



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO**  
**FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI**

CORSO DI LAUREA IN

VALORIZZAZIONE E TUTELA DELL'AMBIENTE E DEL  
TERRITORIO MONTANO

“ANALISI DENDROCLIMATOLOGICA DEI FATTORI CLIMATICI CHE  
INFLUENZANO L'ACCRESIMENTO DI *LARIX DECIDUA* IN  
LOCALITÀ BAZENA (BS)”

Relatore: Prof. Giorgio Vacchiano

Elaborato Finale di: Alessio Lecchi

Matricola: 801646

Anno Accademico 2018-2019



## **INDICE:**

<u>RIASSUNTO</u> .....	3
1. <u>CAPITOLO PRIMO – INTRODUZIONE</u> .....	5
1.1 Obiettivo dell'elaborato finale .....	5
1.2 Variazioni negli ecosistemi .....	5
1.3 Gli alberi come <i>proxy data</i> .....	6
1.4 Accrescimento legnoso .....	6
1.5 Dendrocronologia .....	9
1.6 Principi e concetti della dendrocronologia .....	11
2. <u>CAPITOLO SECONDO – MATERIALI E METODI</u> .....	15
2.1 Specie studiata .....	15
2.1.1 Caratteri botanici e morfologia .....	15
2.1.2 Habitat ed ecologia .....	17
2.1.3 Larice, fattori limitanti e malattie .....	19
2.1.4 Utilizzi del larice e del legno di larice .....	20
2.2 Sito di campionamento .....	21
2.3 Sintesi descrittori climatici Breno .....	25
2.4 Metodo di campionamento e raccolta dati dendrologici .....	25
2.5 Preparazione dei campioni .....	27
2.6 Misura degli accrescimenti legnosi e costruzione delle cronologie ..	27
2.7 Formulario .....	31
3. <u>CAPITOLO TERZO – RISULTATI E DISCUSSIONI</u> .....	32
3.1 Rilievi in campo .....	32
3.2 Analisi delle cronologie medie individuali .....	33
3.3 Cronologia media stagionale .....	34
3.4 Correlazioni climatiche della cronologia media stagionale .....	43
3.5 Confronto con altre cronologie dell'arco alpino .....	49
4. <u>CAPITOLO QUARTO – CONCLUSIONI</u> .....	52
5. <u>APPENDICE</u> .....	55
6. <u>BIBLIOGRAFIA</u> .....	56
7. <u>RINGRAZIAMENTI</u> .....	61



## RIASSUNTO

L'elaborato si basa sullo studio, svolto durante l'attività di tirocinio interno, mirato ad analizzare i principali fattori climatici che influenzano il ritmo di accrescimento di *Larix decidua* (*Larix decidua* sub. *decidua*, Miller, 1768) in località Bazena. L'area di studio è compresa nel territorio comunale di Breno, nella media Valle Camonica, ed è posta ad un'altitudine compresa tra i 1670m s.l.m. ed i 1830m s.l.m.; l'area ricade inoltre all'interno del territorio del Parco dell'Adamello, collocandosi ai suoi confini più meridionali. Il popolamento studiato è classificato come "lariceto subalpino tipico" ed è governato a fustaia con funzione di protezione. L'approccio utilizzato ai fini dell'indagine è stato di tipo dendrocronologico: è stata cioè sfruttata la caratteristica di alcune piante arboree di produrre delle cerchie annuali di accrescimento. Tale fenomeno è regolato dai ritmi dell'attività del cambio cribrovascolare, dipendenti, oltre che da fattori endogeni, dalle condizioni ambientali; il tasso di produzione di nuovo legno è cioè direttamente influenzato da fattori climatici e non climatici. Ne deriva che lo spessore degli anelli di crescita è in stretta relazione con l'andamento dei principali fattori climatici, i quali agiscono principalmente durante la stagione vegetativa. I campionamenti sono stati effettuati nel periodo compreso tra luglio ed agosto 2018, mediante l'utilizzo di una sonda incrementale, il succhiello di Pressler; sono state prelevate due carote legnose da 48 alberi ottenendo un totale di 96 campioni dall'area di saggio. I campioni sono stati fissati su appositi supporti e preparati per la misurazione dello spessore degli anelli di accrescimento e la loro datazione; queste operazioni sono state eseguite tramite l'utilizzo del software "Cybis CooRecorder - Image Coordinate Recording program", mentre i dati ottenuti sono stati elaborati ed analizzati con il software "CDendro - Cybis dendro dating program", entrambi distribuiti dalla "Cybis Elektronik & Data AB". L'elaborazione delle cronologie ha prodotto inizialmente una cronologia media elementare partendo dai due campioni prelevati per ogni pianta; nella fase successiva le singole cronologie sono state sottoposte alla fase di *cross-dating*, necessaria per datare correttamente ogni anello misurato ed escludere errori riconducibili alla presenza di anomalie, dovute principalmente a particolari condizioni dell'attività cambiale o al punto di prelievo del campione nel fusto dell'albero campionato. Le singole cronologie sono state quindi confrontate tra loro, e la parte di esse che presentava valori di correlazione superiori ad una determinata soglia è stata utilizzata per creare la cronologia media stazionale. A questo fine sono state mediate tra loro le 20 cronologie elementari che meglio si correlavano. Successivamente tramite il software Rstudio, Version 1.2.1335© è stata condotta un'analisi dei principali parametri statistici della cronologia media stazionale; quest'ultima è stata sottoposta ad operazioni di *detrending*, atte ad eliminare la fisiologica tendenza di crescita. Questo ha permesso di rendere confrontabili le ampiezze assolute delle 3060 misurazioni effettuate. Si è proceduto successivamente con il calcolo delle correlazioni clima-accrescimento e delle funzioni di risposta. La cronologia stazionale è stata cioè confrontata con le registrazioni dei dati climatici relativi alle precipitazioni cumulate mensili ed alle temperature medie mensili, scaricate dal grigliato di 0,5° di risoluzione messo a disposizione dalla "Climatic Research Unit", University of East Anglia, ottenendo

degli indici di correlazione con una significatività del 95%. Da queste analisi è scaturito che relativamente al sito oggetto di studio il larice pare esser molto sensibile alle precipitazioni di giugno dell'anno  $t-1$  ed a quelle dei mesi invernali, soprattutto febbraio. Sempre per quanto riguarda le relazioni con il regime udometrico, è stata rilevata una correlazione negativa tra l'accrescimento e le precipitazioni cumulate dei mesi estivi dell'anno  $t$  di formazione dell'anello. I mesi di maggio, giugno, luglio ed in minor misura agosto, sono correlati tutti negativamente: in particolar modo l'accrescimento risente dei regimi dei primi due mesi, ove si concentra la maggior parte della crescita effettuata dal larice durante la stagione vegetativa. Relativamente alle temperature, i dati più evidenti sono stati ottenuti riguardo alle correlazioni positive con i mesi autunno-invernali precedenti l'inizio della stagione vegetativa. I mesi di gennaio e marzo dell'anno  $t$  sono invece, anche se meno significativamente, negativamente correlati con le temperature: tale dato risulta di difficile interpretazione, ma potrebbe esser verificato con ulteriori studi. Infine, viene confermata la correlazione positiva riscontrata con le temperature di giugno dell'anno  $t$ , già ampiamente documentata in letteratura. Per quanto riguarda le correlazioni a media mobile di 25 anni, i risultati più significativi sono stati ottenuti per quanto riguarda le precipitazioni dei mesi di inizio stagione vegetativa (correlazione negativa per maggio e giugno anno  $t$ ) e del mese di febbraio dell'anno  $t$  (correlazione positiva). Anche le temperature di ottobre dell'anno  $t-1$  e di febbraio dell'anno  $t$  presentano tendenzialmente una correlazione positiva con la crescita. Il confronto effettuato con altre cronologie stazionali di *Larix decidua* dell'arco alpino conferma la bontà della cronologia media stazionale e la teleconnessione dei dati ottenuti. Quanto ottenuto in quest'analisi delle relazioni tra i principali fattori climatici e l'accrescimento di *Larix d.* in Valle Camonica vuole esser d'appoggio alla conoscenza dei fattori che maggiormente influenzano la crescita di questa specie negli ultimi decenni. Se confermati, tali risultati possono fungere da elementi utili a considerazioni sulla conservazione, diffusione e comportamento di questa conifera rispetto al clima passato, presente e futuro. Inoltre, nonostante non fosse lo scopo perseguito da questo studio, è stata rilevata durante le fasi di analisi dei dati l'importante influenza di *Zeiraphera g.* sull'accrescimento di *Larix d.*; si è visto infatti che, perlomeno negli ultimi 50 anni, gli accrescimenti minori ottenuti dal larice potrebbero esser direttamente collegati ad intense defogliazioni da parte di questo lepidottero. Anche questo aspetto potrebbe essere in futuro meglio indagato, al fine di avere a disposizione dati più precisi e recenti che possano supportare la gestione di *Larix d.* nel territorio della Valle Camonica. Nel Parco dell'Adamello, le formazioni di lariceti puri o di lariceti in successione con pecceta occupano da sole più del 20% del territorio. Dal confronto tra le proiezioni climatiche delle aree considerate, con i risultati ottenuti circa l'influenza dei regimi termo-udometrici annuali, risulta che il larice è una specie la quale potrebbe trarre vantaggio dalle future condizioni ambientali. Il suo areale potenziale potrebbe quindi essere gestito puntando sulla effettiva diffusione e gestione delle formazioni forestali di *Larix d.*

## INTRODUZIONE

Uno degli aspetti rilevanti per l'economia montana è la filiera del legno, la quale può beneficiare di una selvicoltura che permetta di ottenere buone produzioni ed assortimenti di pregio da immettere sul mercato, soprattutto di un legno di valore come quello del larice. I lariceti montani, puri o misti che siano, svolgono inoltre molto spesso una funzione di protezione da frane, smottamenti, consolidando i terreni e versanti più impervi posti ad elevate altitudini. Considerando l'elevata percentuale di territorio montano a livello nazionale (35,2%) ed a livello regionale (40,4%) (<https://www.istat.it/it/files/2014/11/C01.pdf>), di cui la quasi totalità sottoposta a vincolo idrogeologico, l'importanza della difesa dei versanti montani per mezzo di formazioni boschive risulta ben evidente. Il larice date le sue caratteristiche morfologiche ed ecologiche viene considerato tra le specie di maggior efficacia per tali scopi. Questa conifera è inoltre molto apprezzata dai pastori: favorisce infatti una buona fertilità del terreno con un ricco sottobosco, garantendo al contempo riparo per il bestiame. Infine, la valenza in chiave ricreativo-paesaggistica di questa conifera è ben nota, essendo le formazioni di larice molto apprezzate e caratterizzanti.

### 1.1 Obiettivo dell'elaborato finale

I cambiamenti climatici in atto, soprattutto in territori sensibili come le Alpi, possono facilmente alterare il l'equilibrio delle specie forestali con l'ambiente di crescita in cui si sono evolute. La possibilità di monitorare quindi le relazioni che legano l'accrescimento di *Larix d.* all'ambiente che lo circonda, e nondimeno le loro evoluzioni nel tempo, unitamente ad una comprensione sempre più profonda e accurata dei meccanismi che le regolano, è necessaria per salvaguardare, se non migliorare, lo stato di salute di questa conifera nel medio-lungo termine.

### 1.2 Variazioni negli ecosistemi

In ogni ecosistema ciascuna componente biologica, inserita nel proprio habitat e ambito funzionale, è costantemente in relazione con l'ambiente in cui nasce e si sviluppa. Le relazioni esistenti tra le varie componenti e l'ecosistema stesso sono dinamiche ed in continua trasformazione, infatti qualsiasi variazione dello stato energetico, fisico o chimico all'interno del sistema genera una reazione che ha come conseguenza la modifica di una o più di tali relazioni. In conseguenza di ciò, le varie forme viventi, continuamente sottoposte a queste variazioni, mettono in atto delle retroazioni in termini di resistenza, resilienza ed adattamento atte a mantenerli il più vicino possibile al loro optimum vitale. L'intensità, la frequenza e la durata di queste variazioni, che possono esser assimilate a disturbi, influiscono sulle reazioni che le componenti biologiche attuano. Tali reazioni di risposta possono comportare delle modifiche nei processi vitali degli organismi, lasciando delle "impronte", più o meno durature. Queste impronte vanno a costituire un vero e proprio segnale, il quale custodisce informazioni relative al disturbo che le ha generate. Sia a livello di individuo che di popolazione, gli organismi possono funzionare analogamente a dei registratori e fungere da portatori di tale segnale, nel tempo e nello spazio. Per varie

ragioni, può essere utile all'uomo riuscire a captare, ed ancor più a decifrare, questo segnale, da cui poter estrapolare le informazioni ricercate.

