



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN VALORIZZAZIONE E
TUTELA DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO MONTANO

LA RESISTENZA DEL PINO SILVESTRE
ALLA SICCIÀ NEL PARCO DEL TICINO

Relatore: Prof. Giorgio Vacchiano

Correlatori: Silvio Oggioni

Lorenzo Rossi

Elaborato finale di: Alessandro Rosina

Matricola: 907064

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

RIASSUNTO.....	3
1. INTRODUZIONE.....	4
1.1 Cambio climatico... ..	4
1.2 Gli effetti del cambio climatico sulle foreste... ..	5
1.3 L'influenza del cambio climatico sul pino silvestre.....	6
1.4 Obbiettivi	8
1.5 Specie di interesse... ..	9
1.6 Coltivazione e distribuzione... ..	10
2. MATERIALI E METODI.....	13
2.1 Località di studio... ..	13
2.2 Siti di campionamento.....	16
2.3 Variabili campionate	18
2.4 Analisi dendrocronologica	18
2.5 Prelievo dei campioni.....	20
2.6 Preparazione dei campioni... ..	20
2.7 Analisi dei campioni... ..	22
2.8 Dati climatici... ..	24
2.9 Indici di resilienza	25
2.10 Analisi statistica.....	27
3. RISULTATI.....	28
3.1 Altezza e diametro.....	28
3.2 Cronologie di accrescimento... ..	29
3.3 Autocorrelazione... ..	30
3.4 SPEI.....	31
3.5 Resistenza.....	32
3.6 Recupero.....	33
3.7 Resilienza	34
4. DISCUSSIONE.....	35
5. CONCLUSIONI	39
6. BIBLIOGRAFIA.....	40

RIASSUNTO

In un'ottica di cambio climatico è indispensabile riuscire a individuare quali specie possano adattarsi meglio in determinate zone, per poter fare una accurata e funzionale pianificazione forestale. L'obiettivo di questa ricerca è quello di determinare la risposta e la resilienza del pino silvestre alle recenti siccità nel parco del Ticino. Tramite lo studio dendrocronologico messo in relazione con indicatori climatici di siccità quali lo SPEI, è stato possibile determinare gli indici di resistenza, recupero e resilienza alla siccità del pino silvestre (*Pinus sylvestris*). Dai risultati si è riscontrato come la pianta tenda a mostrare differenti indici di resistenza e recupero a seconda del grado di siccità riscontrato: una maggiore resistenza alle siccità lievi, e un maggiore recupero a seguito di siccità moderate ed estreme. Tali valori vanno però a compensarsi quando si analizza l'indice di resilienza. Grazie a questa compensazione si nota come, in generale, il pino silvestre mostri una buona risposta alla crescente siccità. Confrontando il pino silvestre con le specie maggiormente presenti nel parco si è evidenziato come risulti essere una delle specie che meglio si presta alla sopravvivenza in un'ottica di siccità sempre più frequenti derivanti dal cambio climatico, e quindi una buona scelta in un'ottica di gestione selviculturale del parco.

1. INTRODUZIONE

1.1 Cambio climatico

Ad oggi, il cambiamento ha una portata e una velocità senza precedenti, mai vista nelle ere geologiche passate. Con le emissioni di gas serra stiamo accelerando di molto un processo che normalmente richiederebbe secoli, andando così a portare un cambiamento molto più rapido di quello che normalmente è stato in passato. L'attuale processo di industrializzazione ed il conseguente rilascio di carbonio in atmosfera che comporta, insieme all'esteso disboscamento in atto per ragioni produttive, risultano essere fattori molto significativi che determinano e accelerano il cambiamento climatico. Ad esso si attribuiscono le colpe dei sempre più frequenti disastri ambientali, che vanno ad influenzare ogni area della nostra quotidianità. Le problematiche che insorgono vanno a colpire diversi ambiti della nostra società, da quello economico industriale a quello politico e culturale.

Attualmente la colpa di questo cambiamento viene attribuita all'azione antropica. Come riportato nello studio "Cambiamento climatico indotto dall'uomo" (Cooper, 1978) con le nostre emissioni di gas serra porteremmo a significativi cambiamenti già entro la fine di questo secolo. Uno dei principali punti sul quale impattiamo è la temperatura media globale. Secondo gli ultimi studi risulta infatti che la temperatura sia già aumentata di $1,3^{\circ}\text{C}$ rispetto alle medie dell'epoca preindustriale (IPCC 2018). Questo valore andrà ad aumentare, a seconda di quanto verrà fatto per limitare l'emissione di gas serra, da 1 fino a 5°C entro il 2100 (CMCC 2021). Un ulteriore effetto del cambiamento climatico si ha sulle riserve idriche, sia sotterranee che esterne, risulta infatti che impattino anche sull'abbassamento del livello piezometrico delle falde e sulla diminuzione della portata delle sorgenti (Ducci et al. 2005).

Queste previsioni si riscontrano anche in Italia: secondo le stime dell'ultimo rapporto del CMCC saranno molteplici i settori che verranno influenzati, a cominciare dal settore agricolo, dove un aumento della stagione calda porterà a diversi problemi: l'aumento della richiesta idrica delle colture, il danneggiamento delle produzioni primaverili-estive. Un ulteriore effetto si avrà sulla zootecnia dove gli animali saranno maggiormente sottoposti a stress da caldo, impattando negativamente su produttività e riproduzione. Si riscontreranno problematiche anche nella gestione e protezione delle foreste dove a causa della scarsità di precipitazione estiva avremo un considerevole aumento degli incendi - oltre il 20% in più - ed un aumento della stagione in cui essi si verificano (CMCC2021).

1.2 Gli effetti del cambio climatico sulle foreste

Con il cambiamento climatico le nostre foreste stanno subendo un significativo cambiamento, sia per quanto riguarda le specie presenti, sia in quelli che riguardano la fisionomia e la struttura delle biocenosi forestali (McDowell et al. 2008).

Uno dei mezzi più utili per formulare le previsioni sul futuro delle foreste sono gli studi paleo-ecologici e filo-geografici, con particolare attenzione alla risposta delle specie alle passate variazioni climatiche, in termini di capacità di migrazione e adattamento. Le temperature sono il principale fattore di controllo sulla distribuzione delle fasce di vegetazione e le specie che vi appartengono: a partire dalle zone più calde, in Italia, si passa dai boschi sempreverdi mediterranei, a quelli temperati caducifogli, fino ad arrivare a quelli dominati da conifere microterme. Questo gradiente è l'espressione più diretta dei rapporti fra la vegetazione forestale ed il clima.

Queste ricerche rivelano che il CC possa determinare un rapido turnover delle specie arboree forestali, con una riduzione degli areali di distribuzione, principalmente negli ambienti mediterranei, dove vi sarà una riduzione delle specie attualmente presenti ed un aumento delle specie termofile (Borghetti et al., 2012).

Attualmente sono in atto due diversi cambiamenti, a differenti velocità: il primo (e più graduale) vede il cambiamento dei biomi e delle principali specie forestali, con cambiamenti anche nella produttività; il secondo più traumatico coinvolge le foreste che si ritrovano sempre più esposte a eventi estremi come l'incremento degli incendi a causa della crescente siccità, o il proliferare di insetti e patologie (Lindner et al. 2013).

La conseguenza di tali cambiamenti pesa notevolmente sulla gestione forestale e sugli obiettivi che essa si pone poiché. Al contrario di quello che accadeva in passato, non ci si trova davanti ad un quadro di condizioni "costanti", ma ci si trova a fare i conti con eventi in continuo mutamento in un contesto di incertezza e rapida variazione non solo climatica, ma anche di uso del terreno, di habitat etc. Un importante quesito che adesso ci si deve porre è come i nostri boschi si evolveranno di qui a fine secolo. Quando si parla di selvicoltura questa è una domanda centrale poiché, in questo ambito, una singola scelta può vincolare un individuo arboreo per decenni, andando così a dare risultati solo a distanza di molti anni. È dunque indispensabile sapere esattamente come la situazione si evolverà, in modo da poter pianificare al meglio la struttura che vogliamo dare ai boschi, questo perché la selezione di una specie sbagliata potrebbe portare alla morte di tutti gli individui che vi appartengono. Questo porterebbe a gravi danni sia ambientali che economici.

Nel territorio italiano il pino silvestre è una specie di particolare interesse poiché, dato il suo veloce sviluppo ed il suo valore sia economico che ambientale è stato avvantaggiato e favorito in vaste aree nel nord Italia.

1.3 L'influenza del cambiamento climatico sul pino silvestre

L'aumento delle temperature e la diminuzione delle precipitazioni portate dal cambiamento climatico sottopongono le piante ad un maggiore stress idrico. (Goetz e al.2013). Uno dei principali fattori di mortalità delle piante è, appunto, lo stress. Esso viene definito come una significativa variazione delle condizioni ottimali di vita dell'individuo, dove la vitalità dell'individuo diminuisce alla persistenza dello stress (Larcher,2001).

Con l'aumento di periodi di siccità il pino silvestre viene sottoposto a sempre maggior stress. Per superare questi momenti la pianta può adottare diverse strategie come ridurre le dimensioni dei suoi aghi per limitare l'evapotraspirazione - limitando così le perdite di liquidi (WSL,2017) – oppure cambiare lo sviluppo del fusto e il portamento per meglio adattarsi agli stress climatici (Sabatè et al. 2002).

I principali danni da siccità che il pino silvestre può riscontare possono essere racchiusi in tre meccanismi:

- 1) Il calore e la prolungata siccità possono causare la cavitazione della colonna d'acqua all'interno delle principali trachee della pianta, portando ad un collasso idrico (Rennenberg et al. 2006)
- 2) Il prolungarsi della stagione secca porta ad un elevato livello di stress la pianta. Questo comporta una carenza di carbonio e una limitazione delle vie metaboliche. Ciò riduce drasticamente la capacità della pianta di far fronte agli attacchi degli agenti abiotici, come ad esempio gli insetti (Adams et al. 2009)
- 3) Le alte temperature portate dalla stagione secca portano ad un alto proliferare di insetti, che attaccheranno la pianta già sofferente e indebolita dallo stress idrico.

Gli individui adulti hanno maggiori problemi ad adattarsi al cambiamento, a causa della maggiore massa traspirante e della maggior necessità di acqua rispetto a piante più giovani e piccole. Lunghi periodi siccitosi hanno invece maggiori ripercussioni sui semenzali, poiché sprovvisti di apparati radicali sviluppati (Vacchiano.2008). Dall'altro lato, con l'aumento della CO₂ derivante dalle emissioni abbiamo un incremento di una delle principali risorse dell'accrescimento delle piante che va ad aumentare il loro potenziale fotosintetico. Un altro vantaggio possibile è l'aumento della temperatura che porta ad un conseguente allungamento della stagione vegetativa, incrementando lo

sviluppo annuale della pianta. Questo effetto positivo, però, si osserva solo qualora le precipitazioni siano sufficienti; al contrario l'incremento della temperatura potrebbe non compensare gli effetti positivi dell'aumento di CO₂ e risultare fonte di stress (Sabatè.2002).

Questa dualità di effetti del cambiamento climatico sullo sviluppo del pino silvestre sottolinea la necessità di implementare nuovi studi per capire l'effetto dello stress idrico e termico sullo sviluppo di tale specie ed utilizzare queste informazioni per sviluppare un piano di gestione ottimale in un contesto di cambio climatico.

1.4 OBIETTIVI

Lo scopo che la nostra ricerca si pone è quello di studiare la resilienza del pino silvestre alle recenti siccità, valutando se la specie in esame possa tollerare il cambiamento che il clima sta subendo nel nostro paese. Tale studio sarà una prima base per poter determinare il migliore approccio da adottare nella pianificazione selvicolturale del parco del Ticino.

In particolare vogliamo:

- individuare attraverso l'analisi dei dati climatici le annate di siccità avvenute negli ultimi 20 anni
- Analizzare l'indice di sviluppo del pino silvestre attraverso analisi dendrocronologica negli ultimi 20 anni
- Stimare la capacità di resistenza, recupero e resilienza nelle annate siccitose del pino silvestre negli ultimi 20 anni

1.5 Specie di interesse: “*Pinus sylvestris*”

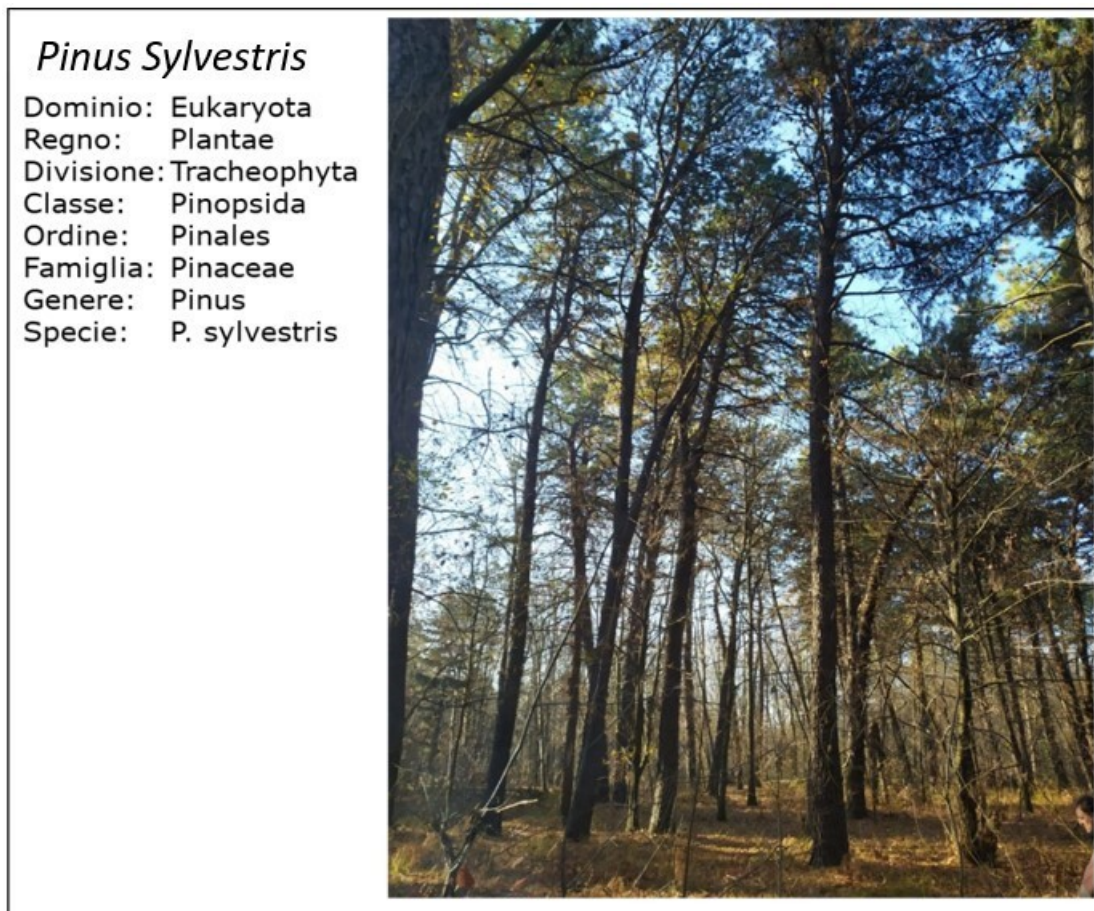


Figura 1: esemplari di pino silvestre fotografati nella località trattoria dei cacciatori

Il pino silvestre è una pianta a portamento arboreo che può raggiungere i 30-40 metri di altezza, con chioma verde-grigio piramidale-ombrelliforme. Il tronco si presenta a fusto dritto, di colore bruno-rossastro e si stacca a placche. Si tratta di una specie monoica, gli sporofiti maschili tendono a formare piccoli coni sessili e penduli di colorazione giallastra alla base dei getti. Quelli femminili sono di colorazione rossastra, tondeggianti e tendenzialmente isolati, in seguito si trasformano in strobili ovali. Essi raggiungono la maturità e liberano i semi dopo tre anni.

