provincia di Belluno.

Shi, H., Zhang, L., 2003. Local Analysis of Tree Competition and Growth. *Forest Science* 49, 938–955.

Sokal, R.R., Oden, N.L., Thomson, B.A., 1998. Local spatial autocorrelation in biological variables. *Biological Journal of the Linnean Society* 65, 41–62.

<https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.1998.tb00350.x>

Soraruf, L., Carrer, M., 2007. Dinamismi e struttura della rinnovazione in tre popolamenti d'alta quota nelle Dolomiti ampezzane. *Forest@* 4, 177–193.

Szmyt, J., Stoyan, D., 2013. Spatial autocorrelation of tree attributes in naturally regenerated managed beech (*Fagus sylvatica*) forests in the Beskid Niski Mountains, southern Poland. *Dendrobiology* 129–136.

<https://doi.org/10.12657/denbio.071.013>

Wiegand, T., 2004. Introduction to Point Pattern Analysis with Ripley's L and the O-ring statistic using the Programita software. Department of Ecological Modelling, UFZ-Centre for Environmental Research.

Wiegand, T., A. Moloney, K., 2004. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos* 104, 209–229. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2004.12497.x>