### 1.3 Gli alberi come *proxy data*

Gli organismi vegetali hanno sviluppato, nel corso della loro lunga storia evolutiva, sistemi e processi di crescita molto sofisticati e tra i più disparati, colonizzando la maggior parte degli ecosistemi del pianeta. Nello specifico, le piante arboree si sono sviluppate ed adattate a molti habitat, con differenti processi fisiologici e differenti ritmi di crescita. Caratteristica comune alle piante arboree è la capacità di sfruttare la crescita in altezza grazie alla loro peculiare struttura, costituita da un'ossatura legnosa. Ciò garantisce loro un ancoraggio al terreno in cui vivono e la possibilità di raggiungere altezze anche molto elevate. La struttura del legno dipende dalla dinamica della sua formazione, e può, in alcune specie di piante arboree, essere l'archivio storico di eventi accaduti nel passato, che possono aiutarci a definire le caratteristiche della dinamica di crescita e di alcune relazioni ecosistemiche. La maggiore conoscenza di queste ultime può facilitare lo sviluppo di modelli predittivi sempre più accurati, strumenti molto utili nelle valutazioni e nelle scelte, politiche e sociali, che andranno effettuate nel breve-medio periodo a riguardo dei cambiamenti climatici e delle loro ricadute sugli ecosistemi. Gli anelli di accrescimento del legno sono considerati come uno dei principali indicatori *proxy* esistenti in natura, oltre alle carote di ghiaccio, i pollini fossili, i sedimenti marini e lacustri, gli speleotemi, i coralli e gli otoliti. Tra questi, la dendrocronologia fornisce la datazione maggiormente affidabile e con il più elevato grado di accuratezza e precisione (Speer, 2009), oltre ad essere utilizzabile su scala globale (Fritts e Swetnam, 1989; Hughes, 2002). La dendrocronologia è da considerare complementare rispetto alle altre scienze che studiano gli altri *proxy data*: la sua peculiarità sta nel possedere la capacità di registrare eventi inter e intra-annuali, e di conseguenza le informazioni che si possono estrapolare coprono periodi di tempo relativamente lunghi ed un livello di risoluzione elevato. Per la corretta interpretazione delle informazioni contenute negli anelli di accrescimento è necessaria la conoscenza dei processi fisiologici che conducono, a partire da nutrienti ed energia, alla formazione degli anelli stessi.

### 1.4 Accrescimento legnoso

L'accrescimento legnoso è un processo che si svolge durante la stagione vegetativa, quando il cambio cribro-vascolare è attivo. La formazione del legno avviene a diversi ritmi, variando a seconda delle condizioni climatiche stagionali, di quelle stazionali di crescita e del genotipo dell'individuo. Il tasso di accrescimento legnoso è altresì indice della fertilità del terreno, del grado di adattamento di ogni specie al proprio ambiente di crescita e della competizione intraspecifica e interspecifica. Come suddetto, ogni variazione nelle condizioni ambientali produce una risposta, sia nell'individuo che nella popolazione, la quale si può tradurre in una modifica del ritmo di crescita. Le differenti variazioni in atto possono avere un risultato sinergico: ad esempio, l'aumento delle temperature medie e della concentrazione di anidride carbonica nell'aria, supportate da un'adeguata possibilità di approvvigionamento alle risorse idriche e nutritive, possono far aumentare entro certi limiti il ritmo di crescita. Nel caso opposto possono invece risultare tra loro antagoniste, come l'aumento delle temperature medie e massime unitamente alla

scarsità di risorse idriche, causando condizioni di stress che portano ad una diminuzione, fino anche ad un arresto, del ritmo di crescita (Fritts, 1976). Tra i due casi limite sono ovviamente comprese svariate situazioni intermedie. Ogni variazione, o somma di variazioni, può avere effetti positivi oppure negativi contestualmente alle specifiche condizioni ambientali ed alla specie che le subisce. I fattori ambientali, o esogeni, che influenzano l'accrescimento vegetale possono essere sia di natura abiotica che di natura biotica, e tra i principali possiamo elencare: le temperature (medie ed estreme) dell'atmosfera e del suolo, la frequenza e l'intensità delle precipitazioni, il tipo di substrato di crescita, la disponibilità di nutrienti, la quantità di radiazioni luminose, la concentrazione di anidride carbonica ed altre molecole nell'aria, la frequenza ed intensità di eventi estremi e patologie, fenomeni di competizione e di sinergismo; anche l'uomo attraverso la gestione selvicolturale può influire direttamente sui ritmi di accrescimento. Tra i fattori endogeni invece, un ruolo preminente è esercitato dal patrimonio genetico posseduto da ogni individuo, dall'età del singolo individuo e dalla sua storia pregressa.

La formazione degli anelli di accrescimento annuali si ritiene abbia avuto inizio contestualmente allo sviluppo della crescita secondaria delle piante durante la loro evoluzione, nel Devoniano Medio e Superiore (350-400 milioni di anni fa), probabilmente come espressione di cambiamenti climatici (Schweingruber, 1996). Le piante arboree che presentavano anche l'accrescimento secondario si sono poi evolute con grande successo arrivando fino ai giorni nostri; ora la maggior parte delle piante arboree rientrano in questa categoria (tutte le gimnosperme e molte angiosperme). Salvo le dovute eccezioni, solo le piante perenni con crescita secondaria possono mostrare la formazione degli anelli di accrescimento in relazione alla stagionalità del clima (*fig. 1*).

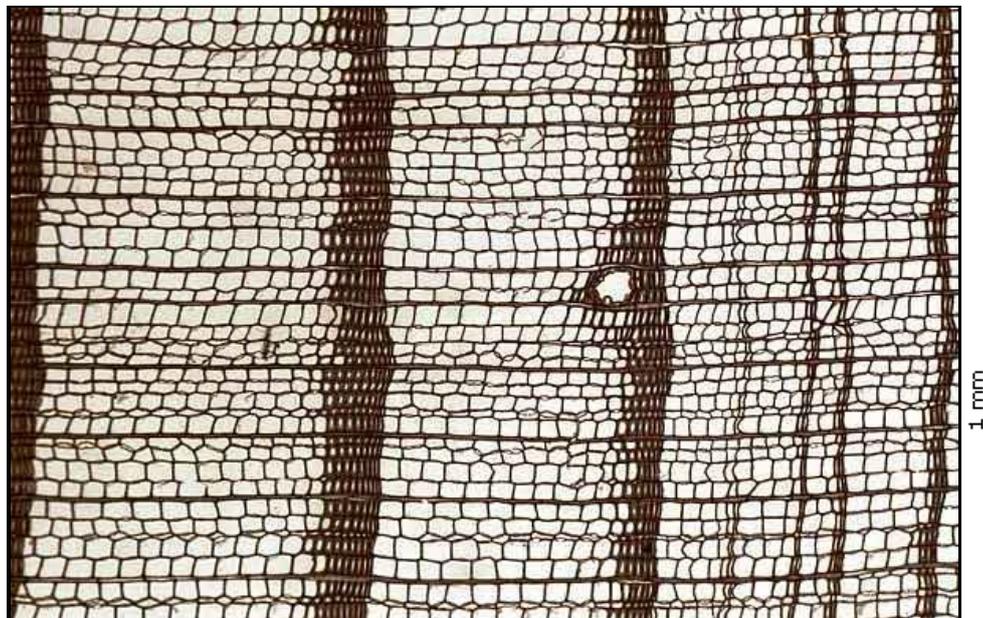


Fig. 1: anatomia del legno di *Larix d.* in sezione trasversale, ingrandimento al microscopio ottico ([www.woodanatomy.ch/species.php?code=LADE#](http://www.woodanatomy.ch/species.php?code=LADE#))

La crescita secondaria avviene grazie all'opera dei meristemi secondari, i quali generano tessuti secondari. Il cambio cribro-vascolare, un meristema secondario che si sviluppa lungo il fusto ed ha una forma assimilabile ad un cilindro, tramite la crescita e le successive divisioni delle cellule meristematiche, produce legno verso l'interno (xilema) e libro verso l'esterno (floema), ed è responsabile dell'aumento dello spessore del fusto, dei rami e delle radici. L'attività cambiale nelle piante arboree dei climi temperati è caratterizzata da un periodo dell'anno in cui le cellule totipotenti si accrescono e si dividono generando cellule figlie, le quali successivamente si differenziano andando a formare cellule xilematiche o floematiche, mentre nel rimanente periodo dell'anno, ossia nella stagione sfavorevole alla vegetazione, entrano in una fase di dormienza e quindi l'attività del cambio si arresta; si crea in tal modo una periodicità annuale. La durata di ciascuna di queste due fasi nell'arco dell'anno, nonché il dinamismo della fase di attività, è influenzata, oltre che da fattori endogeni, in particolar modo dall'ambiente esterno. Si ritiene che le temperature esterne, le precipitazioni, la lunghezza del fotoperiodo e la concentrazione di determinati ormoni nel sistema vascolare della pianta siano i principali fattori che intervengano nel determinare i ritmi dell'attività cambiale, il suo arresto e la sua ripresa (Srivastava, 1973), e di conseguenza la lunghezza della stagione vegetativa. Nella fase vegetativa il cambio, per poter svolgere la sua funzione di produzione dei tessuti xilematici e floematici, necessita di condizioni idonee alla crescita e divisione cellulare. La temperatura influenza direttamente la velocità delle reazioni biologiche; le temperature del tardo inverno e dell'inizio della primavera influiscono inoltre sui processi fisiologici implicati nella ripresa dell'attività cambiale (elevate temperature cumulate risultano in una ripresa precoce e rapida, estendendo la stagione vegetativa) (Begum, 2013) (fig.2).

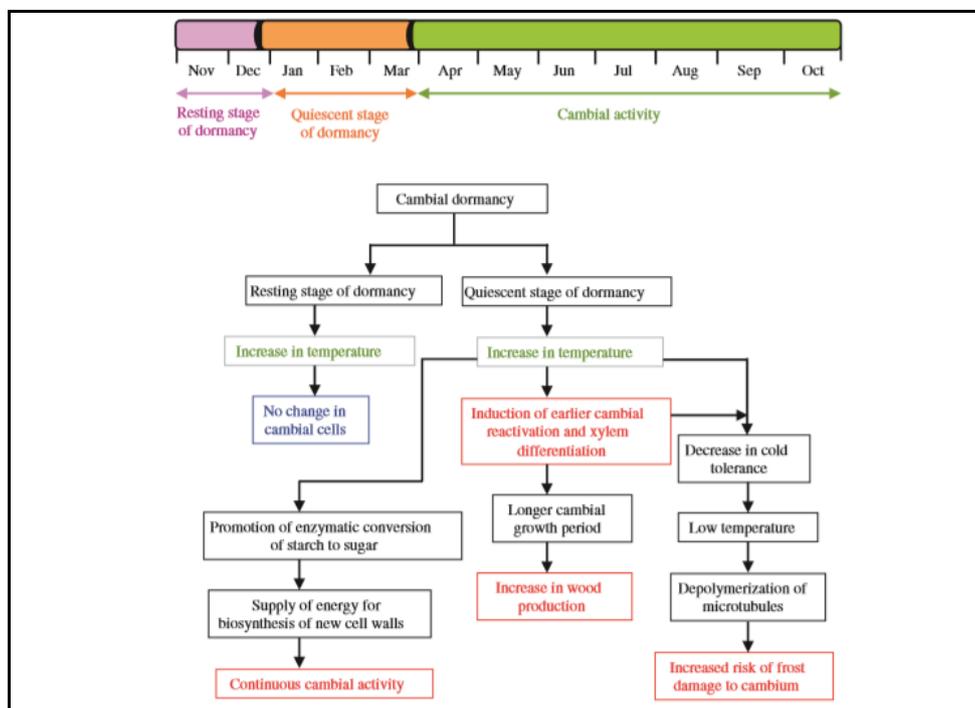


Fig.2: diagramma schematico che mostra i periodi annuali della dormienza e dell'attività cambiale e gli effetti di un aumento della temperatura dal tardo inverno ad inizio primavera sulla formazione del legno negli alberi (estratto da Begum S. et al., 2013)

Nello specifico, la ripresa dell'attività cambiale di *Larix d.* si verifica dal momento in cui la media delle temperature giornaliere supera un valore soglia, compreso tra 5,6°C e 8,5°C (Rossi et al., 2007). Inoltre, la disponibilità di risorse necessarie alla moltiplicazione cellulare (precursori di partenza per la costruzione di nuovi nuclei, organelli, membrane e pareti cellulari, etc., acqua ed energia) e la presenza, nonché la concentrazione, di ormoni che stimolano l'attività del cambio determinano direttamente i tassi di produzione potenziale dei tessuti secondari e quindi dell'accrescimento legnoso.