Le sue gemme sono ricche di principi attivi e i suoi aghi sono curativi, balsamici e purificatori. Le parti che vengono utilizzate del pino silvestre sono la linfa, il legno, gli aghi e le gemme.

Questa pianta è caratterizzata da radici a fittone, con radici laterali che si approfondiscono e si allontanano orizzontalmente che gli permettono di penetrare in profondità anche in strati acquiferi. È specie da mesoxerofila a xerofila, microterma, con un'ottima resistenza al freddo e alle alte escursioni termiche, ma necessita di estati calde. Grazie all'apparato radicale riesce a resistere bene alla siccità, infatti esso è sviluppato in maniera fittonante, con un ottimo uso dell'acqua nei processi fisiologici.

È una specie con un alto grado di sopportazione dello stress (attributo che gli permette di essere avvantaggiata nella competizione con altre specie) che sia climatico o territoriale, che possa includere basse temperature, estremi di alcalinità e acidità, aridità pronunciata o allagamenti del terreno.

Si tratta di una specie eliofila e pioniera, il cui fabbisogno di luce aumenta con l'età: quando vi è una carenza infatti mostra i caratteristici segni dell'eziolamento nelle parti aeree ed una diminuzione nello sviluppo della chioma.



Figura 2— Principali caratteri morfologici del pino silvestre

1.6 Coltivazione e distribuzione

Il pino silvestre è distribuito in larghi areali in Europa (Fig. 3). Solitamente ricopre un ruolo di pianta pioniera, si insedia rapidamente dopo un disturbo del sistema, esso rappresenta una fase intermedia, succeduto da popolazioni definitive di latifoglie, a patto che le condizioni non siano troppo sfavorevoli per la competitività. Le uniche zone in cui le pinete si possano considerare stabili sono le vallate alpine, in queste zone infatti il pino è contemporaneamente sia pianta pioniera che definitiva.



Figura 3: areale di distribuzione del pino silvestre in Europa, Fonte EUFORGEN

Il pino silvestre ricopre un ruolo importante nel settore forestale e selvicolturale. Attualmente è la conifera con la più alta presenza e diffusione in Europa in cui occupa oltre 28 milioni di ettari, circa il 20% delle foreste totali (Mason e Alia, 2000), presente sia come impianto che come bosco naturale. La diffusa presenza del pino silvestre nelle Alpi è fatta risalire a un significativo allargamento del suo areale verificatosi al termine dell'ultimo periodo glaciale, quando l'aumento delle temperature e delle precipitazioni (specialmente nell'Europa meridionale dove i suoli non erano permanentemente gelati) hanno favorito la ricolonizzazione della specie.

In Italia, il pino silvestre copre il 4.9% della superficie forestale nazionale (INFC, 2005). La sua importanza riguarda sia il suo valore ecologico, con il pino silvestre che ricopre l'11% delle aree soggette a vincolo naturalistico in Italia e il 5% di quelle soggette a vincolo idrogeologico (INFC 2005). Anche da un punto di vista economico ricopre un ruolo di elevata importanza, grazie al suo veloce sviluppo, coprendo il 5.5% delle aree disponibili al prelievo legnoso in Italia (IUNFC, 2005). Nelle Alpi occidentali il pino silvestre occupa tutte le zone bioclimatiche, da quella esalpica alle parti più continentali delle valli interne.

Le foreste di pino silvestre sono suddivise in tipi forestali in base alla continentalità, al tipo di substrato (acidofile o basifile) e al bilancio idrico. Gli stessi fattori possono comportare significative variazioni nelle strutture dinamiche ed evolutive delle pinete.

Le pinete possono essere suddivise in due tipologie, primarie e secondarie. Le primarie si trovano principalmente nei settori continentali (suoli poveri o rocciosi). La limitata disponibilità di risorse idriche consente al pino di insediarsi per primo in zone non boscate e di dominare così sulle altre specie riproducendosi. Le pinete secondarie invece sono caratteristiche dei settori mesalpici: generate dall'invasione del pino su suoli disturbati da tagli o simili. Si tratta di forme transitorie, poiché la loro sopravvivenza viene garantita dai disturbi: qualora essi cessassero le pinete andrebbero a cedere il passo a piante più competitive (per es. le latifoglie).

Un'altra distinzione importante è quella che riguarda l'orientamento delle pinete. Quelle su versanti soleggiati nel settore endalpico sono caratterizzate da un'alta presenza di pino silvestre, oltre il 90%. Nelle pinete in zone con una maggior disponibilità di acqua invece le specie diverse dal pino acquisiscono maggior rilevanza, arrivando ad essere anche il 30% del numero totale di piante.

In boschi di origine antropica, l'impianto può avvenire nel giro di un paio d'anni, fornendo una pacciamatura per evitare la competizione delle giovani piantine di pino silvestre con le infestanti e avendo cura di proteggere dal freddo la pianta almeno per i primi due inverni. Vanno evitati il più possibile i trapianti soprattutto per piante più alte di 90 cm, pena l'arresto dell'accrescimento e la minore resistenza ai venti.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Località di studio



Figura 4: inquadramento geografico del parco del Ticino

La Valle del Ticino è un'area posizionata tra il territorio elvetico, la Lombardia ed il Piemonte. È sotto la salvaguardia piemontese, mentre la parte lombarda viene tutelata dal “Parco lombardo della Valle del Ticino”. Prende il nome dal fiume che la attraversa: il Ticino, che nasce dal Passo di Novena, in Svizzera e scorre fino alla confluenza con il Po misurando circa 248 Km.

La Valle del Ticino, nel 2002 è stata riconosciuta come Riserva della Biosfera nell'ambito del “Programma Man and Biosphere (MAB)” dell'Unesco. La parte boschiva dell'area è la più importante area forestale della Pianura Padana con una superficie di circa 20.000 ettari.

Il Parco Lombardo della Valle del Ticino vanta una superficie di circa 91.800 ettari, di cui 20.500 tutelati a Parco Naturale, ed è composto da un territorio amministrativo di 47 Comuni lombardi collocati lungo il Ticino, compresi tra il lago Maggiore e il fiume Po, nelle province di Varese, Milano e Pavia.

Il Parco del Ticino Piemontese (oggi parte dell'Ente di gestione delle aree protette del Ticino e del Lago Maggiore) creato nel 1978, comprende una superficie di 6.561 ettari a Parco Naturale includendo undici Comuni della Provincia di Novara: Castelletto sopra Ticino, Varallo Pombia, Pombia, Marano, Oleggio, Bellinzago, Cameri, Galliate, Romentino, Trecate e Cerano.

Il territorio del Parco è occupato per quasi il 55 % da zone agricole, il 22% da foreste, il 3% reticolo idrografico e il 20 % aree urbanizzate.

La presenza di un ricco e variegato insieme di ecosistemi fa sì che nel Parco del Ticino sia presente un patrimonio di biodiversità che non ha eguali in Pianura Padana.

Specie viventi sinora censite: 6.235, delle quali 3.264 risultano appartenere al regno animale, 1.585 specie di piante e 1.386 specie di funghi.

Le superfici boscate ricoprono complessivamente circa 20.000 ettari in cui troviamo diverse tipologie di bosco che variano da eccellenze ad altri boschi degradati e infestati da piante esotiche.

La prima legge forestale in Lombardia è datata 1976 e solo da questo momento è iniziata l'attenzione verso i nostri boschi. Quando agli inizi degli anni '70 venne costituito il Parco del Ticino, i boschi avevano subito ingenti tagli fatti nei 30 anni precedenti e risultavano già fortemente modificati nella loro composizione floristica. Vennero effettuati molti tagli e dissodamenti, spesso "a macchia di leopardo", all'interno della foresta e sui suoli migliori, per far posto a pioppeti industriali e a nuovi coltivi. Tutto questo aggravato dall'invasione delle specie esotiche, come per esempio la robinia e il ciliegio tardivo, che venne introdotto per favorire la caccia nell'area di brughiera e rivelatosi poi una delle specie più invasive dei nostri boschi. L'istituzione dei grandi parchi fluviali alla fine degli anni '70 (Ticino, Adda, Lambro, Oglio, Mincio e Serio) e la rivalutazione e valorizzazione delle aree boscate residue hanno consentito la nascita di una coscienza forestale collettiva che portò alla modifica della gestione forestale in un'ottica più in linea con le politiche ambientali e di sostenibilità attuali.

Venne censito il patrimonio forestale sopravvissuto e proposto il primo "Piano di settore dei boschi". Lo scopo del piano fu quello di fornire indicazioni di lavoro per ricostruire, per quanto possibile, la foresta planiziale ticinese, non solo per produrre legname ma, soprattutto, per creare nuove forme di ricchezza. Tra marzo 2003 e novembre 2004 è iniziata una mappatura delle specie arboree del Parco del Ticino mediante Telerilevamento iperspettrale (Progetto MIVIS). Il nome del progetto deriva dal sensore iperspettrale utilizzato, chiamato MIVIS (Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer). Un sistema assolutamente innovativo per il panorama tecnico-scientifico nazionale, molto utile per l'attività pianificatoria e selvicolturale. Questa tecnica ha permesso di analizzare e

mappare le firme spettrali delle differenti rifrazioni della radiazione elettromagnetica degli alberi monitorati. Le diverse tipologie forestali presenti nel Parco dopo le attuazioni di queste nuove politiche sono:

- A nord, nella zona di Somma Lombardo, dove sono presenti colline moreniche, prevalgono quercia, castagno e conifere
- Al centro nord (Magenta) prevalgono quercia, robinia e ciliegio
- Al centro sud (Vigevano) troviamo pioppi, robinia e salice
- Al sud (Pavia) la grande disponibilità di acqua avvantaggia le specie igrofile quali salice, ontano e pioppo

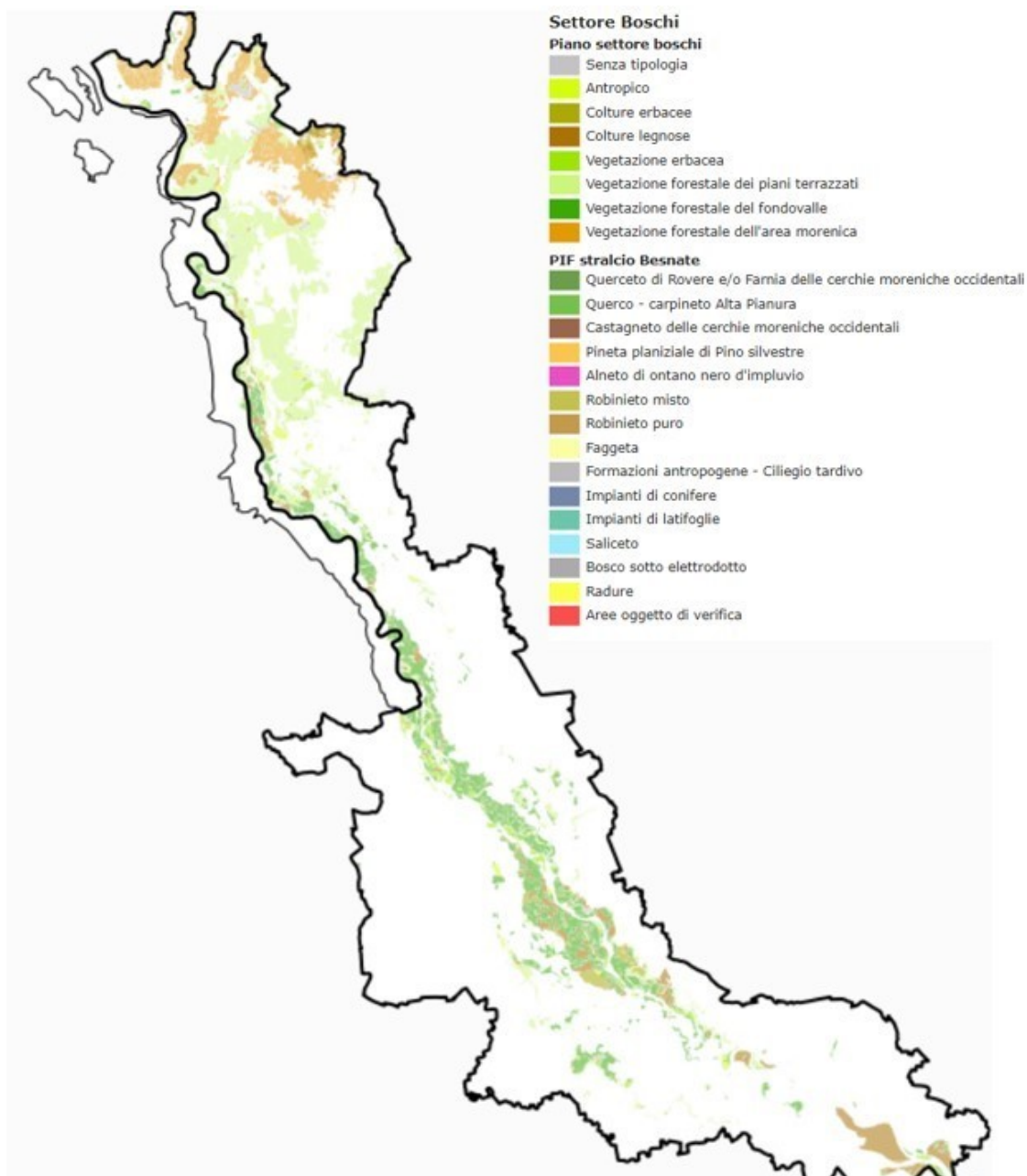


Figura 5: estratto del geo portale con le principali tipologie forestali

2.2 Siti di campionamento

I campionamenti sono stati effettuati in due distinte località.

La prima area, Località “osteria dei cacciatori” ($45^{\circ}39'38.9''\text{N } 8^{\circ}42'07.0''\text{E}$ – Fig. 6, Plot 1) si presenta come una zona pianeggiante, attraversata da alcuni sentieri forestali. La vegetazione è in prevalenza costituita da pino silvestre nello stato dominante, mentre la rinnovazione presenta molte tracce di piante latifoglie come la farnia.

La seconda area di si trova più a nord, al confine con il paese di Sesona ($45^{\circ}42'13.7''\text{N } 8^{\circ}41'48.2''\text{E}$ – Fig.6, Plot 2). Anche qui ritroviamo una maggioranza di pino silvestre, con una scarsa presenza di pioppi. Lo strato dominato risulta essere composto principalmente da felci, con scarse tracce di rinnovazione. Questi due luoghi ci sono stati indicati dai responsabili del parco come luoghi di interesse per l’alta presenza di pino silvestre.

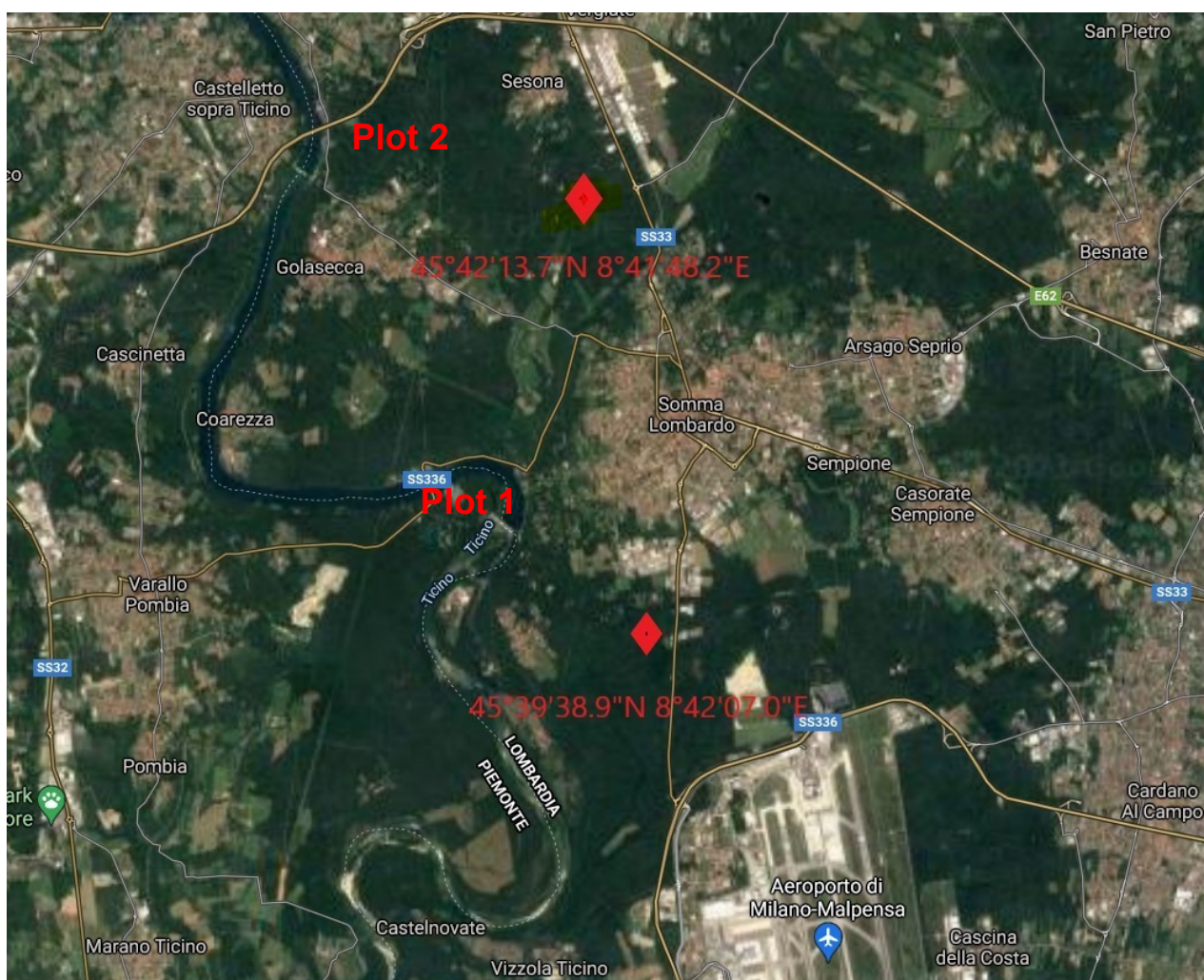


Figura 6: inquadramento geografico della zona di campionamento

Nei siti di studio la temperatura media annuale varia tra i -7°C e i 25°C , con una temperatura minima -3°C , mentre la massima registrata risulta essere di 29°C .

I momenti di maggiore precipitazione si riscontrano durante l'autunno (ottobre-novembre) e durante la primavera (aprile-maggio). Le precipitazioni medie annuali cumulate risultano essere di 96 mm

(fig. 7).

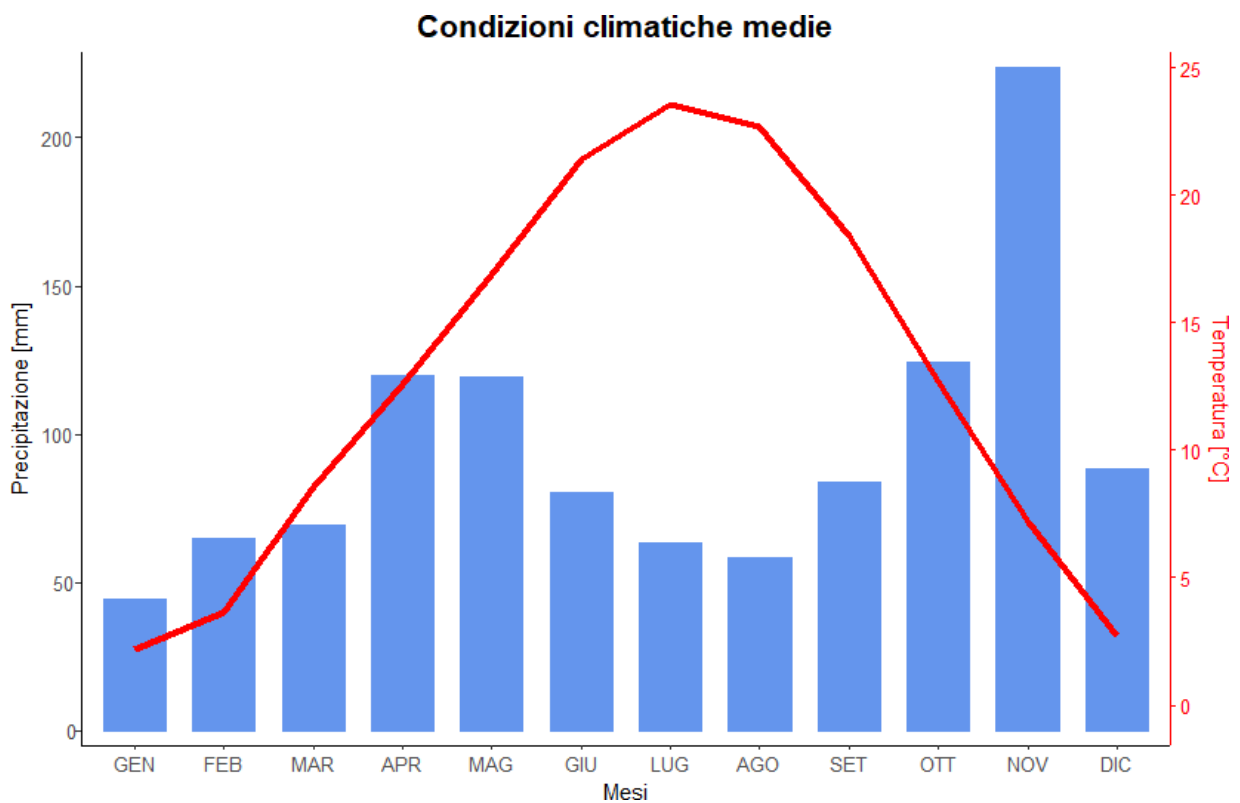


Figura 7: andamento annuale delle precipitazioni in blu e della temperatura in rosso. Dati ricavati dalla stazione meteorologica di Alzano Lombardo (ARPA)

2.3 Variabili campionate

Per questo studio sono stati selezionati individui di pino silvestre che riportassero le medesime condizioni sia ambientali (concorrenza) che strutturali (assenza di evidenti traumi, malattie o attacchi da parte di insetti dannosi). Sono stati selezionati quindici individui per plot di campionamento.

Per poter confrontare i dati di ricerca tra i due polt sono stati selezionati individue che avessero mediamente le stesse dimensioni in altezza e mostrassero diametri simili. Per rilevare le altezze delle piante è stato utilizzato un Ipsometro a lente SUUNTO PM5/1520 PC abbinato ad una bindella, mentre i diametri sono stati misurati tramite un'apposita rotella metrica, chiamata Diametrometro tascabile KDS.

Per questo studio sono state prelevate due carote, poste rispettivamente una di fronte all'altra in modo da coprire tutto il diametro della pianta, a 130 cm dal suolo, avendo cura di prelevare il campione in maniera quanto più perpendicolare possibile rispetto alla pianta, per facilitare la lettura delle carote nelle fasi successive (Martinez-Sancho,2020). Queste carote sono state utilizzate per determinare gli indici di accrescimento della pianta negli ultimi 20 anni attraverso analisi dendrocronologiche, necessari alla stima degli indici di resilienza, resistenza e recupero delle piante negli anni siccitosi (Sala, 2016).

2.4. Analisi dendrocronologica

La dendrocronologia è una tecnica utilizzata per datare e analizzare lo sviluppo delle specie forestali o del materiale legnoso da esse derivanti. Si tratta di una scienza che, se ben applicata, ci può fornire molte informazioni essenziali. Tramite la misurazione degli anelli di accrescimento possiamo apprendere l'intera storia dell'albero, così da studiare la storia della foresta in cui è cresciuto e le variazioni climatiche che ha affrontato (Swetnam et al. 1999).

Le piante, durante la loro stagione vegetativa, tendono ad aumentare il volume tramite l'accrescimento secondario. Tale accrescimento è legato alla stagione vegetativa che normalmente va dalla primavera all'autunno. Generalmente questa crescita è divisa in tre fasi:

- I) il primo momento di maggior sviluppo della pianta in primavera
- II) la crescita meno intensa durante l'estate-inizio inverno
- III) la fase di riposo invernale. (Armenise et al. 1950)

Ciò che permette la lettura delle carote è la differenza del tipo di legno prodotto durante queste fasi. Durante la prima fase, in primavera, avremo un legno più chiaro caratterizzato dalla presenza di molti

vasi per la conduzione della linfa. Il legno prodotto durante la seconda fase (legno tardivo) è più scuro, poiché è impiegato per consolidare la struttura e aumentare la resistenza in vista della stagione fredda. Gli anelli che si riscontrano all'interno della pianta non sono altro che l'alternarsi di questi due tipi di legno (Fig. 8).

L'ampiezza di questi anelli, rappresentante l'accrescimento della pianta, è influenzata da molteplici fattori di cui uno dei principali risulta essere il clima: quando ci sono annate favorevoli si avranno anelli di dimensioni maggiori, contrariamente in annate secche si troveranno anelli di spessore minore.



Figura 8: esempio di anelli di accrescimento

2.5. Prelievo dei campioni

Il prelievo dei campioni è stato effettuato tramite un succhiello di Pressler (Fig.9). Sono state prelevate due carote per ogni soggetto. L'altezza di prelievo e misurazione del diametro è quella a petto d'uomo (130 cm). Una volta estratte le carote sono state riposte all'interno di un cartone scanalato e fissate con dello scotch di carta. In questo modo è stato possibile prevenire danni e rotture dovuti al trasporto.



Figura 9: esempio di succhiello di Presler in fase di carotaggio di un pino

2.6 Preparazione dei campioni

Finita la raccolta dei campioni gli è succeduta la fase di pulizia e preparazione. Il primo passaggio è stato quello di incollare le carote su degli appositi sostegni di legno, per favorire il processo di asciugatura del legno. La fase critica di questo passaggio consiste nell'assicurarsi che le fibre del legno siano collocate verticalmente rispetto al supporto, così da facilitarne la lettura in fase di analisi.

La fase successiva è stata la levigatura. Per questo processo sono state impiegate delle lamette per rimuovere una parte della sezione in modo da rendere ben visibile la sezione trasversale (Fig. 10).

L'ultimo passaggio della preparazione consiste nel passare del gesso sopra le carote: il gesso penetra nei pori del legno rendendo più facilmente visibile il passaggio da legno primaverile a legno tardivo.

L'ultima fase di preparazione dei campioni è quella della scannerizzazione delle carote per digitalizzare le immagini. Si è utilizzato uno scanner Epson Expression 1600 pro alta risoluzione (1200 dpi), con il relativo programma.