### 1.5 Dendrocronologia

La dendrocronologia è quella scienza che studia l'evoluzione della crescita di un albero, o di parte di esso, mediante l'osservazione e la valutazione degli anelli di accrescimento da esso formati. Lo studio delle ampiezze anulari viene comunemente eseguito sia su alberi vivi che alberi morti, su legno utilizzato per costruzioni (dai ponti, alle baite montane, a strumenti di uso quotidiano e musicali), su legno sub-fossile e legno fossile. La conoscenza della fisiologia della pianta è necessaria a comprendere i meccanismi chimico-fisici che legano il clima alla formazione degli anelli di accrescimento.

La dendrocronologia *sensu lato* può esser così suddivisa (Schweingruber, 1996):

- a. dendrocronologia *sensu strictu* (comprende tutte le branche della scienza che utilizzano le serie anulari per datare il legno, es.: dendroarcheologia).
- b. dendroecologia (comprende tutte le branche della scienza che sono impegnate nello studio delle relazioni esistenti tra le serie anulari e l'ambiente, es.: dendroclimatologia, dendroidrologia, dendrogeomorfologia, dendroglaciologia,...).

Secondo Kaennel e Schweingruber, il termine dendrocronologia si riferisce alla datazione degli anelli ed allo studio della loro struttura per interpretare le informazioni a riguardo di eventi e processi ambientali e storici (Kaennel e Schweingruber, 1995). Questa scienza è in forte espansione negli ultimi decenni e le numerose recenti ricerche in questo settore stanno ulteriormente ampliando il campo di indagine e consolidando i metodi d'analisi. A partire principalmente dagli anni Settanta anche in Europa si sono succedute varie pubblicazioni di lavori ed ai giorni nostri questa scienza ha raggiunto un'espansione a livello mondiale. Data la versatilità dei risultati ottenuti tramite indagini dendrocronologiche, le interazioni con altre scienze si fanno sempre più numerose e profonde. Gli studi dendrocronologici sono diventati inoltre un importante mezzo per lo studio dei cambiamenti climatici, e sono entrati a far parte di svariati ambiti di ricerca nelle università di tutto il mondo. La storia della dendrocronologia affonda le sue radici nell'idea, avuta dal filosofo e botanico greco Teofrasto nel IV secolo A.C., che gli alberi producono anelli di crescita (Studhalter, 1956). Fu merito successivamente di Leonardo da Vinci di comprendere la stagionalità della formazione degli anelli di accrescimento e la loro dipendenza da fattori ambientali, come scrive nel suo "Trattato di pittura" del 1500 D.C. circa: "*Li circuli delli rami degli alberi segati mostrano il numero delli anni suoi e quali furono più umidi e più secchi secondo la maggiore o minore loro grossezza. E così mostrano gli aspetti del mondo dov'essi erano volti; perché più grossi sono a*

*settennazione che a meridione".* Alla metà del XVIII secolo lo svedese Carl von Linné intuì che è possibile determinare l'età di un albero contandone gli anelli di accrescimento (Speer, 2009). In Germania, nel 1837, Theodor Hartig definì le basi ecologiche della dendrocronologia (Schweingruber, 1996). Questi studi vennero in seguito ampliati ed applicati ad uno spettro di problemi sempre più ampio da studiosi come R. Hartig, A.L. Child, C. Babbage, A. de Candolle, A.C. Twining, J. Kuechler e B. Huber. Un ruolo importante è stato rivestito agli inizi del XX secolo da Andrew Ellicott Douglass, il quale sviluppò il metodo del *crossdating* per la costruzione delle cronologie e la loro verifica, fondando inoltre il primo laboratorio del settore, il Laboratory of Tree-Ring Research o LTRR, presso la University of Arizona. Fondò successivamente nel 1935 la più antica società di dendrocronologia, ossia la Tree-Ring Society (TRS), che fin dal 1934 pubblicò la rivista Tree-Ring Bulletin, divenuta poi Tree-Ring Research. La società TRS conta ora più di 200 membri da 30 paesi diversi (Speer, 2009). In Europa venne fondata nel 2003 la Association for Tree-Ring Research (ATRR), che funge da rete di scambio e supporto per molti dendrocronologi. Nel 1983 a Verona viene fondato l'Istituto Italiano di Dendrocronologia (IID) presso il Museo Civico di Storia Naturale, per iniziativa di un gruppo di Studiosi al fine di promuovere la ricerca dendrocronologica in Italia fino ad allora limitata ad iniziative isolate. A tale scopo viene sin dall'inizio pubblicata una rivista, Dendrochronologia, che raccoglie centinaia di studi dendrocronologici e che diventa punto di riferimento per la letteratura del tema. In Asia nasce nel 2006 la Asian Dendrochronology Association (ADA). Nelle ultime decadi hanno avuto luogo numerosi incontri e conferenze internazionali sulla materia e sono nate importanti collaborazioni, come quella che nel 1997 ha dato vita all'International Tree-Ring Databank (ITRDB), di cui Hal Fritts è stato fondatore e principale promotore, tuttora il maggior archivio mondiale di cronologie provenienti da più di 4000 siti di 32 paesi diversi. Ad accesso libero ed in costante aggiornamento si tratta di un network fondamentale per lo sviluppo e la diffusione della dendrocronologia (Speer, 2009). Ampliare la base disponibile di siti per i quali esistono cronologie a disposizione è un obiettivo di fondamentale importanza per migliorare la conoscenza dei fenomeni ambientali che condizionano la vita e la crescita delle specie arboree. Questo ha risvolti pratici sia nell'ambito selvicolturale, dove il valore delle specie arboree è legato anche alla loro produttività, sia nell'ambito di problematiche molto attuali, come quella dei cambiamenti climatici e del ruolo ecosistemico di stoccaggio del carbonio svolto dai soprassuoli arborei. In quest'ambito si può notare la doppia valenza degli alberi, sia come organismi polivalenti e fondamentali di molti ecosistemi, sia come oggetto di studio riguardo i processi climatici e le loro interazioni con le specie arboree. Avere quindi a disposizione ulteriori serie cronologiche su specie che ben si prestano a tale tipo di studi, riferite a territori allo stesso tempo delicati e importanti come lo è quello delle Alpi, permette di rinforzare gli strumenti a nostra disposizione. Strumenti che possono essere utilizzati per scopi conoscitivi o per scopi pratici, permettendo di attuare delle strategie e degli interventi mirati in risposta alle problematiche che la gestione del territorio comporta. Inoltre, una banca dati sempre più aggiornata ed estesa consente un monitoraggio in continuo dell'adattamento nel tempo delle specie studiate rispetto all'andamento climatico. Come anzidetto anche la gestione

selviculturale può avvantaggiarsi dei dati e delle informazioni che lo studio delle serie anulari porta alla luce.

## 1.6 Principi e concetti della dendrocronologia

La dendrocronologia è basata su principi e concetti che vanno sempre tenuti in considerazione, dalle fasi iniziali di progettazione dello studio fino alle fasi di elaborazione ed interpretazione dei dati. Vengono qui elencati i principi e concetti fondamentali secondo Fritts e Schweingruber:

- *Principio di Uniformitarismo*: proposto da J. Hutton nel 1875; viene riassunto nella seguente proposizione: “il presente è la chiave del passato”. In dendrocronologia ciò implica che i processi fisici e biologici che legano l'ambiente di oggi alle variazioni attuali della crescita anulare sono gli stessi che agivano nel passato. Nonostante sia un concetto base in tutte le scienze naturali, risulta di fondamentale importanza nelle ricostruzioni climatiche del passato. Va tenuto comunque in considerazione che ai giorni nostri il livello di anidride carbonica nell'aria si attesta stabilmente sopra la soglia dei 410ppm, mentre nell'epoca preindustriale i livelli medi erano di 280ppm. Questa differenza è superiore alla variabilità naturale registrata negli ultimi 100'000 anni mediante le carote di ghiaccio. Tale situazione può influenzare la risposta delle piante ai fenomeni ambientali, quindi le ricostruzioni climatiche andrebbero aggiustate tenendone conto, dato che la maggior parte delle calibrazioni è stata fatta in epoca moderna, con valori di concentrazione di anidride carbonica più elevati (Speer, 2009). Altri studi sottolineano la necessità di rivedere tale principio (Carrer e Urbinati, 2006).
- *Principio dei Fattori Limitanti*: si basa sulla Legge dei Minimi di Liebig, elaborata dall'agronomo Sprengel nel 1828, la quale afferma che la crescita di un organismo è vincolata alla quantità disponibile del fattore maggiormente limitante. Il fattore limitante può variare nel tempo e nello spazio. Un fattore limitante può essere ad esempio la scarsità di radiazione ricevuta dalla chioma degli alberi del piano dominato in un popolamento pluristratificato; a causa di una successiva apertura nella chioma del piano dominante (dovuta a schianti da vento o da caduta massi, da taglio per utilizzazione, o da altro ancora) la quantità di radiazione cessa di essere il fattore maggiormente limitante.
- *Principio del Crossdating*: principio cardine della dendrocronologia, consente di assegnare correttamente ad ogni anello misurato la data di formazione dello stesso. Si tratta di uno strumento necessario quando si vogliono comparare le misure delle ampiezze anulari con fenomeni annuali come i dati meteorologici. Senza una corretta datazione di ogni singolo anello infatti la cronologia risulterà errata. Inoltre, i possibili falsi anelli, gli anelli assenti o incompleti possono essere determinati con sicurezza solamente effettuando il crossdating tra diversi alberi dello stesso popolamento, allargando eventualmente il campo di confronto anche ad alberi di popolamenti vicini a conferma di quanto riscontrato. Il concetto del crossdating viene fatto risalire

all'inizio del XVIII secolo quando Duhamel e Bufon lo utilizzarono per datare l'anello del 1709, anno con un inverno che si ritiene possa essere stato il più freddo degli ultimi 300 anni in Europa, e che nei vari campioni esaminati riportava danni da gelo. Fu solo agli inizi del XX secolo che Douglass definì la prima vera e propria metodologia per effettuare il crossdating, ossia il metodo dello "skeleton plot", ancor'oggi utilizzato (Speer, 2009).

- *Principio del Modello di Crescita Arborea Aggregata*: definisce un modello concettuale utile a rappresentare le categorie di fattori che influenzano la formazione degli anelli di accrescimento. Gli alberi registrano qualsiasi cosa influenzi la loro crescita e questo modello è un mezzo per provare ad estrapolare separatamente gli effetti che l'ambiente produce sulla crescita. Gli alberi possono essere severamente limitati da un solo fattore, ma più facilmente essi registrano l'effetto combinato di più fattori limitanti la crescita. Il modello di crescita arborea aggregata è stato elaborato da Cook (Cook, 1985; Cook, 1992) ed è riassunto dalla seguente equazione:

$$R_t = f(G_t, C_t, D_{1t}, D_{2t}, E_t)$$

dove:

$R_t$  è l'ampiezza dell'anello di accrescimento al tempo  $t$ .

$G_t$  è la tendenza di crescita relativa all'età o alla taglia.

$C_t$  è il clima al tempo  $t$ .

$D_{1t}$  sono i disturbi endogeni all'interno del popolamento.

$D_{2t}$  sono i disturbi esogeni all'esterno del popolamento.

$E_t$  è il termine di errore che incorpora tutti i segnali che non sono direttamente riconducibili alle variabili suddette. Tale equazione asserisce che la formazione di ogni anello di crescita dipende da un'ampia gamma di variabili, confermando la complessità intrinseca in ogni anello di crescita.