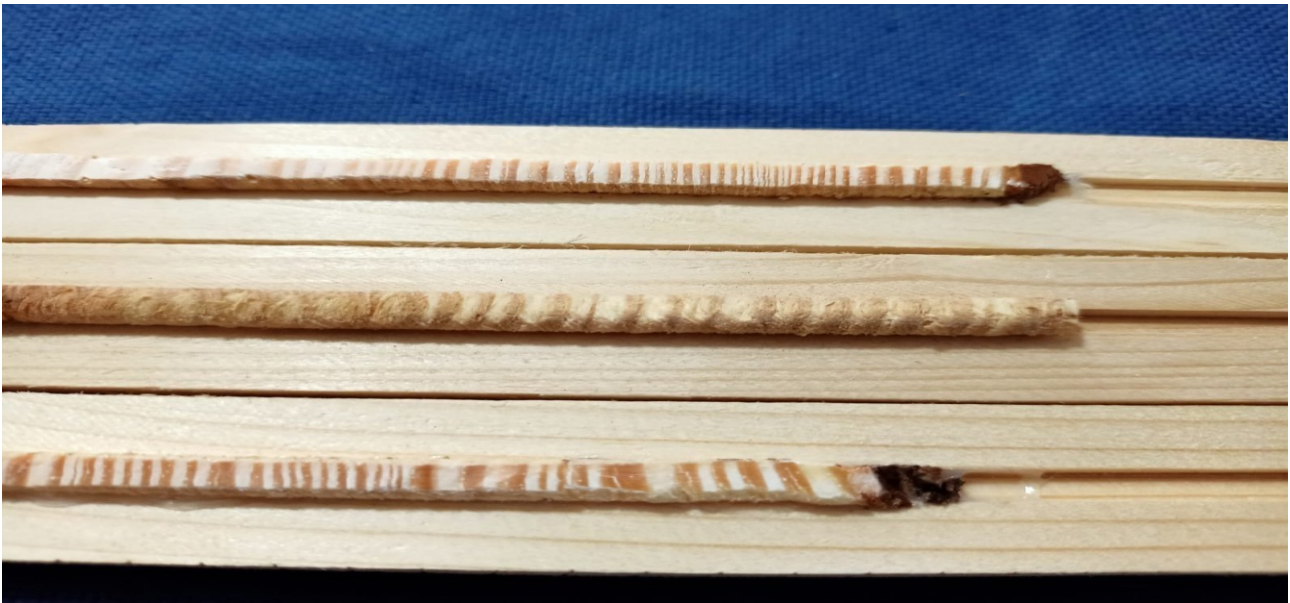


Figura10: esempio di carote pre e post fase di pulizia

2.7 Analisi dei campioni

Per l'estrapolazione dei dati dalle carote sono stati utilizzati due programmi appositamente sviluppati per le analisi dendrocronologiche: CooRecording e CDendro. Il primo è un software che ci permette di misurare gli anelli di accrescimento: utilizzando un puntatore si possono segnare gli anelli che vengono salvati come coordinate X, Y rispetto a un sistema di riferimento locale (fig. 11).

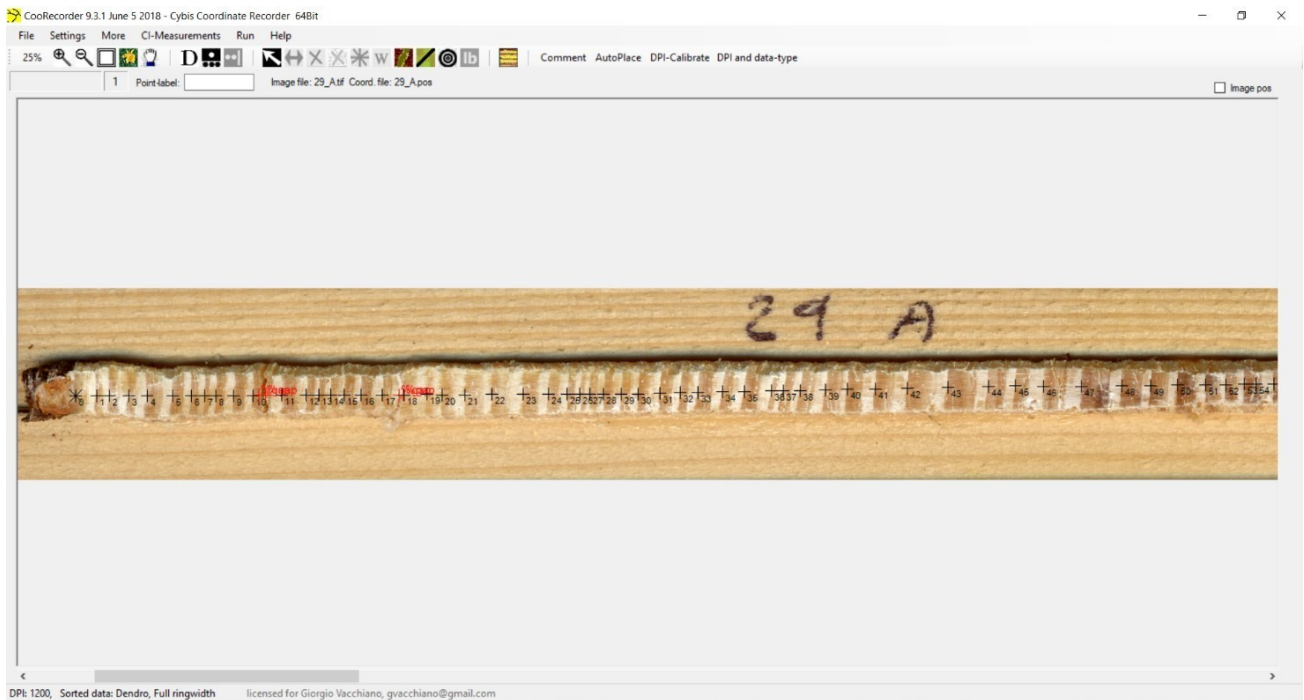


Figura 11: esempio di tracciamento degli anelli tramite CooRecorder

Durante questa fase si riscontrano spesso problemi nella lettura delle carote: gli errori più comuni consistono nel tralasciare degli anelli a causa di un errore visivo, o aggiungerne a causa dei falsi anelli che possono essere presenti in un anno. Per ovviare a queste problematiche si utilizza il confronto delle due carote replicate prese dallo stesso albero.

Utilizzando il software CDendro, che ci permette di visualizzare in maniera grafica gli andamenti dell'accrescimento raccolti da CooRecorder, si possono individuare questi errori di lettura tramite il confronto delle cronologie di accrescimento che devono combaciare nei picchi di massimo e minimo accrescimento.

Avendo prelevato due campioni per soggetto, si procede a mediare le due curve replicate per arrivare ad avere una cronologia media per individuo. A queste cronologie medie verrà successivamente applicato un detrending dei dati per ripulirli da eventuali variazioni non assimilabili ad eventi esterni (Raffalovich, et al. 1994). Attraverso questa procedura sarà possibile trasformare i dati grezzi di TRW (tree ring width, ovvero l'accrescimento in mm) in TRI (tree ring index), operazione che permette il confronto fra i vari trattamenti o siti di studio. Per assicurarsi la rappresentatività degli individui a livello di popolazione, le singole cronologie sono poi confrontate con le altre del rispettivo plot. Questo processo prende il nome di cross-dating, serve per assicurarsi che sia stata fatta una corretta misurazione delle cronologie individuali rispetto alla media generale (Holmes, 1983; Grissino e Mayer, 2001). In questa fase di sincronizzazione si mettono a confronto le curve per osservarne l'andamento generale e assicurarsi che i picchi di max e min coincidano quanto più possibile.

Una volta ultimate le cronologie medie individuali delle piante si è provveduto a fare una media di tutti i soggetti appartenenti ad un plot (Fig.12).

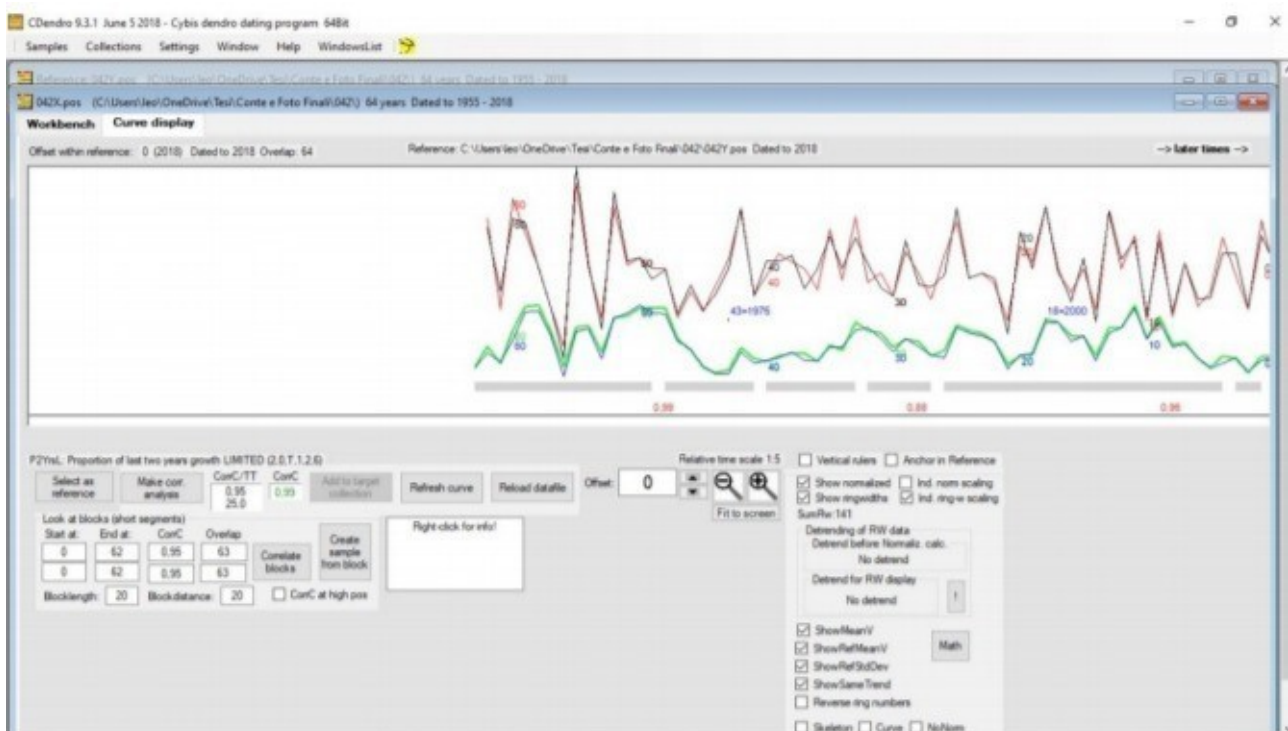


Figura 12: esempio di due cronologie temporali a confronto utilizzando il programma CDendro

2.7 Dati climatici

Per definire gli anni siccitosi, così da mettere in relazione le performance di accrescimento dei diversi plot, abbiamo raccolto i dati climatici di temperatura e precipitazione, messi a disposizione dalla stazione climatica meteorologica di Alzano Lombardo (ARPA). Analizzando i dati climatici è possibile identificare le annate siccitose attraverso l'indice SPEI. Lo SPEI (indice standardizzato di evapotraspirazione delle precipitazioni) è un indice di siccità basato sui dati climatici.

Viene impiegato per determinare l'inizio, la durata e l'entità delle condizioni della siccità rispetto alle normali condizioni naturali. (Vivent-Serrano, 2010). Si tratta di una variante del SPI (indice standardizzato di precipitazione) che, a differenza di quest'ultimo, tiene conto anche dell'evapotraspirazione potenziale (ET0) calcolata tramite la formula di Thornthwaite (Thornthwaite 1948). L' SPI viene usato per indicare le possibilità in cui si presenta un evento siccitoso in un determinato ordine di mesi, sulla base dei dati storici. Per il calcolo dello SPEI si è utilizzato il pacchetto "SPEI" di R. Il procedimento utilizzato è: il seguente

$$ET0 = E_v \times K_p$$

Dove E_v = mm di acqua evaporata e K_p = coefficiente di correlazione determinato tramite valori tabulati

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}$$

$$W = \sqrt{-2.1 \ln(P)} \quad \text{con } P \leq 0.05$$

Dove P è la probabilità di superare un determinato valore D , $D=1$, $C_0= 2.515517$, $C_1= 0.802853$, $C_2= 0.010328$, $d_1=1.432788$, $d_2=0.189269$, and $d_3=0.001308$ (Abramowitz e Stegun.1965),

Questo utilizzo dello SPEI ci permette di tener conto del fatto che nella maggior parte del territorio italiano le piogge estive non riescano a contribuire particolarmente alla ricarica degli acquiferi, poiché, a causa delle alte temperature e dell'evapotraspirazione, vi sia una ridottissima capacità di

infiltrazione da parte dell'acqua. Questi indici ci permettono di classificare le anomalie verificatesi nelle precipitazioni e di conseguenza nel bilancio idrico in rapporto alle medie annuali. I valori ci mostrano direttamente gli scompensi della situazione nei mesi scelti in una determinata località. (Mariani et al.,2018)

È stato adottato come valore di analisi lo SPEI 6, riferito ai sei mesi della stagione vegetativa invece che ai 12 mesi annuali, poiché considerando un minor lasso temporale siamo in grado di determinare con maggior precisione gli eventi siccitosi sia di breve che di lunga durata. Contrariamente in uno SPEI 12 vengono considerati tendenzialmente solo le siccità di lunga durata poiché quelle di breve durata risultano poco visibili nell'arco temporale.

Ho suddiviso il range di SPEI in tre classi, con un valore di -1 viene considerato moderatamente secco, tra -1 e -1,5 molto secco e tra -1,5 e -2 estremamente secco (A.Morgillo et al. 2002)

2.8 Indici di resilienza

Tramite lo SPEI siamo ora in grado di mettere in relazione i dati climatici con i valori di accrescimento ottenuti dal campionamento, i tre indici di nostro interesse sono resistenza, recupero e resilienza. L'uso di più indici per catturare diversi aspetti della risposta delle piante alla siccità ci permette di avere una visione migliore e maggiormente veritiera rispetto all'uso di singoli stimatori (Kaufman 1982, MacGillvray et al. 1995). I tre indici sono stati calcolati sulle singole cronologie, in modo da poter confrontare i vari esemplari sia nel plot che tra i due plot.