- *Principio di Selezione del Sito*: questo principio è utile in dendrocronologia in quanto permette di limitare il numero di variabili per le piante campionate; ciò avviene selezionando il sito di campionamento in modo che gli alberi lì presenti siano ragionevolmente affetti da un set comune di fattori rilevanti ai fini dell'analisi. Il sito dovrebbe essere quindi collocato dove gli alberi risentono in particolar modo dello stress dovuto al fattore limitante oggetto dello studio (Fritts, 1976; Urbinati et al., 1996). Ad esempio, se si volesse ricostruire l'andamento delle precipitazioni nel passato, si dovrebbe scegliere un sito tendenzialmente arido e con scarse riserve idriche nel terreno. Se invece si indaga sul segnale della temperatura, sarà utile definire il sito di campionamento ad elevate altitudini o latitudini dove la temperatura durante la stagione vegetativa risulta essere il principale fattore limitante. Riguardo alle analisi sulla relazione clima-accrescimento, gli alberi che crescono al centro della loro amplitudine ecologica, dove il clima è favorevole, avranno una crescita compiacente, ossia ogni anello di crescita sarà molto simile a quelli adiacenti. Al lato opposto, se un albero ha crescita sensitiva, la variabilità tra un anello di crescita e l'altro sarà considerevole e quindi

indicativa delle variabili indagate. Tale indicazione dirigerà la scelta su ambienti di transizione, come ad esempio gli ecotoni delle *tree-line*.

- *Principio di Replicazione*: questo principio si basa sul fatto che l'utilizzo di un elevato numero di campioni porta ad una minimizzazione della variabilità dei singoli alberi del popolamento. Mediando due campioni per ogni pianta e campionando almeno 20 piante e poi mediandole tra loro, la variabilità individuale viene rimossa e si ottiene una cronologia media accurata del popolamento (Fritts, 1976). Inoltre, mediando tra loro campioni di differenti popolamenti, la scala a cui lo studio viene condotto può essere ampliata, dal singolo individuo al popolamento, fino a livello regionale. Tra i primi dendrocronologi a riconoscere questo principio ci sono Twining (1833) e Babbage (1838). Campionando diversi individui e confrontando le relative serie anulari può venir dimostrata la datazione mediante il crossdating. La replicazione pone le basi per il crossdating e contribuisce alla solidità delle ricostruzioni ambientali.
- *Concetto di Standardizzazione*: si tratta di un concetto necessario al corretto confronto tra campioni provenienti da alberi di diverse età e con diverse geometrie del fusto. Con la procedura della standardizzazione si giunge, partendo da dati grezzi, ad ottenere valori indicizzati delle ampiezze anulari che risultano così confrontabili tra loro. La tendenza di crescita relativa all'età e le variabili a lungo termine possono essere considerate come rumore tramite un'appropriata curva di standardizzazione. La standardizzazione rimuove inoltre i differenti tassi di crescita dei singoli individui. La tecnica maggiormente conservativa è l'uso di una curva esponenziale negativa; si tratta di una curva deterministica che segue i modelli geometrici di crescita, mentre altre tecniche di standardizzazione sono di tipo empirico e ricavano la miglior curva per mezzo di esperimenti. Un modello empirico è per esempio l'utilizzo di una funzione *spline* cubica che permette di aggiustare la curva ad intervalli regolari. Queste funzioni permettono un miglior adattamento della curva ai dati ma rimuovono differenti quantità di varianza a differenti scale temporali (Speer, 2009). L'uso del processo di standardizzazione permette quindi di minimizzare il rumore in una cronologia e di potenziare il segnale d'interesse.
- *Concetto di Ampiezza Ecologica*: ogni specie, in dipendenza dal suo genotipo determinato da fattori di ereditarietà, può crescere e riprodursi in alcuni range di habitat. Vicino al centro della propria distribuzione geografica la specie viene ritrovata in un'ampia varietà di siti, dove raramente i fattori ambientali sono fortemente limitanti. Ai margini del suo range naturale invece la specie si trova in una relativamente scarsa varietà di siti dove il clima spesso diventa il fattore limitante principale dei processi fisiologici. Questa condizione suggerisce che per analisi delle relazioni clima-crescita i siti di campionamento vadano scelti verso il limitare del range di crescita delle specie oggetto di studio, in modo da aumentare la loro sensibilità a determinati fattori: gli ecotoni si dimostrano quindi dei validi siti di

campionamento. L'ampiezza ecologica definisce cioè la disposizione secondo cui le varie specie si distribuiscono in un territorio, a causa della pressione dei fattori climatici a cui ciascuna specie risponde in modo proprio. Il microclima stazionario è inoltre influenzato da fattori topografici e non, quali la pendenza, l'esposizione, il substrato, la densità della copertura arborea, la rocciosità affiorante ed altri ancora.

- *Concetto di Autocorrelazione*: qualsiasi organismo vivente è soggetto ad autocorrelazione, in quanto la progressione del tempo e della crescita è unidirezionale ed ogni condizione presente è quindi influenzata dalle condizioni passate. I processi fisiologici dell'anno corrente sono quindi influenzati, in diversa misura, da ciò che è stato nell'anno precedente (autocorrelazione di primo ordine), in quello precedente ancora (autocorrelazione di secondo ordine), e così via (autocorrelazione di ordine n). All'aumento dell'ordine della correlazione corrisponde generalmente un minor impatto sui processi dell'anno in corso. L'autocorrelazione può quindi essere un problema ai fini delle analisi dendrocronologiche in quanto numerose operazioni statistiche, come le analisi di regressione multipla, presumono che i dati non siano autocorrelati. La componente dell'autocorrelazione può essere descritta e rimossa determinando la varianza di crescita dell'anno corrente che può essere spiegata attraverso la crescita dell'anno precedente: il lag di un anno viene descritto da un modello autoregressivo di prim'ordine, il lag dei due anni antecedenti da un modello autoregressivo di second'ordine, e così via finché nessun significativo segnale autoregressivo viene rilevato.
- *Concetto di Sensitività*: questo concetto descrive la variabilità esistente tra un anello ed i suoi adiacenti, variabilità che deriva dalla misura in cui i processi fisiologici che portano alla formazione degli anelli di accrescimento sono influenzati dalle variazioni delle condizioni ambientali. La sensitività, dipendendo da fattori genetici ed ambientali, è una caratteristica variabile tra un individuo ed un altro e per questo spesso viene calcolata la sensitività media del campione indagato. La sensitività può variare inoltre nello spazio, come per siti o micro-siti differenti, e nel tempo, a causa di una moltitudine di fattori ambientali, tra i quali la competizione tra individui, l'accumulo di sostanza organica ed acqua in depressioni del terreno, la profondità del terreno, la distribuzione di organismi simbiotici o parassitari, ecc. (Trouillier et al., 2018). La sensitività può venire anche relazionata ad una data specie, in quanto ogni specie, entro i propri limiti, risponde in modo differente ai diversi stimoli ambientali, ed in base a questo è possibile distinguere due macrocategorie: le specie sensitive e le specie compiacenti. Le specie sensitive rispondono in modo più intenso a determinate condizioni di crescita rispetto alle specie compiacenti, in cui un qualsiasi stimolo può non generare alcuna risposta nella crescita. Ne risulta che nelle specie sensitive la variabilità tra gli anelli di crescita è maggiore che nelle specie compiacenti, quindi si possono ricavare dalle prime cronologie maggiormente precise rispetto alle seconde, essendo il segnale fisiologicamente amplificato.

## **2. MATERIALI E METODI**

### 2.1 Specie studiata

#### ***Larix decidua (Miller, 1768):***

Regno: *Plantae*

Sottoregno: *Tracheobionta*

Superdivisione: *Spermatophyta*

Divisione: *Pinophyta*

Classe: *Pinopsida*

Sottoclasse: -

Ordine: *Pinales*

Famiglia: *Pinaceae*

Genere: *Larix*

Specie: *Larix Decidua*



Fig.3: fotografia di *Larix decidua* nella veste invernale

#### 2.1.1 Caratteri botanici e morfologia:

Conifera di primaria grandezza sulle Alpi, è una pianta arborea legnosa che può raggiungere in condizioni ottimali di crescita un'altezza di oltre 45m e una circonferenza superiore ai 3,5m. Si tratta di una pianta a crescita rapida nelle fasi giovanili e caratterizzata da una vita longeva, potendo superare i 400 anni d'età. In condizioni particolari può avere accrescimenti annuali molto ridotti ed arrivare a superare gli 800 anni; gli individui di conifere più longevi delle Alpi sembrano infatti essere tre larici siti in Val d'Ultimo (BZ), la cui l'età misurata è superiore agli 800 anni. Relativamente all'arco alpino, il larice risulta essere l'unica conifera caducifoglia, caratteristica che la rende spesso gradita per la varietà dei colori che la sua chioma assume al susseguirsi delle stagioni e per le tinte variegiate che conferisce ai boschi dove esso trova dimora. Il portamento è generalmente eretto, con fusto dritto e base allargata, talvolta ricurva, ed i rami sono distribuiti a palchi regolari. *Larix d.* è una specie caratterizzata da un discreto grado di polimorfismo, principalmente dovuto a caratteri ambientali, quali i venti dominanti, la quantità di precipitazioni nevose, la pendenza del terreno, che possono generare forme di

crescita policormiche. La forma della chioma può inoltre presentarsi maggiormente stretta ed alta verso il limite superiore del proprio areale, mentre può essere maggiormente espansa ad altitudini minori. I rami primari sono grossi e lunghi, con l'estremità ricurva e rivolta verso l'alto, quelli secondari sono sottili, affusolati e penduli. Spesso sui rami e sul fusto vivono licheni corticicoli, a forma crostosa od a ciuffi, di colore che varia dal grigio al verde. La corteccia si presenta giallastra sui getti dell'anno, poi diventa grigia, inizialmente liscia e poi sempre più fessurata nel senso dell'asse del fusto, originando placche di forma irregolare che nelle piante adulte e vetuste possono superare vari centimetri di spessore; sotto gli strati esterni la corteccia assume sempre tinte rosso cupo. Le foglie sono aghiformi, di consistenza erbacea, e di colore verde chiaro d'estate che vira fino al giallo durante l'autunno; esse sono lunghe 10-35mm e larghe 1-2mm, appiattite, disposte singolarmente tutto intorno ai macroblasti e riunite in fascetti di 20-40 aghi sui brachiblasti. I germogli si presentano ovali, di circa 20\*30mm di dimensione, non resinosi e flessibili. L'apparato radicale è molto esteso e robusto, munito di un fittone verticale profondo e grosse radici portanti laterali. Questa disposizione delle radici permette al larice di rinforzare la stabilità dei suoli ove cresce e di restarvi saldamente aggrappato, in particolar modo per quelli sviluppati su ripidi pendii, e di attingere a riserve d'acqua anche in profondità. Il larice è una pianta monoica, in quanto porta le strutture riproduttive (coni o strobili) maschili e femminili separate ma sulla stessa pianta; nei coni maschili, costituiti da brattee riunite a formare strutture globose di 5-10mm di lunghezza, giallastre, pendenti dai rami, si differenziano i gameti maschili, cioè i granuli pollinici; nei coni femminili, costituiti da brattee riunite a spirale a formare un cono ingrossato ovoidale, eretto, normalmente di colore rosso-porpora, molto simile ad un vero fiore, si differenziano gli ovuli contenenti le cellule uovo, ossia i gameti femminili. Dopo l'impollinazione i coni diventano bruni con squame sottili e ovali, con due semi alati in ogni loggia, e persistenti sul ramo fino a disseminazione completa, spesso sino alla caduta del ramo stesso (De Martin, 2019). L'impollinazione avviene principalmente per via anemofila, mentre grazie alla diversa posizione e orientamento tra i coni maschili e quelli femminili l'autoimpollinazione è fortemente inibita, favorendo una buona variabilità genetica all'interno dei popolamenti, che favorirebbe una certa capacità di adattamento a diverse situazioni (Bellelli, 1999). Un contributo all'impollinazione viene dato anche dalla microfauna, quali scoiattoli e vari uccelli di bosco. Il larice inizia la produzione di seme, spesso abbondante, a partire dai 10-30 anni di età, per ripeterla ogni 5-10 anni circa. La caratteristica di perdere gli aghi a fine stagione condiziona la fisiologia del larice: la riduzione del numero di giorni disponibili per la fotosintesi viene compensata da un aumento dell'assimilazione, cui corrisponde anche una maggior perdita d'acqua per traspirazione, dato che anche in presenza di forti venti non vi è chiusura degli stomi (Tranquillini, 1979). Ne deriva che il larice è poco efficiente nei siti a carattere atlantico, con elevata umidità atmosferica, mentre nei siti più continentali o dove le condizioni di crescita tipiche delle elevate altitudini (forti venti, temperature rigide e ridotta stagione vegetativa) sono severe, il larice risulta essere favorito rispetto alle altre conifere non decidue. La rinnovazione del larice riesce ad insediarsi solo in mancanza di forte competizione idrica di altre piante, sia arboree che erbacee, mentre le eventuali carenze idriche nelle piante

adulte possono esser sopperite per via del robusto e profondo apparato radicale. Tuttavia, se le precipitazioni sono troppo scarse, meno di 700mm di pioggia all'anno, il larice si rifugia nelle esposizioni a Nord o ad altitudini maggiori (Morandini, 1956).