Quando parliamo di resistenza alla siccità stiamo quantificando l'attitudine di un soggetto (in questo caso il pino) a sopportare un lungo periodo in deficit di acqua senza riportare danni nell'accrescimento o nella produzione (Maximow, 1929). Noi utilizziamo una serie di indici basati sulla variazione della larghezza degli anelli degli alberi. La resistenza viene calcolata mettendo in relazione il rapporto della crescita durante la siccità (crescita ridotta) con lo sviluppo durante il relativo periodo di pre-siccità - nel nostro caso i cinque anni prima - (Loret, 2011).

$$\text{Resistenza} = R_t = D_r / \text{Pre}D_r$$

dove D_r è l'accrescimento degli anelli in mm durante l'anno siccitoso (dall'inglese "drought" siccità), e $\text{Pre}D_r$ è la media dell'accrescimento degli anelli in mm nei 5 anni precedenti.

In maniera similare il recupero si presenta come la capacità della pianta di recuperare dopo un evento siccitoso. In questo caso corrisponde al rapporto tra la crescita dopo il periodo di stress (1 anno) e lo sviluppo durante la siccità.

$$\text{Recupero} = R_c = \text{PostDr}/\text{Dr}$$

PostDr la media dell'accrescimento degli anelli in mm nei 5 anni successivi.

Infine abbiamo l'indice di resilienza, essa è direttamente collegata sia alla resistenza che alla ripresa. Questo indicatore viene usato per determinare la capacità della pianta di raggiungere i livelli di accrescimento che vi erano nel pre-disturbo. Normalmente viene stimata mettendo a rapporto le prestazioni di prima e dopo la perturbazione (Tilman e Downing 1994) e nel nostro caso per prestazioni si intende l'accrescimento prima e dopo la siccità (Loret, 2011).

$$\text{Resilienza } R_s = \text{PostDr}/\text{PreDr}$$

2.9 Analisi statistica

Per poter utilizzare le cronologie derivanti dalle analisi dendrocronologiche nelle diverse analisi e poter confrontare i risultati è stata effettuata un'operazione di *detrending* su tutte le cronologie individuali. Quando si parla di detrending ci si riferisce all'applicazione di una correzione relativa alle varie velocità di accrescimento di una pianta in esame. Durante le fasi iniziali della vita, infatti, si osserva un accrescimento molto rapido poiché la pianta tenta di raggiungere la dominanza apicale. Tale accrescimento risulta invece minore in un soggetto adulto poiché, per aumentare la propria circonferenza, sarà necessaria molta più massa legnosa. Per poter uniformare i dati relativi all'accrescimento si provvede quindi all'operazione di detrending, dove si tenderà ad eliminare il trend decrescente dell'accrescimento con l'età. L'applicazione di tale correzione è stata possibile tramite la funzione "detrend" (metodo della curva esponenziale negativa modificata "ModNegExp") del pacchetto "dplR" di R. Inoltre, per determinare se l'accrescimento annuale fosse influenzato da una relazione fra anni contigui, è stata valutata l'autocorrelazione parziale fra gli accrescimenti. L'autocorrelazione parziale è stata analizzata per mezzo della funzione "pacf" del pacchetto "tseries" di R (Peters et al.2015).

Le variabili dendrometriche (diametro e altezza) e gli indici di resilienza, fra i differenti plot e i livelli di intensità di siccità, sono stati confrontati tramite ANOVA.

L'ANOVA (dall'inglese Analysis of Variance) ad una via è una tecnica per verificare l'uniformità tra diversi valori di una variabile dipendente, misurata in più gruppi suddivisi in base a diversi livelli di un fattore indipendente. Nel nostro caso ci permette di stabilire se vi è una significativa differenza tra i valori medi dei diversi plot e delle intensità di siccità analizzate. Tale differenza viene determinata osservando se la differenza tra i livelli di analisi sia maggiore di quella determinata all'interno di essi. Utilizzando un p-value di 0,05, l'ANOVA indica se è presente una significativa differenza tra i gruppi analizzati per una stessa variabile. I requisiti necessari per poter applicare l'ANOVA sono la distribuzione normale degli errori e l'uniformità della varianza nei gruppi esaminati. Per eseguire questo test statistico è stata utilizzata la funzione "aov" del pacchetto "stats" di R. Per analizzare le differenze degli indici di resilienza fra i tre livelli di siccità (lieve, moderata e severa) è stato utilizzato il test di Tukey. Questo test viene normalmente impiegato durante le analisi statistiche per determinare le differenze significative fra vari livelli di un fattore indipendente. Le differenze significative vengono visualizzate graficamente tramite lettere differenti (es: "a" diverso da "ab" diverso da "b"). Questo test è stato eseguito tramite le funzioni "TukeyHSD" e "HSD.test" rispettivamente dei pacchetti "stats" e "agricolae".

3. RISULTATI

3.1 Altezza e diametro

È possibile osservare come, nonostante si fosse cercato di raccogliere i campioni da soggetti simili basandosi su altezza e diametro, vi sia una differenza significativa tra i due plot. Si può assumere che vi è una differenza significativa fra i gruppi analizzati quando il valore p risulta minore di 0,05 (Stale et al. 1989). Possiamo osservare come sia l'altezza che il diametro del plot 2 risultino superiori al plot 1 (fig.13).

L'altezza media del plot 2 risulta essere infatti di 22,9 m (± 2.5 m) mentre quella del plot 1 di 20.5 m (± 1.8 m). Il diametro medio del plot 1 risulta essere di 42,3 cm (± 2.7 cm) mentre nel plot 2 risulta essere di 45,5 cm ($\pm 3,1$ cm).

La lista completa dei valori di diametro e altezza misurati durante il lavoro di campo è presente in Allegato1.

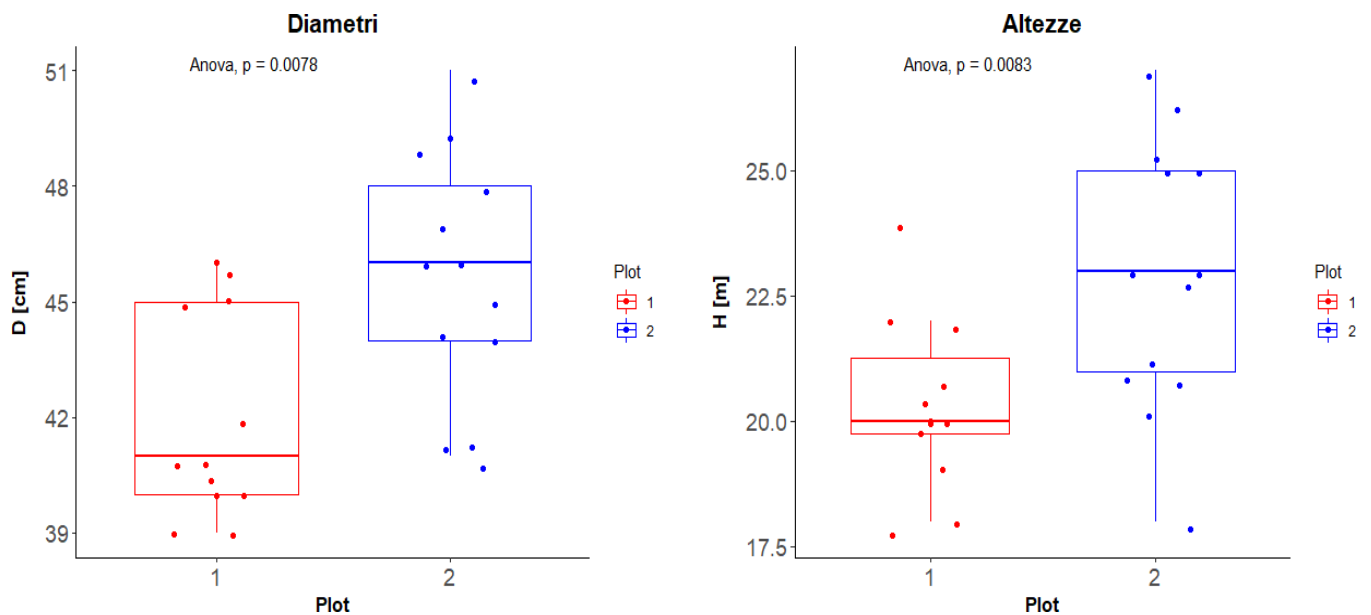


Figura 13: Diametri (a sinistra) e Altezze (a destra) dei plot analizzati. Plot 1 in rosso e Plot 2 in blu

3.2 Cronologie di accrescimento

Si è riscontrato che il plot 1 presenta picchi di accrescimento in maggior misura e più marcati rispetto al plot 2. Per il plot 1 il maggior accrescimento si riscontra nel 2014, mentre quello di minor crescita nel 2003, anno risultato estremamente siccitoso. Il plot 2 invece tende ad avere un andamento meno discontinuo, mostrando il suo suo picco di massimo accrescimento nell'anno 2002, mentre quello dove il TRI è stato minore risulta essere l'anno 2001, quasi al pari del 2003.

Si può vedere come l'accrescimento abbia comunque un andamento comparabile tra i due plot, avendo molti picchi che si sovrappongono (fig.14). Date le differenze fra le due cronologie l'analisi dell'adattamento alle condizioni di siccità verrà effettuato distinguendo fra i due plot.

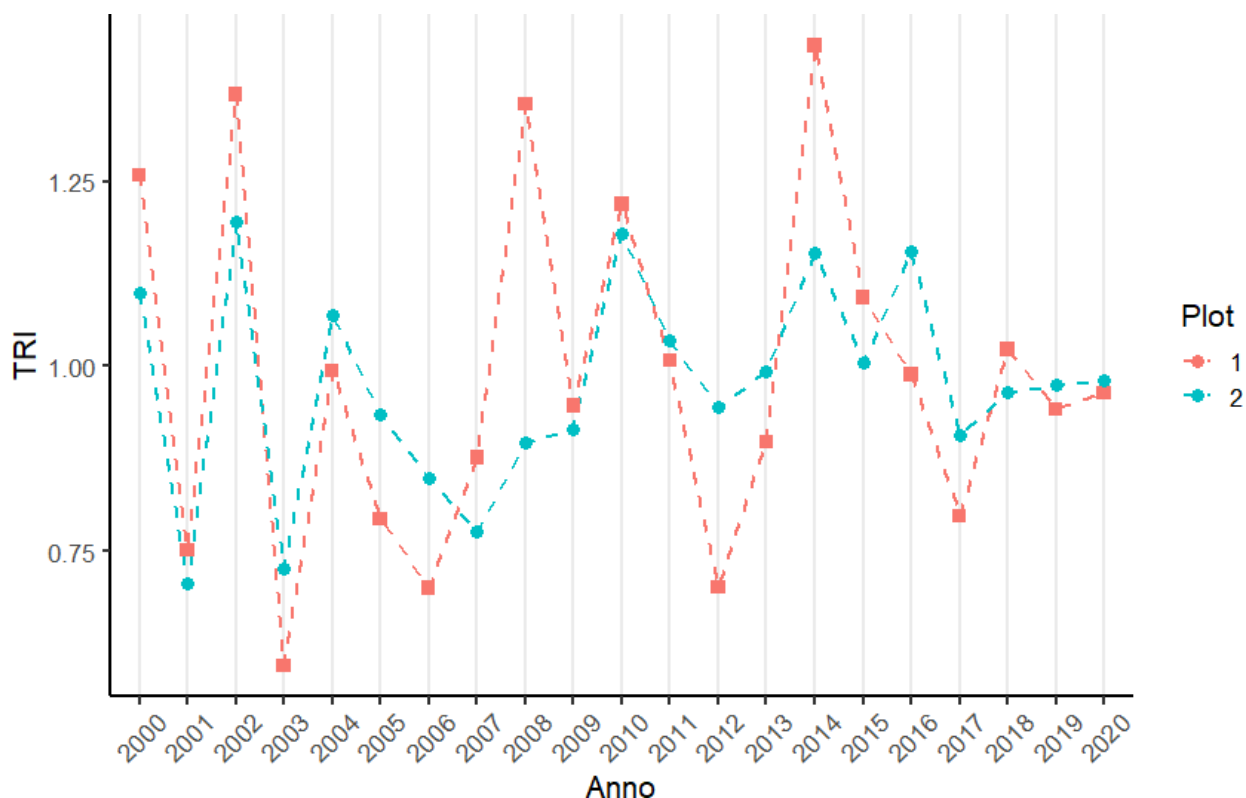


Figura 14: rappresentazione grafica dell'indice di accrescimento degli anelli (TRI) in corrispondenza degli anni. In rosso il plot 1 in blu il plot 2

3.3 Autocorrelazione

Viene mostrata l'autocorrelazione parziale fra gli anelli (fig.15). Non risulta esserci autocorrelazione fra gli accrescimenti annuali vicini poiché nessuno dei due plot mostra valori superiori o inferiori la soglia di correlazione significativa ($p < 0.05$).

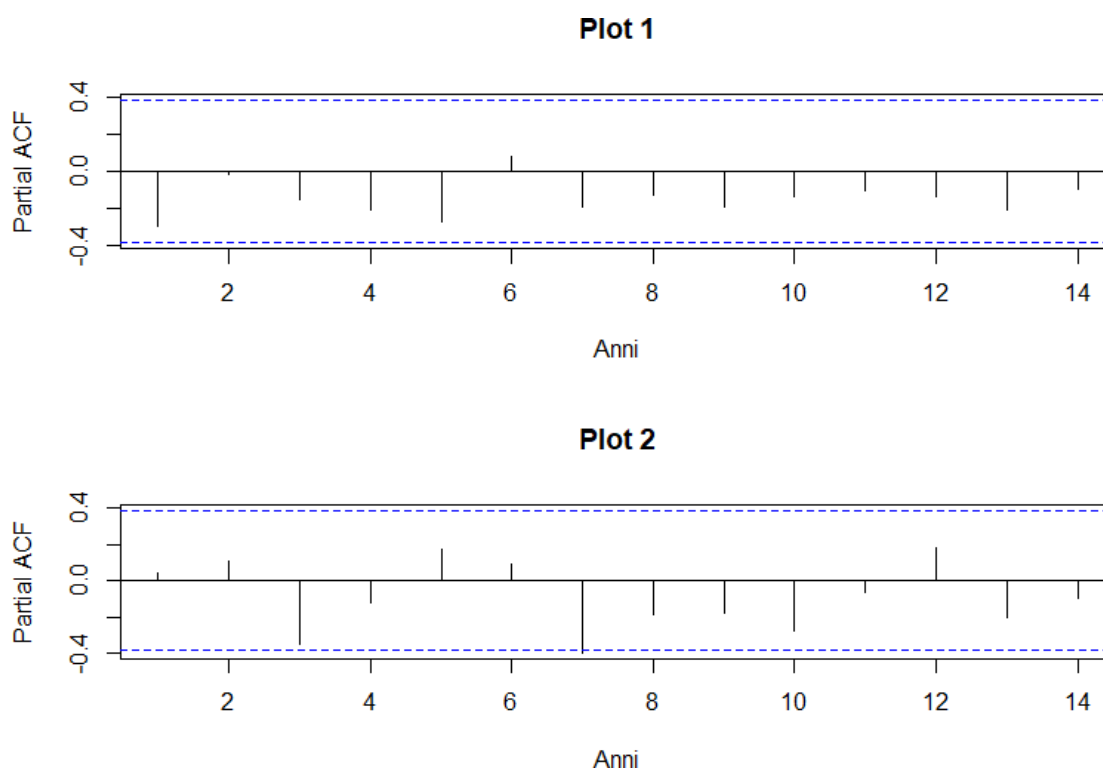


Figura15: Grafico dell'autocorrelazione parziale fra gli anelli di accrescimento. Sull'asse delle X è rappresentato per ogni anello, il numero di anelli (anni) vicini a lui; sull'asse delle Y sono indicati i coefficienti di autocorrelazione. Con le linee tratteggiate blu si indica la soglia di autocorrelazione positiva o negativa

3.4 SPEI

L'indice di SPEI mostra una continua alternanza tra periodi favorevoli e siccitosi (fig. 17).