### 2.1.2 Habitat ed ecologia

*Larix d.* è una specie tendenzialmente eliofila, tipica di ambienti soleggiati e asciutti, che predilige stazioni a clima continentale anche se la sua amplitudine ecologica gli consente di vivere in condizioni di clima subcontinentale o addirittura in stazioni a clima atlantico; si trova sia in popolamenti puri che in consociazione con altre conifere montane e la sua presenza può esser rilevata anche all'interno di faggete montane. In assenza di ricorrenti disturbi ambientali, nel piano montano, si tratta di una specie di transizione che viene sostituita gradualmente da altre conifere come *Picea excelsa* o *Abies alba*, ma che in aree sottoposte a frequenti disturbi, in zone di *treeline* o comunque nel piano subalpino, forma spesso popolamenti puri o misti con *Pinus cembra*, risultando maggiormente adattato ed efficiente. Nella regione alpina il suo optimum spazia dal piano montano superiore a quello subalpino, trovandosi ad altitudini che vanno dai 1200m ai 2100m, e potendo arrivare anche oltre il limite del bosco con individui isolati e sporadici fino ad oltre i 2500m. Il larice comune è una specie pioniera e microterma, poco esigente per quanto riguarda i nutrienti del terreno e per il tipo di substrato su cui si trova a vegetare, anche se preferisce terreni profondi e ben areati e rifugge solo terreni con prolungate condizioni di idromorfismo. Inoltre, è in grado di resistere bene ad inverni rigidi e sopportare ottimamente gelate invernali anche grazie alla caducità dei suoi aghi, che limita molto la necessità di traspirazione durante la stagione invernale e che diminuisce schianti e rotture dovuti a vento e precipitazioni nevose. Il larice ha inoltre un'elevata capacità di colonizzare falde detritiche, terreni ad elevata percentuale di affioramenti rocciosi, versanti rupestri, e di ricolonizzare pascoli, prati stabili abbandonati e spiazzati aperti da smottamenti, colate detritiche o eventi valanghivi.

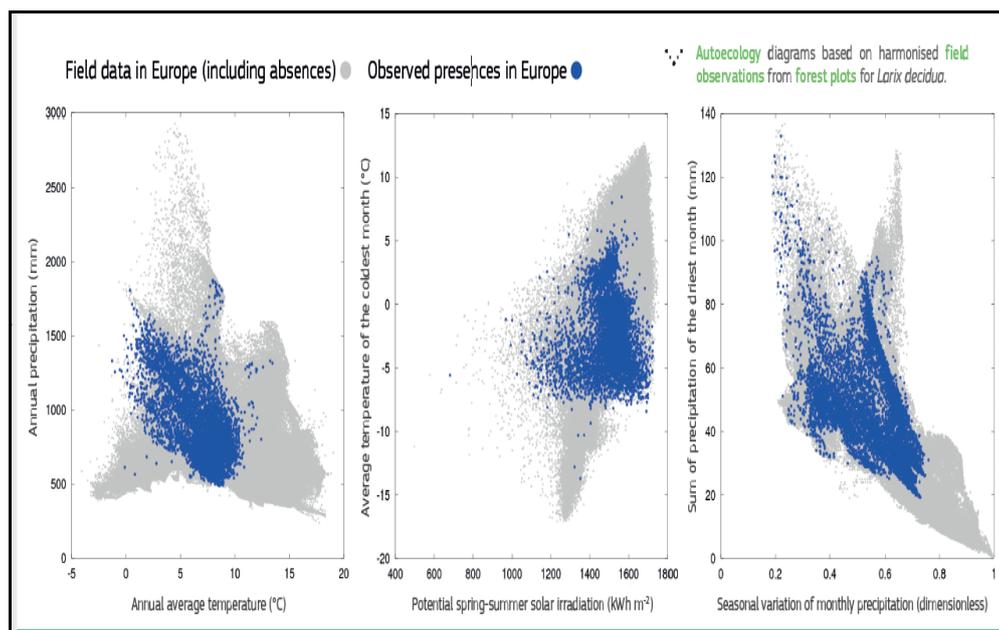


Fig.4: autoecology diagrams for *Larix decidua* (Da Ronch et al., 2016)

<b>Valori ecologici secondo Landolt et al., 2010</b>		
<b>Fattori del suolo</b>	<b>Fattori climatici</b>	<b>Tolleranza alla salinità</b>
<b>Valore d'umidità U:</b> 3 (mediamente umido)	<b>Valore di luminosità L:</b> 4 (luoghi luminosi)	<b>Indice di salinità:</b> —
<b>Valore di reazione R:</b> 2 (acido; ph 3,5-6,5)	<b>Valore di temperatura T:</b> 2 (piano subalpino)	
<b>Valore delle sostanze nutritive N:</b> 2 (povero in nutrienti)	<b>Valori di continentalità C:</b> 4 (subcontinentale)	

Fig.5: valori ecologici di *Larix d.* secondo Landolt et al. (<https://www.infoflora.ch/it/flora/larix-decidua.html>)

Il genere *Larix* è stato ampiamente utilizzato per studi dendrocronologici, soprattutto con *Larix decidua* in Europa e con *Larix sibirica* in Russia, dove è risultato esser una delle specie con maggior sensibilità; questo è probabilmente dovuto alle sue peculiarità ecologiche e biologiche quali la defogliazione annuale, l'efficiente utilizzo delle risorse per l'accumulazione di biomassa e la sua eliofilia (Shiyatov, 1967). Il suo esteso areale, anche se frammentato (fig.6), la sua elevata longevità ed il largo uso che ne è stato fatto come materiale da costruzione nel passato, lo rendono inoltre un'ottima risorsa per gli studi dendrocronologici. Specifiche considerazioni riguardo a *Larix d.* ed ai fattori climatici che ne influenzano l'accrescimento verranno discusse nel capitolo quarto.

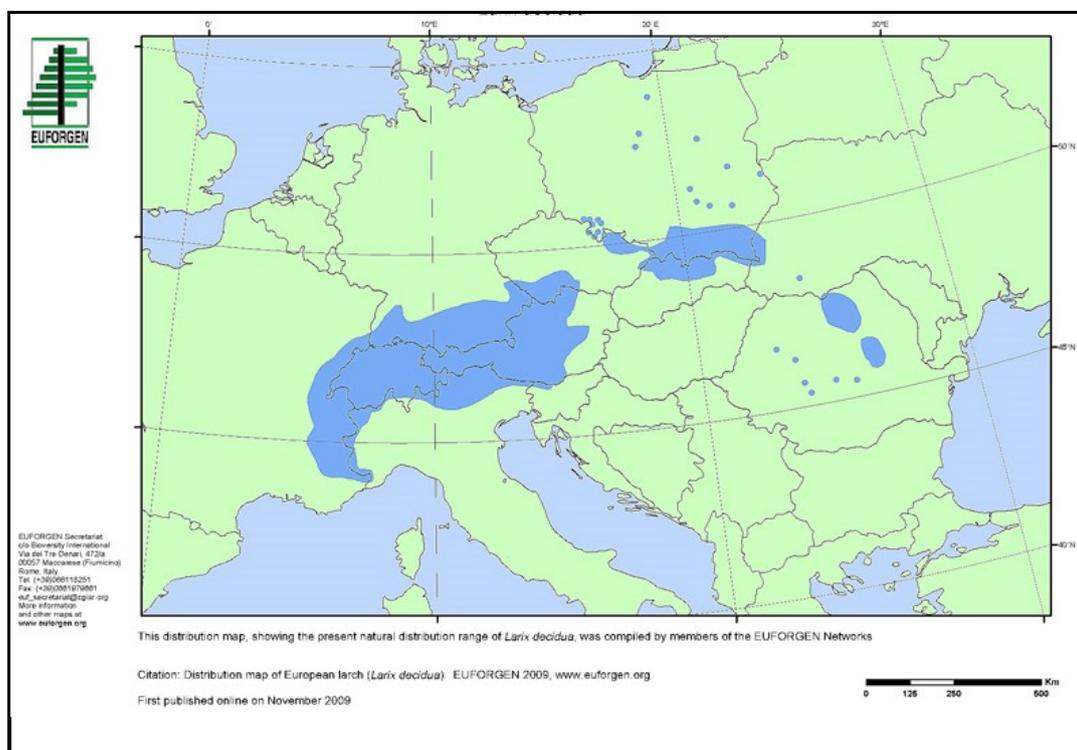


Fig.6: areale di distribuzione di *Larix decidua* ([www.euforgen.org](http://www.euforgen.org))

### 2.1.3 Larice, fattori limitanti e malattie

*Larix decidua* è una specie generalmente poco esigente, adattabile e molto resistente, tuttavia vari fattori possono ostacolarne la crescita. Elenchiamo brevemente i fattori abiotici verso cui il larice dimostra una buona resistenza in confronto alle altre conifere dell'arco alpino: venti forti e tempeste, intense nevicate, siccità invernali, temperature invernali rigide (Norris et al., 2008); tuttavia il larice mostra una certa sofferenza nei riguardi di frane, smottamenti, caduta massi e ristagni idrici nel substrato di crescita (Dorren et al., 2005). Tra le malattie di origine fungina menzione speciale va fatta per il cancro del larice, causato da *Lachnellula wilkommii*, una tra le malattie più gravi per questa specie (Praciak et al., 2013); altre malattie causate dai funghi sono: *Meria laricis*, *Heterobasidion annosum*, *Phaeolus schweinitzii* e *Dothistroma septosporum* (Da Ronch et al., 2016). Per quanto riguarda i principali insetti che parassitano *Larix d.* ricordiamo *Ips typographus* ed altre specie del genere *Ips*, *Coleophora laricella*, *Hylobius abietis*; una menzione particolare va fatta per *Zeiraphera Griseana*, di cui viene mostrato il rapporto parassitico con il larice (*fig.7-8*). La tortrice del larice, ossia *Zeiraphera griseana*, Hubner, 1799 (= *Z. diniana*, Guenée), è un lepidottero defogliatore molto diffuso nell'arco alpino e che spesso dà luogo a fluttuazioni con gradazioni cicliche. Le gradazioni di *Zeiraphera g.*, nelle condizioni ottimali che generalmente si verificano negli ambienti a quote comprese tra i 1800m s.l.m. e i 1900m s.l.m., seguono un andamento ciclico con periodi di intensa defogliazione della durata di circa tre anni ad intervalli di 8-10 anni. Il rapporto tra *Larix d.* e *Zeiraphera g.* è uno dei principali e più studiati esempi di competizione-equilibrio tra specie differenti in ambito forestale. Le pullulazioni della tortrice infatti causano intense defogliazioni degli individui colpiti, ma raramente portano alla morte; in alcuni casi il larice riesce comunque a produrre nuovamente gli aghi durante la stessa stagione. Nella maggior parte dei casi comunque le defogliazioni, a volte anche totali, causano un rallentamento, o in alcuni casi anche un arresto, della crescita: questa condizione porterà i larici colpiti, per il successivo triennio circa, a produrre aghi di minor qualità nutritiva, debilitando le successive generazioni dell'insetto parassita. Gli aghi verranno anche prodotti in ritardo rispetto all'anno della pullulazione, rompendo il sincronismo tra la schiusa delle uova e la disponibilità di cibo. Inoltre, le popolazioni di insetti, sia antagonisti che si nutrono di *Zeiraphera g.* che di parassiti che ne attaccano le larve, si riproducono molto velocemente grazie all'abbondanza di prede. In tal modo la mortalità delle larve della tortrice del larice raggiunge negli anni seguenti alla gradazione valori superiori al 99%, a causa degli effetti di fattori densità-dipendenti e dei cambiamenti attuati dal larice. Negli anni seguenti i larici ritornano ad anticipare la produzione degli aghi, che torneranno di qualità migliore e di maggiori dimensioni, mentre le popolazioni del defogliatore iniziano lentamente a riprendersi, prima di dar inizio ad una nuova gradazione (*fig.7*).

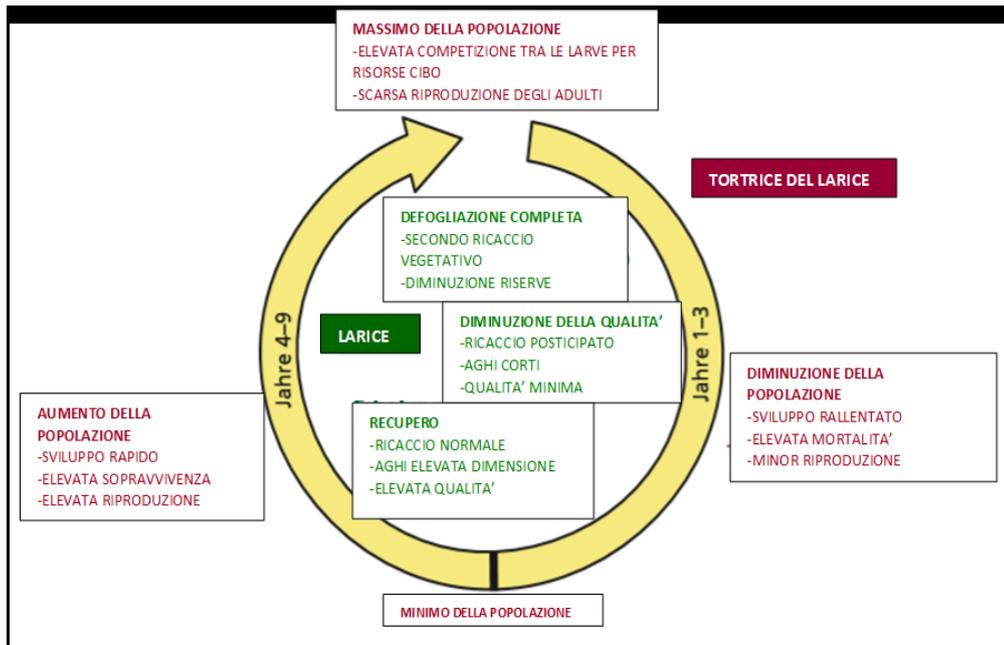


Fig.7: schema del rapporto ciclico ospite-parassita tra larice e tortrice del larice (estratto e tradotto da: Wermelinger et al., 2018)

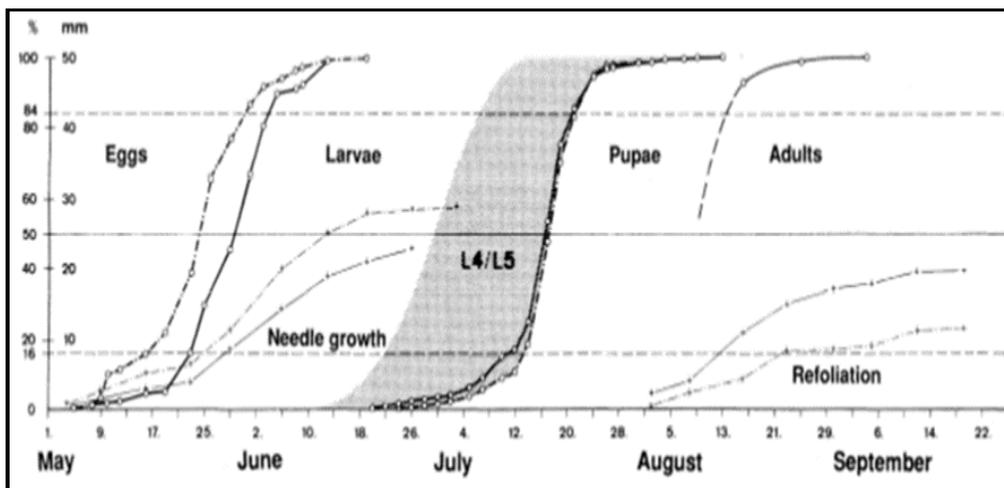


Fig.8: Diagramma delle fasi fenologiche di sviluppo della tortrice del larice e della crescita fogliare del larice in Alta Engadina; 1820m (-----) e 1900m (-----), sito di Sils, 1972. (estratto e tradotto da: Baltensweiler e Fischlin, 1988)

#### 2.1.4 Utilizzi del larice e del legno di larice

Il genere *Larix* riveste una grande importanza sia nella tradizione che nell'economia delle zone alpine e delle fasce boreali. In passato il larice era molto considerato come essenza per i pascoli arborati creati dall'uomo: oltre ad offrire ombra per il riposo del bestiame nelle ore estive più calde, sotto la sua chioma leggera la crescita di piante erbacee non viene ostacolata; al contrario i suoi aghi molto fini e teneri creano un *humus* molto ricco fertilizzando il terreno. Fin dall'antichità, il suo legno è stato apprezzato per la durabilità e per la resistenza che lo contraddistinguono: è stato utilizzato sia per la costruzione di case, pavimenti, infissi, tetti e paleria varia, che per carpenteria e costruzioni navali. Possiede inoltre una buona lavorabilità. Più

recentemente è stato utilizzato anche nell'industria cartaria e per opere di ingegneria naturalistica. Il legno di larice offre infatti un'ottima resistenza all'acqua, anche salata, ed agli agenti atmosferici. Il legname migliore si ricava dai fusti con anelli di accrescimento regolari e non troppo ampi, che sono propri delle piante dei boschi di alta montagna; le piante cresciute a bassa quota di solito hanno anelli eccessivamente larghi e alborno molto ampio, a discapito della qualità (<http://www.mcfspa.it/it/larice.html>). Un prodotto non legnoso di particolare interesse storico-culturale è la trementina di larice: essa è nota fin dai tempi antichi per le sue virtù curative e risulta essere particolarmente preziosa per i molteplici usi. Nell'industria farmaceutica è ricercata per le sue proprietà antisettiche e rubefacenti, viene utilizzata nella cura delle malattie infettive ed infiammatorie delle vie urinarie, nelle affezioni dell'apparato respiratorio e per la preparazione di impiastri o di cerotti revulsivi (Calvo *et al.*, 2017). In ambito forestale viene spesso utilizzato per rimboschimenti, soprattutto in aree sottoposte a regolari disturbi di carattere ambientale, con terreni poveri e poco evoluti, e per il consolidamento di versanti grazie alla robustezza del suo apparato radicale. Il prelievo di legname di larice consente spesso di ottenere ottimo legname da opera e vari assortimenti apprezzati sul mercato.

## 2.2 Sito di campionamento

I campionamenti sono stati effettuati tra luglio ed agosto 2018, in località Bazena, sita nel comune di Breno (*fig.9-10*). Il territorio comunale si trova per la maggior parte compreso nei confini del Parco dell'Adamello, e si sviluppa sulla sinistra orografica della Valle Camonica, estendendosi dalle sponde del fiume Oglio fino ai versanti ovest delle propaggini più meridionali del massiccio dell'Adamello (dorsale che si sviluppa in direzione NNE-SSO dalla vetta dell'Adamello fino al Cornone di Blumone) fino a raggiungere la testata della Valle del Caffaro. Località Bazena è situata lungo la strada provinciale delle "tre valli", la SP BS 345, che conduce al Passo Crocedomini. L'area di studio, appartenente alla Valle di Crocedomini e più precisamente alla valle formata dal torrente Bona che sgorga dal Monte Frerone (alta Valle delle Valli), è collocabile quindi nella sezione delle Alpi Retiche Meridionali, supergruppo dell'Adamello, sottogruppo del Blumone, cod. II/C-28.III-A.2.c secondo la Suddivisione Orografica Internazionale Unificata del Sistema Alpino (SOIUSA). L'area di campionamento si trova all'interno del Sito di Interesse Comunitario: SIC IT2070006 "Pascoli di Crocedomini - Alta Val Caffaro" ed ha un'estensione di circa 1 ettaro. Sono stati selezionati, dietro consiglio di un tecnico della Comunità Montana Valle Camonica, due siti di campionamento identificati come Bazena-1 (bz-1) e Bazena-2 (bz-2), situati a distanza massima di 300m tra loro e compresi tra i 1670m s.l.m. ed i 1830m s.l.m. di altitudine (*fig.13-14*), e facilmente accessibili dalla strada provinciale sopra menzionata. Il versante del sito bz-1 ha esposizione Sud, mentre il versante del sito bz-2 ha esposizione Sud-Ovest. La scelta di utilizzare due siti è stata dettata dalla difficoltà di reperimento, all'interno di un solo sito, del numero di piante per classe diametrica e per specie necessari a rispettare la consistenza del campione che ci si era preposti di ottenere. Date le caratteristiche geomorfologiche dei siti ed alla luce dei risultati ottenuti in seguito, i due siti possono esser considerati come un unico sito di campionamento; è stata comunque mantenuta la rintracciabilità della provenienza dei vari campioni. La particella assestamentale che contiene l'area di campionamento è la particella nr.38

del PAF di Breno, gestita dal Consorzio Forestale Pizzo Badile (fig. 11-12-13). Come riportato in quest'ultimo documento, la tipologia forestale è il "lariceto subalpino tipico", a cui è stata assegnata la ottava classe di fertilità e la classe economica H. La classe attitudinale è a ruolo di protezione, mentre la classe di governo è a fustaia con una provvigione reale di 50m<sup>3</sup> ad ettaro ed una ripresa lorda annua di 20m<sup>3</sup>. Nonostante l'indicazione riportata nel PAF di Breno, i sopralluoghi in campo suggeriscono che all'interno dell'area di campionamento la tipologia forestale sia meglio descritta da "lariceto in successione con pecceta", costituita da popolamento misto a maggioranza di Larice comune (*Larix decidua sub. decidua*, Miller, 1768) e di Abete rosso (*Picea abies*, H. Karstens, 1881) e con presenza sporadica di specie minoritarie quali il pino mugo (*Pinus mugo*, Turra, 1764) e il sorbo montano (*Sorbus aria*, Crantz, 1763). L'area di studio fa parte del distretto pedologico delle orobie prealpine orientali, provincia prealpina interna orobico bresciana; geologicamente essa è collocabile sulla formazione del "calcare di Angolo", risalente al Triassico medio-superiore (ISPRA, foglio geologico n.079 – Bagolino), ed il materiale parentale è costituito da rocce calcaree sedimentarie. Secondo la classificazione WRB (World Reference Base for Soil Resources) il suolo dell'area di saggio è classificabile come Cambisols (CM), e si presenta da poco a molto profondo (60-200cm), con media o buona dotazione in sostanza organica, ph da sub-acido a neutro (6,2-7,3), con tessitura franco argillosa e granulometria fine (PAF di Breno). La rocciosità superficiale del sito è moderata ma comunque significativa: diversi alberi campionati crescono su zone in cui il suolo si presenta poco profondo ed il substrato roccioso risulta affiorante. La pendenza media del versante si attesta tra il 50% ed il 70%. I larici del sito di campionamento si trovano su quella che può esser considerata area di *treeline* del larice - limite delle piante arboree 1900m da ortofoto - nella valle di Croce Domini; a meno di 100m di dislivello al di sopra del sito di campionamento infatti la copertura arborea lascia spazio ai radi arbusti ed alle brughiere alpine (fig. 12-15). Nello specifico *Larix decidua* è stata scelta per lo studio delle possibili relazioni clima-accrescimento in quanto si è dimostrata essere in diversi studi specie ad elevata sensibilità climatica.