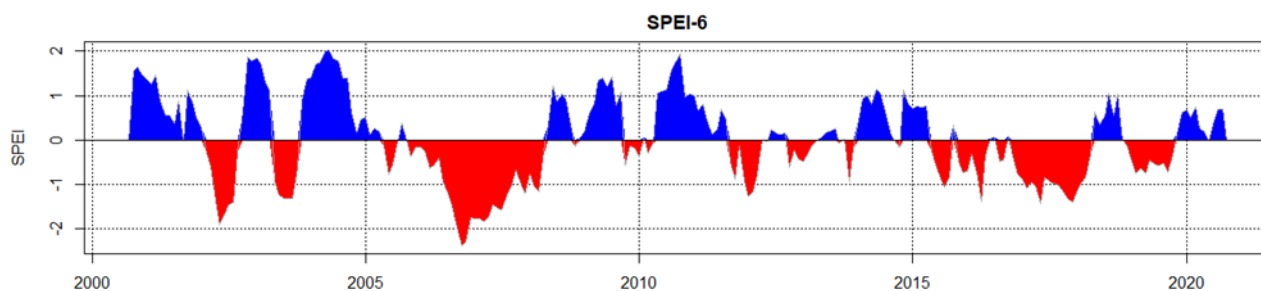


Figura 17: Grafico riportante i livelli di intensità della siccità in una scala temporale, in rosso gli anni siccitosi.

Le annate di siccità lievi sono quelle maggiormente presenti, riscontrate negli anni: 2002, 2011, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2019. Riscontriamo solo tre annate di moderata intensità negli anni: 2003, 2007 e 2017. Infine è stata riscontrata una sola annata di siccità severa avvenuta nel 2006 (fig.18)

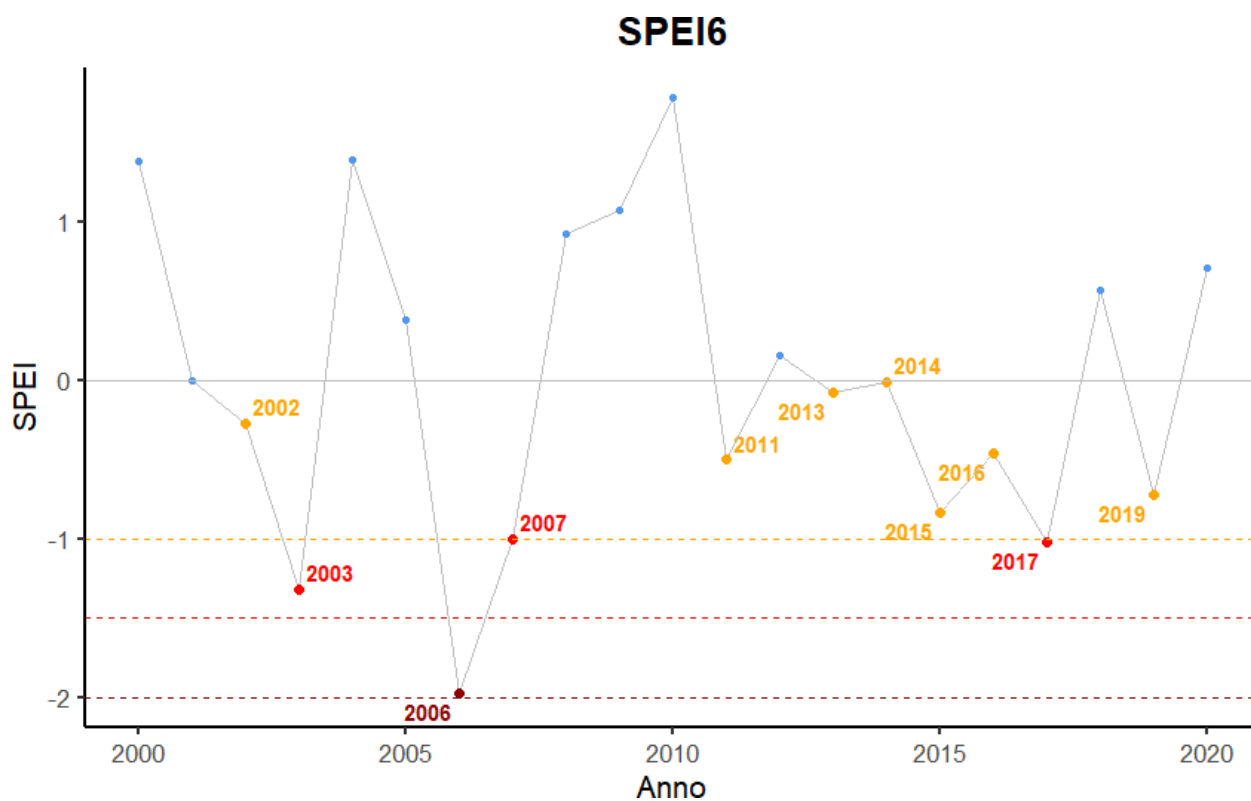


Figura 18: Grafico riportante i risultati dell'indice SPEI nelle varie annate

3.5 Resistenza

Il primo dei tre valori di nostro interesse è la resistenza (fig.19). Tramite l'ANOVA possiamo vedere come non vi sia una significativa differenza tra i due plot. Come resistenza alla siccità lieve sia il plot 1 che il 2 mostrano avere quasi lo stesso indice di resistenza, infatti per il plot 1 riscontriamo un valore di 1.103 (± 0.11), mentre quella del plot 2 risulta essere di 1.061 (± 0.066). Qualora la siccità si mostri più elevata vediamo come per entrambi i plot cali l'indice di resistenza. Nel plot 1 in condizioni di siccità moderata viene riscontrato un indice di 0.773 (± 0.109) mentre per il plot due risulta essere pari a 0.782 (± 0.119). Infine nei casi di siccità elevata riscontriamo come indici rispettivamente 0.782 (± 0.119) e 0.828 (± 0.148) per il plot 1 e 2. Questo può essere osservato anche guardando le lettere presenti sopra i punti, esse infatti ci mostrano statisticamente la differenza tra i plot, dove al variare della lettera avremo una variazione significativa dell'indice di resistenza. Pertanto è possibile vedere come vi sia differenza tra la siccità lieve e moderata/severa, ma relativamente poca tra queste due.

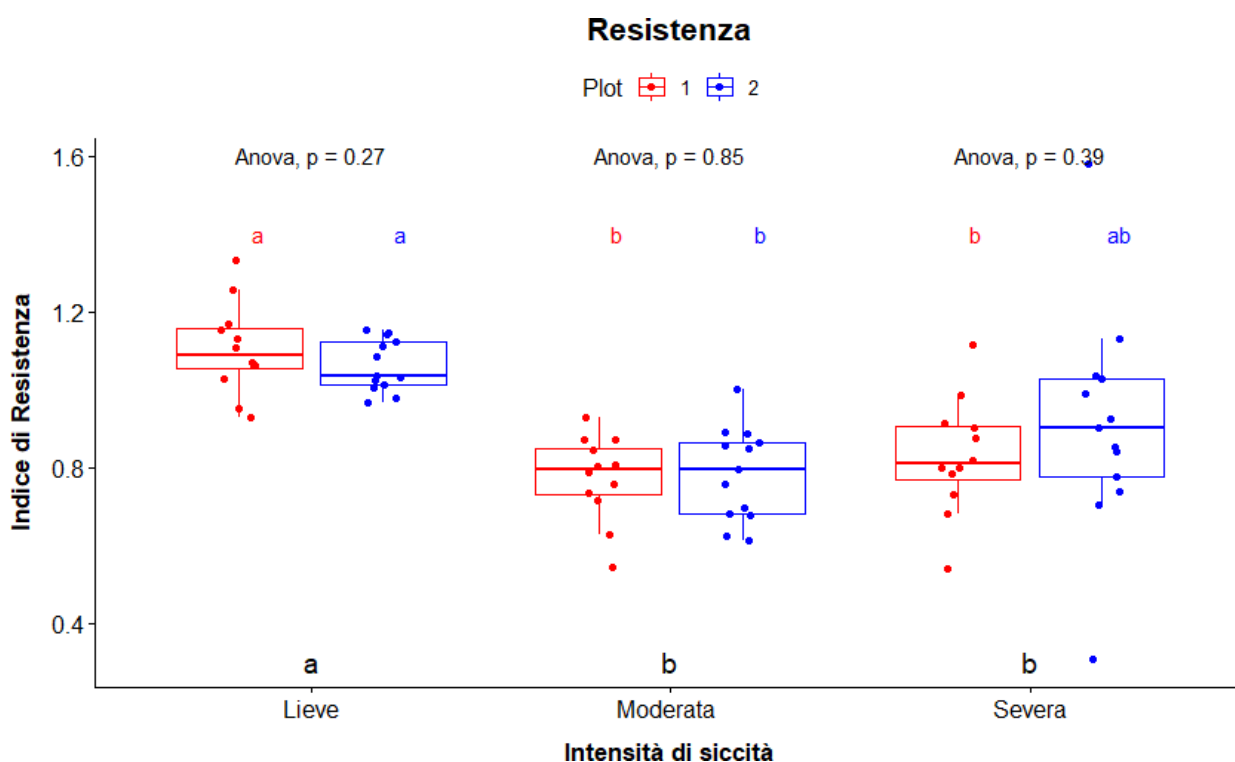


Figura19: rappresentazione grafica dell'andamento dell'indice di resistenza del pino silvestre dopo i periodi di siccità; in rosso il plot 1 e in blu il 2, in nero il valore di ANOVA riporta la significatività tra le differenze tra il plot 1 e il plot 2. Le lettere in rosso illustrano la differenza statistica tra indice di resistenza nelle classi Lieve moderata e severa per il plot 1, mentre le lettere in blu per il plot 2, secondo il test di Tukey. Le lettere in nero sotto i box plot rappresentano le differenze statistiche di IR tra le classi di siccità sui valori dei due plot aggregati, secondo il test di Tukey.

3.6 Recupero

Anche in questo caso il valore di ANOVA ci mostra come non vi sia una significativa differenza tra i due plot. Ciò che possiamo osservare è come i soggetti in esame rispondano con un minor indice di recupero alle siccità lievi, con valori di 0.916 (± 0.111) per il plot 1 e di 0.976 (± 0.135) per il plot 2. Contrariamente, osserviamo un maggior tasso di ripresa in condizioni più sfavorevoli riscontrando un valore di 1.483 (± 0.222) nel plot 1 e 1.448 (± 0.376) nel plot due in situazioni di siccità moderata. Infine abbiamo la siccità severa dove i valori di ripresa risultano essere di 1.493 (± 0.283) per il plot 1 e 1.340 (± 0.621) per il plot 2 (fig. 20).

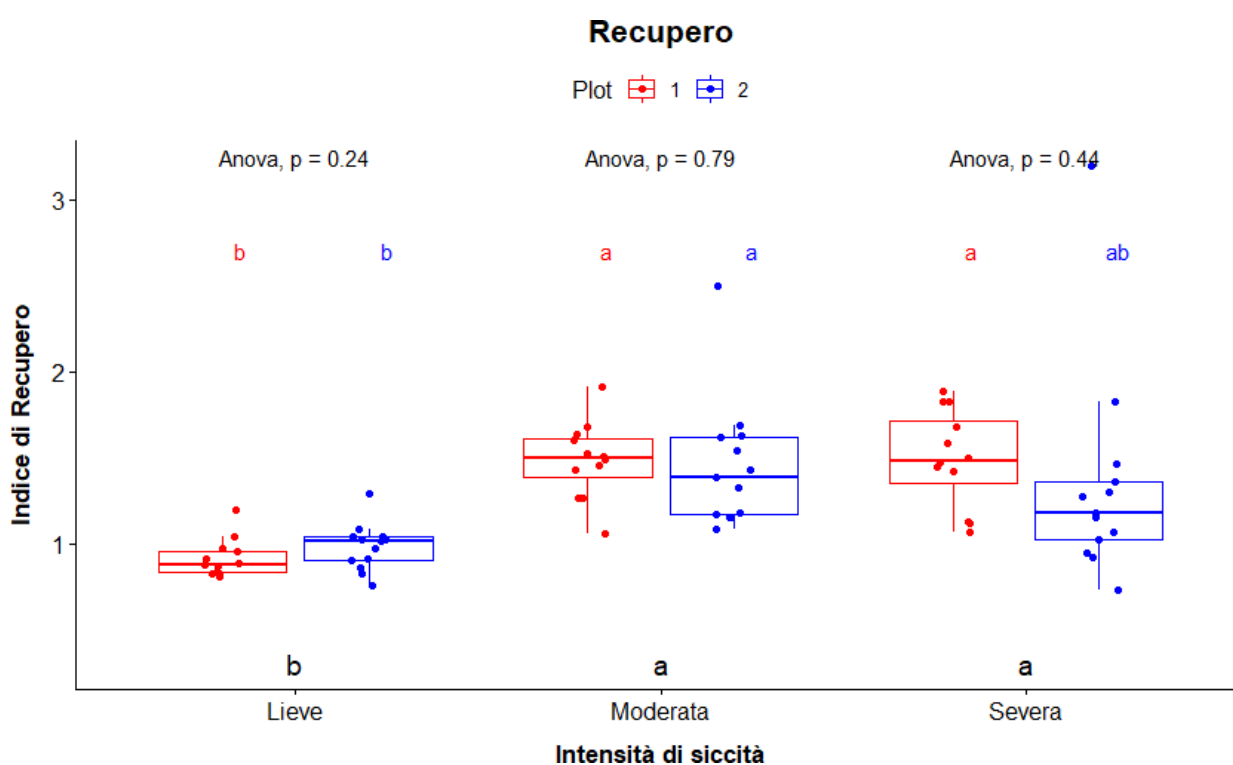


Figura 20: rappresentazione grafica dell'andamento dell'indice di recupero del pino silvestre dopo i periodi di siccità; in rosso il plot 1 e in blu il 2, in nero il valore di ANOVA riporta la significatività tra le differenze tra il plot 1 e il plot 2. Le lettere in rosso illustrano la differenza statistica tra indice di resistenza nelle classi Lieve moderata e severa per il plot 1, mentre le lettere in blu per il plot 2, secondo il test di Tukey. Le lettere in nero sotto i box plot rappresentano le differenze statistiche di IR tra le classi di siccità sui valori dei due plot aggregati, secondo il test di Tukey.