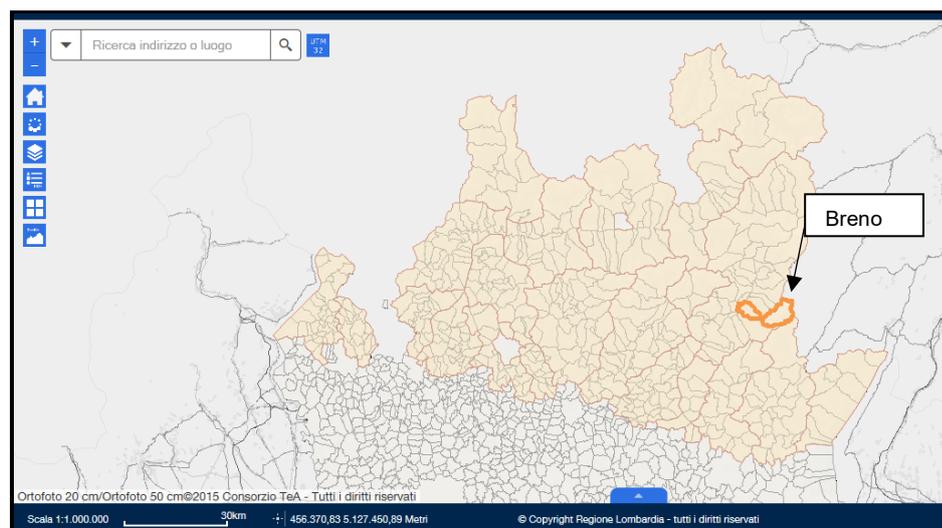


Fig. 10: carta d'inquadramento del comune di Breno all'interno della Comunità Montana della Valle Camonica (<https://www.cartografia.servizirl.it/viewer31/index.jsp>)



Fig. 11: carta DTM20 con indicata la particella assestamentale dove è stato eseguito il campionamento (<https://www.cartografia.servizirl.it/viewer31/index.jsp>)

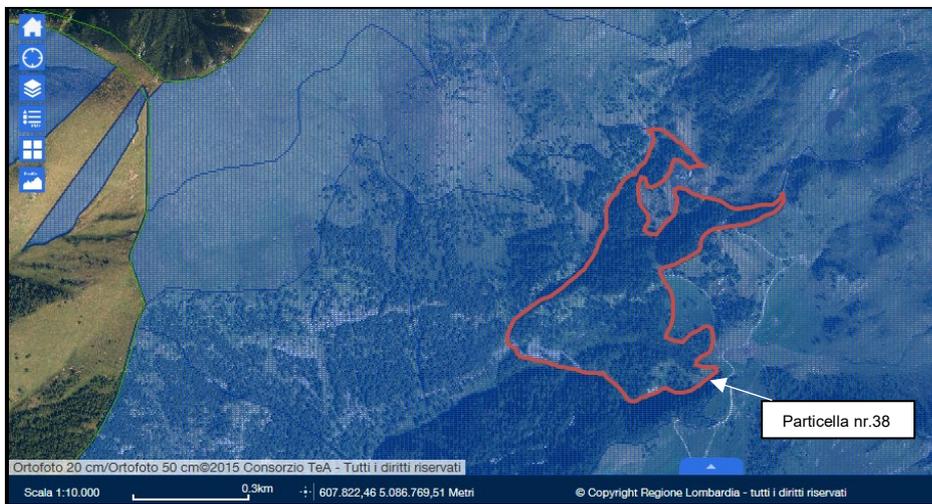


Fig. 12: ortofoto con evidenziata la particella che contiene l'area di saggio (<https://www.cartografia.servizirl.it/viewer31/index.jsp>)



Fig. 13: carta delle tipologie forestali con evidenziata la particella che contiene l'area di saggio (<https://www.cartografia.servizirl.it/viewer31/index.jsp>)

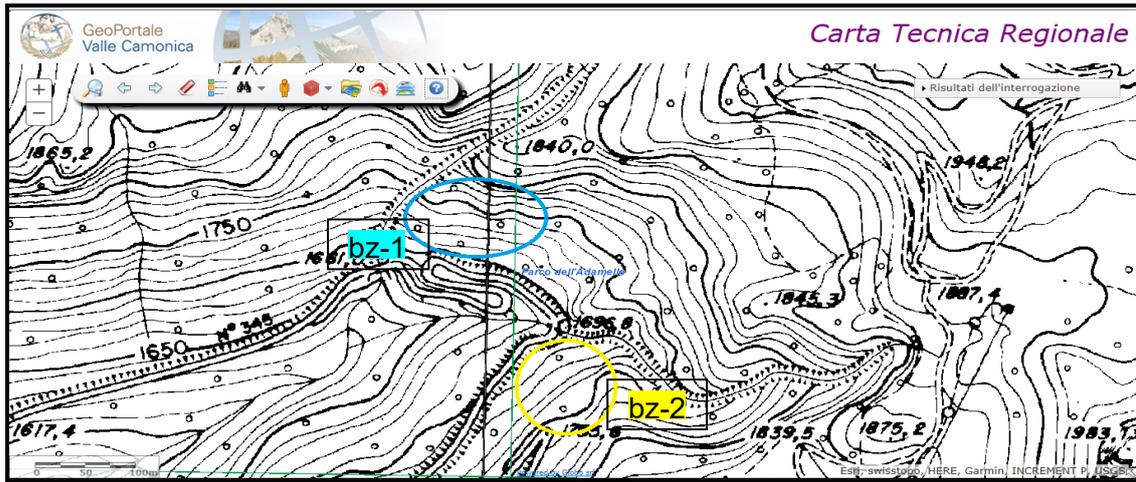


Fig. 14: estratto Carta Tecnica Regionale con indicati i siti di campionamento ([www.geoportale.cmvallcamonica.bs.it](http://www.geoportale.cmvallcamonica.bs.it))



Fig. 15: fotografia dei siti di campionamento in località Bazena

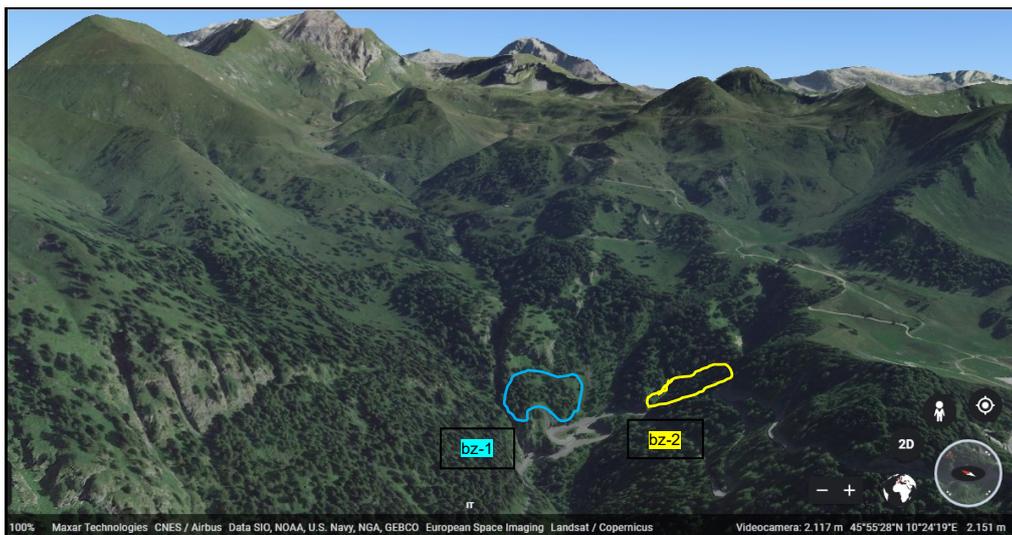


Fig. 16: modello digitale dei siti di campionamento in località Bazena (<https://www.google.it/intl/it/earth/index.html>)

## 2.3 Sintesi descrittori climatici Breno

La classificazione del clima è Cfb secondo Köppen e Geiger (<https://it.climate-data.org>), ossia clima temperato delle medie latitudini, umido (con precipitazioni diffuse su tutto l'anno) ed estate calda.

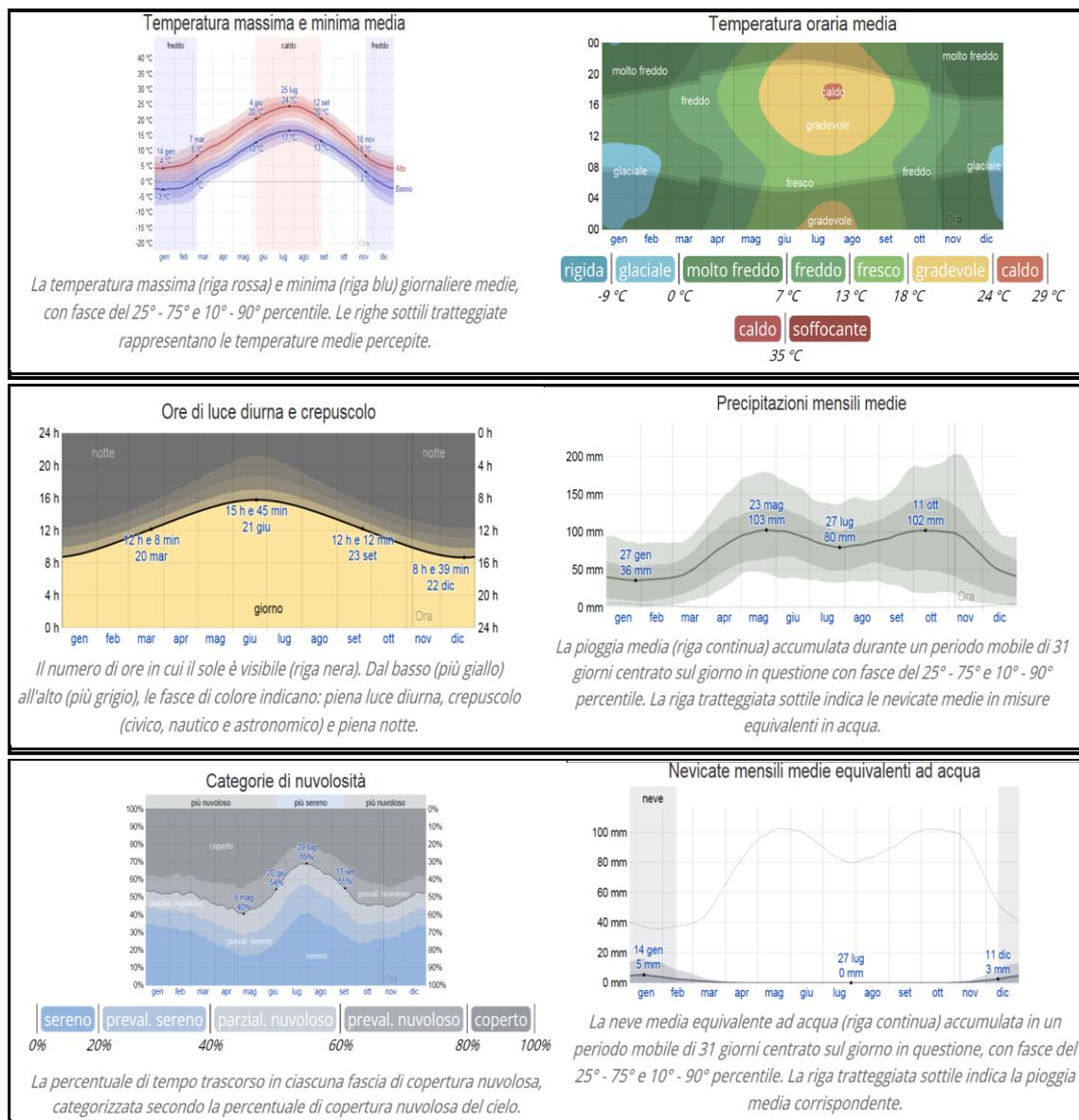


Fig. 27: principali descrittori climatici relativi al comune di Breno (fonte: [www.weatherspark.com](http://www.weatherspark.com))

## 2.4 Metodo di campionamento e raccolta dati dendrologici

I campionamenti sono stati effettuati su individui di *Larix decidua*, selezionando 48 piante egualmente ripartite in tre classi diametriche e considerando solamente piante vive ed in piedi. La tecnica utilizzata per il campionamento è quella standard, riportata da Phipps, 1985. La selezione in campo ha volutamente escluso individui con caratteristiche esteriori anomale, dovute sia a cause di natura morfofisiologica che a cause ambientali (crescita a candelabro, sciabolata, prostrata, con cimale

spezzato, con biforcazione del tronco, alberi colpiti da fulmini, alberi gravemente defogliati). Tali caratteristiche esteriori potrebbero infatti essere indice di eventuali anomalie negli accrescimenti legnosi stagionali durante il corso della vita degli individui stessi. Per ogni pianta selezionata sono stati prelevati due campioni radialmente, tra loro ortogonali ed il più possibile paralleli alla sezione trasversale del fusto, prelevando sempre un primo campione dalla porzione di fusto rivolta verso monte ed un secondo campione da una delle due porzioni laterali. I campioni sono stati prelevati ad un'altezza standard di 1,30m ( $\pm 0,15$ m) dalla base del fusto, altezza a cui è stato anche effettuato il rilievo della misura del diametro (DBH, "diameter at breast height") tramite l'uso di rotella diametrica. Il prelievo, che consiste fisicamente in un carotaggio della pianta selezionata, restituisce un campione cilindrico di legno, detto "carota", il quale dovrebbe comprendere dalla corteccia esterna fino al centro del fusto. Non in tutti i casi è stato possibile raggiungere il centro del fusto a causa dei limiti dimensionali della sonda. Le carote sono state prelevate con un apposito strumento, il succhiello di Pressler, un tipo di sonda incrementale, costituito da un'impugnatura, una trivella cava con lama in acciaio ad alta resistenza, e da un estrattore (*fig.17*). Il succhiello di Pressler in dotazione ha consentito di ottenere carote di 5mm di diametro e fino a 40cm di lunghezza.