3.7 Resilienza

Arriviamo in fine all'ultimo valore di nostro interesse, la resilienza mostrata dal pino silvestre nei periodi di siccità (fig. 21). Anche in questo caso possiamo osservare come non vi è una significativa differenza tra i due plot in esame, in quanto il valore ANOVA non risulta mai inferiore a 0.05. Si è riscontrato come sia durante i periodi di siccità lieve che moderata l'indice di resilienza non mostri una significativa differenza nei due plot. L'indice di resilienza del plot 1 in condizioni di lieve siccità risulta essere infatti di 0.965 (± 0.088), molto simile a quello del plot 2 che risulta essere di 0.978 (± 0.078). Per le condizioni di moderata siccità riscontriamo nel plot 1 un indice di 1.024 (± 0.090) mentre nel plot 2 di 0,966 (± 0.046), anche in questo caso non vi è una significativa differenza. Il pino silvestre mostra avere una miglior resilienza in periodi severi, in questo l'indice di resilienza del plot uno è di 1.209 (± 0.189) mentre quello del plot due risulta essere leggermente più basso con un valore di 1.09 (± 0.210).

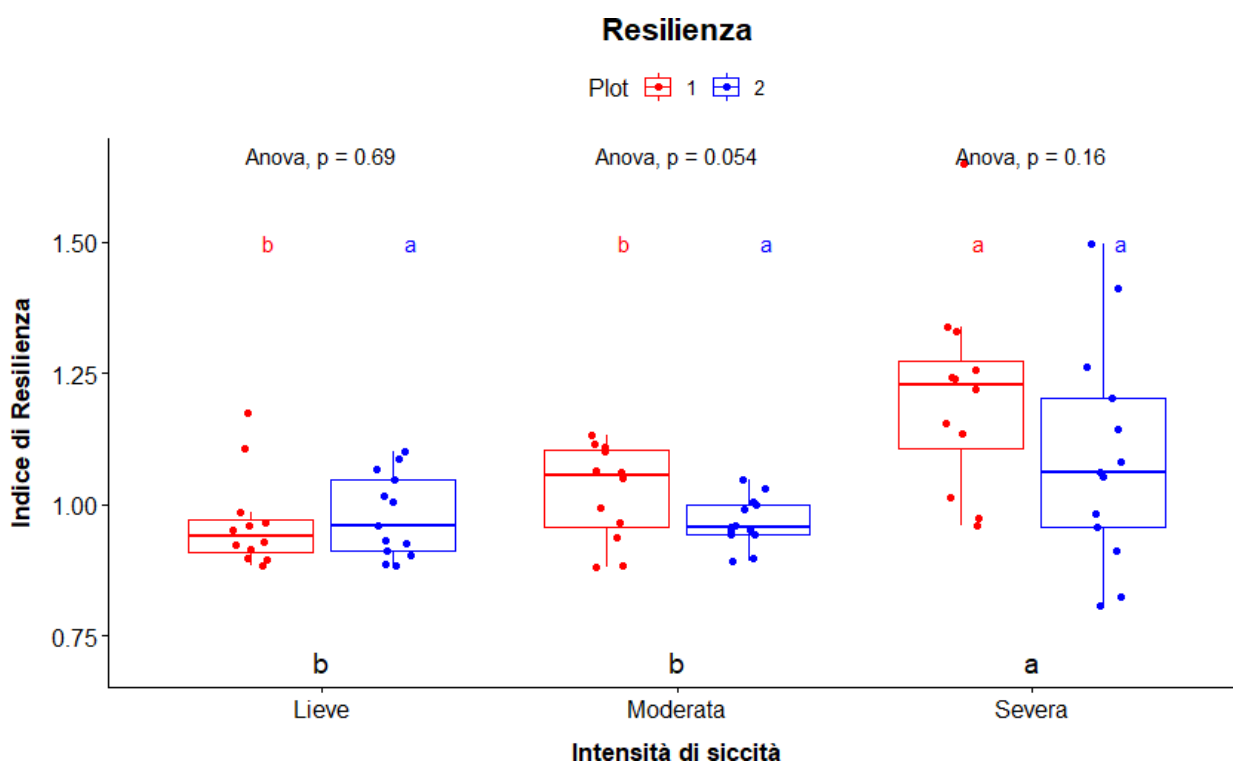


Figura 21: rappresentazione grafica dell'andamento dell'indice di resilienza del pino silvestre dopo i periodi di siccità; in rosso il plot 1 e in blu il 2, in nero il valore di ANOVA riporta la significatività tra le differenze tra il plot 1 e il plot 2. Le lettere in rosso illustrano la differenza statistica tra indice di resistenza nelle classi Lieve moderata e severa per il plot 1, mentre le lettere in blu per il plot 2, secondo il test di Tukey. Le lettere in nero sotto i box plot rappresentano le differenze statistiche di IR tra le classi di siccità sui valori dei due plot aggregati, secondo il test di Tukey.

4. DISCUSSIONE

Confrontando i due plot abbiamo osservato come, nonostante si fosse cercato di raccogliere i campioni da piante le più simili possibile, siano state riscontrate significative differenze sia per quanto concerne le altezze, che per quanto riguarda i diametri. Infatti si è riscontrato come i valori di altezza e diametro fossero significativamente maggiori nel plot 2 rispetto al plot 1. Data la metodologia di analisi utilizzata, che si concentrava sugli ultimi 20 anni di accrescimento, non è stato possibile datare correttamente le piante, impedendoci di valutare se questa differenza dipenda da uno scostamento delle età o da altri fattori ambientali. Un'altra possibile lacuna dello studio potrebbe essere riscontrata nel numero di alberi scelti per il campionamento: 15 a plot. Altri studi, però, confermano come questo campione possa essere ritenuto rappresentativo di una popolazione ai fini dello studio dell'accrescimento del pino silvestre (Bogino et al. 2009). Un ulteriore fattore limitante di questa ricerca è il fatto che sono stati campionati soltanto esemplari vivi, non avendo valutato e analizzato i possibili soggetti morti a causa delle condizioni climatiche.

Comparando le due cronologie riguardanti il TRI abbiamo osservato come le piante del plot 1 esibiscano una maggior variabilità nell'accrescimento annuale, sia in termini di massima che di minima, rispetto al plot 2 che risulta avere accrescimenti annuali meno variabili. Una causa di questo andamento potrebbe essere la differenza di età, infatti il plot 2 risulta essere quello in cui sono state riscontrate le piante di dimensioni maggiori.

Un importante fattore da tenere in considerazione è come cambi la risposta tra piante adulte e esemplari giovani. Secondo diversi studi risulta che gli esemplari giovani presentino una miglior risposta alla siccità, sia in termini di ripresa che di resistenza. Tale capacità è da imputare alla più alta abilità di adattamento che presentano le giovani piante in fase di accrescimento. Come strategia esse mostrano che dopo il primo anno di siccità sono state in grado di sviluppare aghi più corti, al fine di ridurre l'evapotraspirazione, andando così ad aumentare la propria resistenza (Wohlgemuth et al. 2017). Un altro fattore che favorisce i giovani esemplari risulta essere la stratificazione nelle chiome da parte di piante più grandi, poiché le condizioni che vengono a crearsi al di sotto di esse (temperatura, radiazione solare e umidità) fornirebbero loro migliori condizioni di crescita durante le stagioni siccitose (Aussenac, 2000). Contrariamente a quanto riportato sopra, alcuni testi sostengono che le giovani piante a causa dell'apparato radicale poco sviluppato sarebbero maggiormente colpiti dalla carenza di acqua (Orwig e Abrams, 1997; Pichler e Oberhuber, 2007). Altri ancora riportano come non vi sia una correlazione tra resilienza e dimensioni (Mérian e Lebourgeois, 2011).

Durante l'analisi sulla resistenza si è osservato come entrambi i plot mostrino una risposta migliore durante le siccità lievi, patendo maggiormente quelle moderate e severe. Si riscontra comunque come gli andamenti siano estremamente simili in entrambi i plot.

Il fatto che si riscontri lo stesso andamento in entrambi i plot ci fa escludere che l'età o le dimensioni dei soggetti campionati possano avere un ruolo significativo sulla resistenza, limitatamente alle età e alle dimensioni rappresentate in questo studio.

Osservando i risultati degli indici di recupero si può notare come non vi sia una significativa differenza tra i due plot. Un fattore interessante è il fatto che, se messi a confronto i due grafici, mostrano come gli andamenti riscontrati durante i diversi livelli di siccità tendano a bilanciarsi. Si può notare infatti che durante annate lievi abbiamo un alto livello di resistenza ma un basso livello di recupero. Contrariamente, durante annate di siccità moderata e severa avremo un basso indice di resistenza ma un alto indice di ripresa.

Questa tendenza del pino silvestre a compensare la resistenza con la ripresa può essere osservata anche nella retta di regressione, che mette in relazione la ripresa con la resistenza (fig. 22). Possiamo infatti notare come, all'aumentare dell'indice di resistenza, tenda a diminuire quello della ripresa; contrariamente, quando si presenta un alto tasso di ripresa, avremo un basso indice di resistenza.

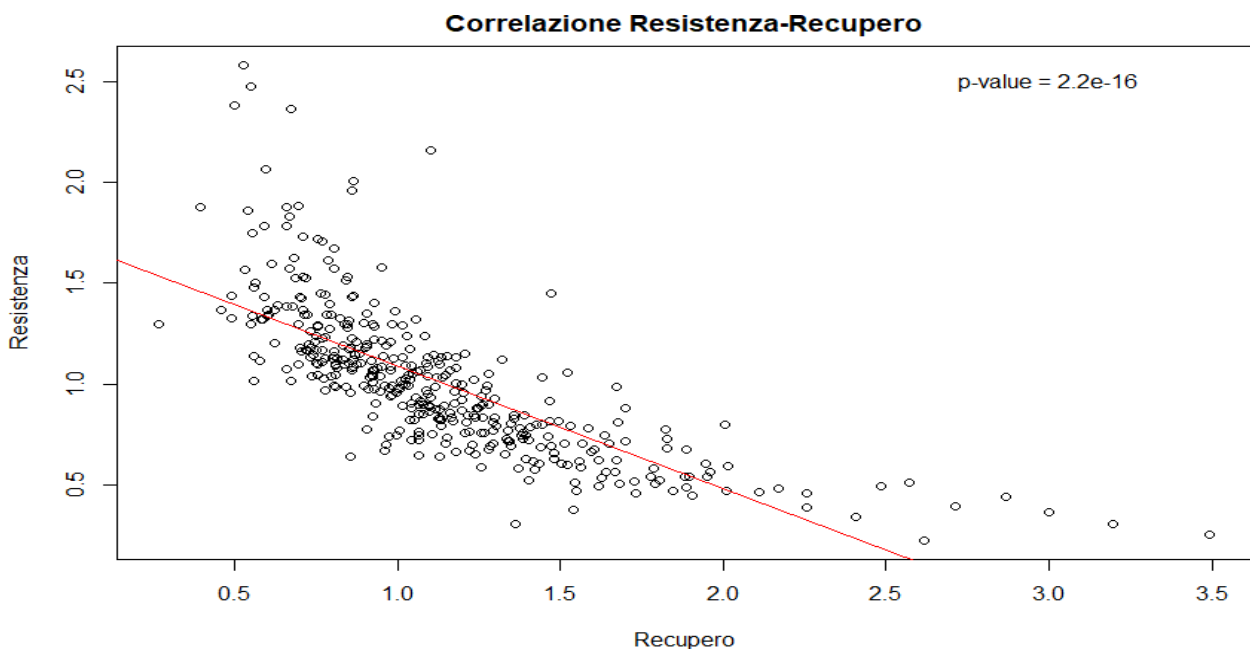


Figura 22: rappresentazione grafica dell'indice di recupero messo in relazione con quello di resistenza

Diversi studi mostrano come spesso le piante, per sopravvivere e superare momenti di crisi, decidano di adottare una strategia nota come "bet hedging". Nel nostro caso questa strategia prevede che

durante le annate siccitose, piuttosto che puntare sull'accrescimento, le piante vadano ad aumentare le loro riserve di carbonio sotto forma di amido, così da poter avere uno sviluppo maggiore non appena si manifestino delle condizioni più favorevoli (Duan et al., 2015; Gruber et al., 2012; Muller et al., 2011).

Durante le stagioni di siccità la pianta per ridurre l'evapotraspirazione tende a chiudere gli stomi, ma questo porta al fatto che la pianta non è più in grado di assimilare CO₂. Questo fa sì che la pianta debba trovare un giusto equilibrio tra la perdita di acqua e l'impossibilità di assimilare carbonio dall'atmosfera, adottando strategie differenti in base alle condizioni nelle quali essa versa.

Come riscontro dalle analisi è emerso come il pino silvestre preferisca aumentare la sua resistenza durante le siccità lievi, a discapito della ripresa. In maniera differente durante i periodi di siccità moderata e severa adotti la medesima strategia: diminuire l'accrescimento e la resistenza durante il periodo sfavorevole per poi avere una maggiore ripresa nelle annate successive. Una delle caratteristiche che favoriscono il pino in queste situazioni è data dal fatto che sia in grado di mantenere la fotosintesi durante le stagioni più fredde, grazie alle sue foglie sempreverdi. Questo fenomeno gli permette di dipendere molto meno dalle riserve accumulate durante l'anno precedente per un recupero post siccità (Michelot et al. 2012).

Un dato molto interessante che siamo infine riusciti ad ottenere con questo lavoro è l'indice di resilienza, esso ci mostra come il pino silvestre riesca ad affrontare in maniera più che apprezzabile le siccità, mostrando una buona ripresa soprattutto quando messo in condizioni di siccità severa.

Alla base di questo lavoro vi era il determinare se il pino silvestre fosse una specie in grado di resistere alle sempre crescente siccità estiva, e per tanto se fosse una pianta da avvantaggiare in un'ottica di progettazione selvicolturale nel parco del Ticino. Abbiamo visto come il pino mostri dei buoni indici di resilienza alle sempre crescenti siccità.

Il pino silvestre si mostra come una specie dalla buon resilienza alla siccità, ma in un contesto di pianificazione forestale è necessario un confronto con le principali specie presenti nel nostro areale di interesse, che nella zona nord risultano essere il castagno e la quercia.

Mettendo a confronto il pino silvestre con il castagno risulta che quest'ultimo, nelle medesime condizioni climatiche, risulti soffrire-maggiormente la siccità e la scarsità di acqua nel terreno che le future condizioni climatiche prevedono. Anche la posizione a quote ridotte, e con temperature più elevate risulta essere forte fonte di stress per il castagno. Un ulteriore problematica che affligge il castagno è quello della cipollatura, causata dall'alternarsi di anni "normali" e anni siccitosi (Manetti

et al. 2017). Tenendo conto di questi fattori è possibile affermare come il castagno risulti maggiormente svantaggiato in una competizione se paragonato al pino silvestre.

L'altra pianta maggiormente presente nella zona nord del Ticino è la quercia, che a differenza del castagno, sembra avere una risposta migliore alla crescente siccità. Uno studio ha infatti dimostrato come la quercia ed il pino silvestre mostrino una resilienza alla siccità molto simili (Merlin et al. 2015). La principale differenza tra queste due specie sta nel momento critico. Infatti risulta che la quercia a causa del suo ciclo biologico tenda a soffrire maggiormente la siccità primaverile, a differenza del pino che è maggiormente resistente in questa prima fase della stagione. Al contrario il pino risulta più vulnerabile allo stress durante l'estate.

Questa differenza si riscontra a causa della diversa natura biologica delle due specie. Normalmente qualora il pino dovesse affrontare uno stress siccitoso durante la primavera, può interrompere la sua crescita per evitare danni strutturali, come traumi alle trachee dovuti alla cavitazione che può insorgere a causa della poca presenza di acqua, riprendendo l'attività appena la stagione risulta maggiormente favorevole. L'esito di tale processo si riscontrerebbe grazie alla presenza di anelli più larghi durante gli anni di siccità primaverile, contrariamente a quello che si riscontrerebbe nella quercia. Al contrario la siccità estiva risulta più dannosa per il pino poiché in quella fase della stagione vegetativa si sta avendo il massimo sviluppo degli aghi, indispensabili alla pianta per fotosintetizzare e di conseguenza indispensabili alla crescita (Merli et al 2015).

Possiamo infine sottolineare come la quercia ed il pino silvestre siano rivali e complementari, entrambi con una buona resilienza anche se distribuita in maniera differente. Pertanto si può tenere in considerazione anche questa differenza qualora si decidesse di attuare un piano selviculturale finalizzato a modificare la struttura forestale del parco del Ticino.

5 CONCLUSIONI

Questo studio si era preposto il compito di valutare la risposta alle recenti siccità del *Pinus sylvestris* nel parco del Ticino. Lo scopo delle analisi è determinare se, in un'ottica di pianificazione forestale, il pino silvestre sia una pianta in grado di sopravvivere e adattarsi bene in futuro in un'ottica di cambio climatico, è quindi essere favorita nella pianificazione forestale.

I risultati ci mostrano come la pianta abbia sviluppato un adattamento tale da attuare due differenti processi a seconda dell'intensità della siccità. Durante le siccità più lievi si è riscontrato come il pino silvestre dimostri una maggiore resistenza, ma un minor indice di recupero. Diversamente durante le siccità moderate e severe si è riscontrato come vi sia una diminuzione dell'indice di resistenza, ma un aumento di quello del recupero. Mettendo a confronto questi due valori si è notata una compensazione tra di essi, dove all'aumentare della resistenza si ha un calo del recupero e viceversa. Questo bilanciamento risulta evidente quando si va ad osservare l'indice di resilienza, che grazie a questa compensazione mostra lo stesso valore di resilienza durante le siccità lievi e moderate, ed una resilienza maggior durante quelle estreme. Grazie a questa strategia il pino silvestre mostra in generale di avere una buona resilienza alla siccità.

Il pino silvestre si dimostra un buon candidato in un'ottica di pianificazione forestale, anche quando messo a confronto con le specie maggiormente presenti nella zona nord del parco. Risulta infatti che la sua resilienza sia maggiore a quella del castagno (specie forestale più abbondante all'interno del parco assieme alla quercia), il quale soffre la siccità e la mancanza di acqua. Mentre paragonando il pino alla quercia risulta che queste due piante siano molto simili dal punto della resilienza; la differenza sta nella stagione critica nelle quale maggiormente soffrono gli effetti della siccità, l'estate per il pino silvestre e la primavera per la quercia.

Dato il rapido cambio climatico, una buona pianificazione forestale risulta fondamentale per garantire il mantenimento e la salute delle foreste del parco. In quest'ottica il pino silvestre si mostra un ottimo soggetto avendo un buon indice di resilienza. Il passo successivo per il proseguimento dello studio è capire quale stagione sarà più colpita da siccità in un'ottica di cambio climatico, per studiare quale specie sia da favorire maggiormente nel parco del Ticino: il pino o la quercia.

6 BIBLIOGRAFIA

- Abramowitz, M. & Stegun, I. A. 1965. Handbook of Mathematical Functions, with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Publications, 1046 pp
- Adams, J., & Wang, J. (2009). Industrial clusters and regional economic development in China: the case of “green” food. *Journal of Chinese Entrepreneurship*.
- Armenise, V. (1950). Ciclo di Accrescimento E Differenziazione Delle Gemme in Piante Perenni Nel Territorio di Bari. *Plant Biosystem*, 57(3), 391-417.
- Aussenac, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of forest science*, 57(3), 287-301.
- Bachofen, C., Moser, B., Hoch, G., Ghazoul, J., & Wohlgemuth, T. (2018). No carbon “bet hedging” in pine seedlings under prolonged summer drought and elevated CO₂. *Journal of Ecology*, 106(1), 31-46.
- Beck, S., & Mahony, M. (2018). The IPCC and the new map of science and politics. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 9(6), e547.
- Bogino, S., Fernandez Nieto, M. J., & Bravo, F. (2009). Climate effect on radial growth of *Pinus sylvestris* at its southern and western distribution limits. *Silva Fennica*, 43(4), 609-623.
- Borghetti, M., La Mantia, T., Menozzi, P., & Piotti, A. (2012). Probabili impatti del cambiamento climatico sulla biodiversità delle foreste italiane. *Forest @ - Journal of Silviculture and Forest Ecology*, 9 (6), 245.
- Bosello, F. (2017). I costi del cambiamento climatico in Italia. Criticità di valutazione e stime economiche. *Equilibri*, 21(2), 226-233.
- Cooper, CF (1978). Cosa potrebbe significare il cambiamento climatico indotto dall'uomo? *Affari esteri*, 56 (3), 500-520.
- Crowley, T. J. (2000). Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 289(5477), 270-277.
- Davini, P., Cagnazzo, C., Fogli, P. G., Manzini, E., Gualdi, S., & Navarra, A. (2014). European blocking and Atlantic jet stream variability in the NCEP/NCAR reanalysis and the CMCC-CMS climate model. *Climate dynamics*, 43(1-2), 71-85.
- dos Santos, C. A., Mariano, D. A., Francisco das Chagas, A., Dantas, F. R. D. C., de Oliveira, G., Silva, M. T., ... & Neale, C. M. (2020). Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 102 .

- Duan, H., O'Grady, A. P., Duursma, R. A., Choat, B., Huang, G., Smith, R. A., ... & Tissue, D. T. (2015). Drought responses of two gymnosperm species with contrasting stomatal regulation strategies under elevated CO₂ and temperature. *Tree Physiology*, 35, 756–770.
- Ducci, D., & Tranfaglia, G. (2005). L'impatto dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche sotterranee della Campania. *Geologi (Boll Ordine Geologi Della Campania)*, 1, 13-21.
- Frisia, S. (2007). Sintesi delle conoscenze sulla variabilità climatica nelle Alpi negli ultimi 1000 anni. *Studi Trentino Sci Natura., Acta Geol*, 82, 65-69.
- Goetz, R. U., Hritonenko, N., Mur, R., Xabadia, À., & Yatsenko, Y. (2013). Forest management for timber and carbon sequestration in the presence of climate change: The case of *Pinus Sylvestris*. *Ecological Economics*, 88, 86-96.
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA 86-97-115.
- Gruber, A., Pirkebner, D., Florian, C., & Oberhuber, W. (2012). No evidence for depletion of carbohydrate pools in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under drought stress. *Plant Biology*, 14, 142–148.
- Gustafsson, D., Stale, H., Björkman, J. A., & Gennser, G. (1989). Derivation of haemodynamic information from ultrasonic recordings of aortic diameter changes. *Ultrasound in medicine & biology*, 15(3), 189-199.
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement, 17.
- Larcher, L., Paccagnella, A., & Ghidini, G. (2001). A model of the stress induced leakage current in gate oxides. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48(2), 285-288.
- Lloret, F., Keeling, E. G., & Sala, A. (2011). Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos*, 120(12), 1909-1920.
- MacGillivray, C. W., Grime, J. P., & The Integrated Screening Programme (ISP) Team. (1995). Testing predictions of the resistance and resilience of vegetation subjected to extreme events. *Functional Ecology*, 640-649.
- Manetti, M. C., Becagli, C., Carbone, F., Corona, P., Giannini, T., Romano, R., & Pelleri, F. (2017). Linee guida per la selvicoltura dei cedui di castagno. Rete Rurale Nazionale, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Roma, 237.
- Mason, W. L., & Alía, R. (2000). Current and future status of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in Europe. *Forest Systems*, 9(1), 317-335.
- Maximov, N. A. (1929). Internal factors of frost and drought resistance in plants. *Protoplasma*, 7(1), 259-291.
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., ... & Yezpez, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New phytologist*, 178(4), 719-739.

Mérian, P., & Lebourgeois, F. (2011). Size-mediated climate–growth relationships in temperate forests: a multi-species analysis. *Forest Ecology and Management*, 261(8), 1382-1391.

Michelot, A., Simard, S., Rathgeber, C., Dufrière, E., & Damesin, C. (2012). Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. *Tree physiology*, 32(8), 1033-1045.

Morgillo, A., Brunetti, A., & Salvati, L. (2002). La siccità in Italia: spunti di discussione sul clima, sugli aspetti pedoclimatici e sul bilancio idrico. Atti del convegno Aiam “L'agrometeorologia nel Mediterraneo”, Acireale, 145-151.

Muller, B., Pantin, F., Génard, M., Turc, O., Freixes, S., Piques, M., & Gibon, Y. (2011). Water deficits uncouple growth from photosynthesis, increase C content, and modify the relationships between C and growth in sink organs. *Journal of Experimental Botany*, 62, 1715– 1729.

Orwig, D. A., & Abrams, M. D. (1997). Variation in radial growth responses to drought among species, site, and canopy strata. *Trees*, 11(8), 474-484.

Orwig, D. A., & Abrams, M. D. (1997). Variation in radial growth responses to drought among species, site, and canopy strata. *Trees*, 11(8), 474-484.

Peters, R. L., Groenendijk, P., Vlam, M., & Zuidema, P. A. (2015). Detecting long-term growth trends using tree rings: a critical evaluation of methods. *Global change biology*, 21(5), 2040-2054

Pichler, P., & Oberhuber, W. (2007). Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management*, 242(2-3), 688-699.

Pichler, P., & Oberhuber, W. (2007). Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management*, 242(2-3), 688-699.

Pilli, R. (2011). Confronto su base provinciale tra i dati ISTAT sulle utilizzazioni legnose in foresta e la superficie boscata riportata dall'INFC. *Forest@-Journal of Silviculture and Forest Ecology*, 8(4), 113.

Raffalovich, L. E. (1994). Detrending time series: A cautionary note. *Sociological Methods & Research*, 22(4), 492-519.

Rennenberg, H., Loreto, F., Polle, A., Brilli, F., Fares, S., Beniwal, R. S., & Gessler, A. J. P. B. (2006). Physiological responses of forest trees to heat and drought. *Plant Biology*, 8(5), 556-571.

Sabaté, S., Gracia, C. A., & Sánchez, A. (2002). Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *Forest ecology and management*, 162(1), 23-37.

Sala, G., Lauteri, M., La Mantia, T., & Garfi, G. (2016). Climate-growth relationships of *Quercus gussonei* (Borzi) Brullo in the Mediterranean region: adaptive traits and water use efficiency. In COST Action FP1202 MaP-FGR MC final meeting and COST FP1202, EUFORGEN, IUFRO WG 20213 Joint

final conference on “Marginal and peripheral tree populations: a key genetic resource for European forests”. IT.

Shestakova, T. A., & Martínez-Sancho, E. (2020). Stories hidden in tree rings: a review on the application of stable carbon isotopes to dendrosciences. *Dendrochronologia*, 125.

Swetnam, T. W., Allen, C. D., & Betancourt, J. L. (1999). Applied historical ecology: using the past to manage for the future. *Ecological applications*, 9(4), 1189-1206.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.

Tilman, D., & Downing, J. A. (1994). Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 367(6461), 363-365.

Vacchiano, G., Dobbertin, M., Egli, S., Giordano, L., Gonthier, P., Mazzoglio, P. J., ... & Rigling, D. (2008). Il deperimento del pino silvestre nelle Alpi occidentali: natura e indirizzi di gestione, 18,27.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.

Wohlgemuthi, D., Seidl, R., Holeksa, J., Kuuluvainen, T., Nagel, T. A., Panayotov, M., ... & Bebi, P. (2017). A walk on the wild side: disturbance dynamics and the conservation and management of European mountain forest ecosystems. *Forest ecology and management*, 388, 120-131.