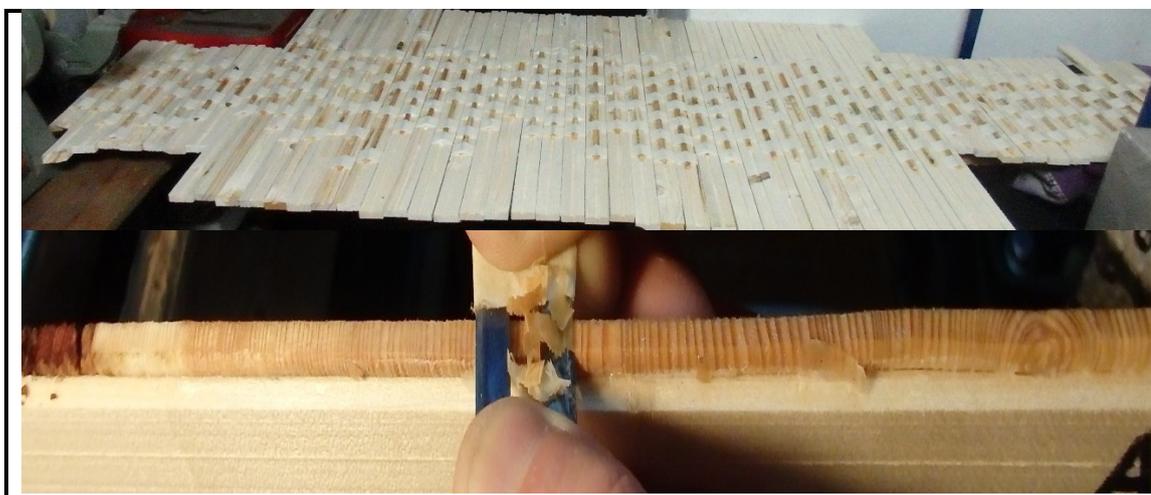


*Fig.17: sonda incrementale ed estrazione del campione di legno da Larix decidua*

I campioni così ottenuti sono stati fissati su dei supporti provvisori ed identificati attraverso un codice alfanumerico. Per ogni albero, al momento del campionamento, è stato redatto un foglio di rilievo con le informazioni raccolte in campo, tra cui la specie campionata, il DBH, le coordinate geografiche, l'altitudine, l'esposizione, il DBH delle piante presenti nei 5m di raggio a partire da quella campionata ed eventuali note su condizioni di crescita particolari (crescita su terreno a forte pendenza, con evidente presenza di rocce affioranti, vicinanza di corpi idrici) (*tab.1*). Sono state ottenute in totale 95 carote. In alcuni casi sono stati ottenuti campioni incompleti o non utilizzabili, ad esempio per la presenza di carie interne del legno; si è dovuto procedere con ulteriori tentativi di campionamento in diverse zone del fusto o si è reso necessario abbandonare la pianta selezionata, sostituendola. In un caso si è incontrata durante il carotaggio una tasca di resina, che ha costretto al prelievo di un solo campione ed alla successiva ripulitura del succhiello di Pressler, reso inutilizzabile dall'abbondante fuoriuscita della resina.

## 2.5 Preparazione dei campioni

La fase di preparazione dei campioni è stata preceduta da una giornata di formazione sull'argomento in data 06/09/2018, presso il Laboratorio di Dendrocronologia del Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente dell'Università degli studi di Pavia. La formazione sulle tecniche ed i metodi di preparazione dei campioni per la successiva fase di lettura degli anelli è stata tenuta dalla Prof.ssa Paola Nola. In un primo momento i campioni sono stati delicatamente trasferiti dai supporti temporanei utilizzati in campo su degli appositi supporti in legno di abete. Successivamente le carote sono state fissate ai relativi supporti mediante l'uso di colla vinilica, facendo particolare attenzione a mantenere il più possibile l'orientamento delle fibre del legno verticale rispetto al supporto, per garantire una migliore lavorabilità nelle fasi successive ed una corretta visualizzazione della sezione trasversale delle tracheidi nella fase di lettura. Una volta fissate e lasciate asciugare, le carote sono state sottoposte ad una fase di levigatura a mano con l'utilizzo di lame in acciaio (*fig. 18*). Questa operazione è servita ad ottenere una superficie piana e liscia, che evidenziasse al meglio gli anelli di accrescimento. Le carote sono state successivamente stemperate con una soluzione di acqua e gesso, procedimento che mette in risalto la differenza cromatica tra il legno primaverile, con tracheidi di diametro maggiore in grado di adsorbire la soluzione, ed il legno estivo, caratterizzato da tracheidi di dimensione minore dove le particelle di gesso non riescono a penetrare. Si sono così ottenute bande chiare di legno primaverile che contrastano maggiormente con il colore scuro del legno estivo-autunnale. Le carote preparate in tal modo sono pronte per le successive fasi di lettura e misura degli anelli.

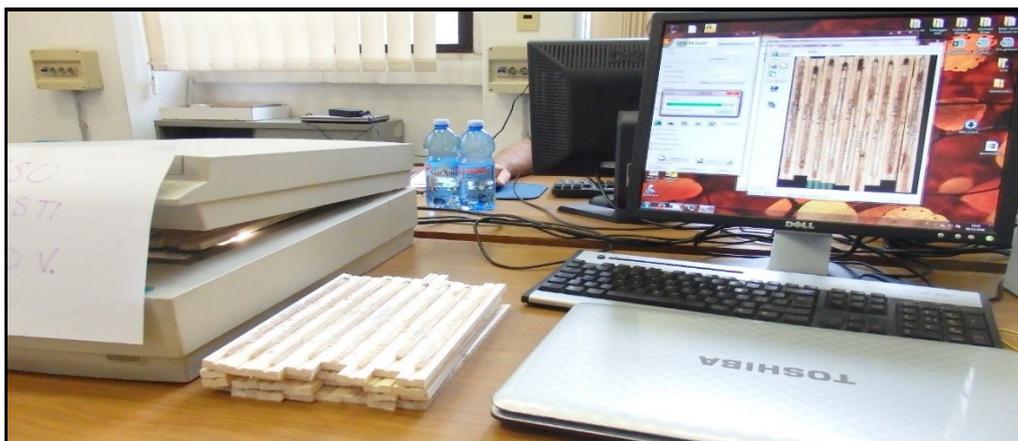


*Fig. 18: fase di incollaggio e levigatura dei campioni*

## 2.6 Misura degli accrescimenti legnosi e costruzione delle cronologie

Si è proceduto con la scansione delle carote tramite uno scanner ad elevata profondità di campo, utilizzando una risoluzione di 2400dpi, in modo da ottenere immagini con una definizione adeguata a facilitare la successiva fase di lettura degli anelli (*fig. 19-20*). Il software utilizzato per il conteggio degli anelli di accrescimento

e per la misura della loro ampiezza è “Cybis CooRecorder - Image Coordinate Recording program”, distribuito da “Cybis Elektronik & Data AB”. Con tale programma sono stati individuati, misurati e datati i vari anelli di accrescimento delle singole carote legnose a partire dalla corteccia esterna fino a raggiungere ove possibile il centro, altrimenti stimato tramite un’apposita funzione del programma. Si sono così prodotte due serie anulari per ogni pianta, derivanti una dalla carota “a monte”, denominata carota X, ed una dalla carota “laterale”, denominata carota Y, le quali contengono l’informazione delle ampiezze assolute degli anelli e della loro relativa collocazione temporale. Mediante l’utilizzo del software “CDendro - Cybis dendro dating program”, fornito anch’esso da “Cybis Elektronik & Data AB”, le due serie di ogni pianta sono state tra loro mediate al fine di ottenere la “cronologia media della pianta”; questa operazione è stata svolta solo quando i valori dei parametri statistici considerati, ossia il coefficiente di correlazione e il t-test, sono risultati superiori ad una soglia prefissata ( $CorrC > 0,60$ ;  $t\text{-test} > 5,0$ ). In questa fase i dati e le misurazioni sono stati ripresi e confrontati più volte alla luce dei risultati temporanei ottenuti con le serie anulari delle altre piante campionate, al fine di eliminare errori grossolani ed una parte di variabilità sempre presente dovuta a fenomeni, di origine ambientale, che producono falsi anelli, anelli mancanti o anelli incompleti. Queste anomalie nella formazione di un anello di crescita regolare sono il risultato di disturbi che occorrono prevalentemente durante la fase vegetativa, come fulmini, incendi, gelate precoci, gelate tardive, stress idrici, temperature estreme, carenze di elementi nutritivi, gravi defogliazioni, e che si ripercuotono sull’attività cambiale in diverso modo e con differenti effetti. Gli effetti sulla crescita possono anche mostrarsi con un certo ritardo rispetto al fenomeno che li ha prodotti. I falsi anelli, gli anelli mancanti o quelli incompleti possono portare ad errori nella corretta datazione dei singoli anelli di un campione e compromettere l’esatta sincronizzazione delle serie anulari. Nei casi in cui non si riesca con sicurezza a riconoscere e determinare la presenza di questi tipi di anomalie durante la formazione di un anello è importante non utilizzare il campione su cui si hanno dei dubbi, onde evitare problemi nella successiva fase di cross-datazione. Durante questa fase di costruzione di una cronologia anulare media per ogni albero campionato, sono stati riscontrati sei casi in cui si è prudentemente preferito non mediare le carote X e Y: in due di questi casi, una delle due carote è stata valutata non attendibile e quindi non considerata nelle fasi successive, mentre nei rimanenti quattro casi sono stati rilevati valori di correlazione molto bassi e si è quindi preferito mantenere le singole serie per poterle confrontare successivamente con delle medie provvisorie del sito, valutando eventualmente se scartarle entrambe o considerarne una sola delle due ai fini dell’analisi statistica.



*Fig.19: fase di scansione dei campioni*



*Fig.20: esempi di scansione dei campioni legnosi*

Sempre tramite l'utilizzo del software CDendro, le serie anulari medie risultanti dalle due carote di ogni pianta campionata sono state confrontate e mediate tra loro al fine di ottenere una serie anulare media del sito. Le singole carote medie sono state tra loro confrontate e mediate solo quando i valori dei parametri statistici considerati fossero maggiori di determinati limiti concordati. Anche in questa fase il lavoro di continua revisione e confronto delle singole serie anulari ha permesso di individuare ed eliminare errori compiuti nelle fasi di lettura degli anelli; sono stati determinati inoltre con maggior sicurezza eventuali "falsi anelli" o "anelli mancanti" che erano rimasti di dubbia valutazione fino a questo momento. Per questa operazione di costruzione della cronologia media stagionale sono state considerate due diverse soglie al fine di ottenere due medie differenti. In un caso sono stati posti come limiti minimi dei valori di correlazione maggiormente elevati ( $CorrC > 0,70$ ;  $t\text{-test} > 11,0$ ) al fine di ottenere una serie anulare media risultante più precisa e sensibile. Tale media è stata ottenuta mediando i dati di un totale di 20 piante medie ed è stata identificata come "media finale up". In un secondo caso si è proceduto mantenendo come limiti minimi dei valori inferiori ( $CorrC > 0,60$ ;  $t\text{-test} > 7,0$ ) ottenendo una media meno precisa ma supportata da un maggior numero di piante medie. In questo secondo caso sono state incluse nella media 44 piante sulle 48 campionate ed è stata identificata come "media finale 2". La media utilizzata in seguito per la parte delle analisi delle relazioni clima-accrescimento è stata quella ottenuta con i valori soglia di correlazione maggiori, ossia "media finale up". Tale serie cronologica media è stata quindi salvata in un formato che consente di mantenere disponibili le informazioni necessarie alla successiva fase di analisi statistica. Per procedere alla costruzione della serie media stagionale si è iniziato mediando le singole serie che risultavano tra loro meglio correlate ed integrando per step successivi le altre singole serie anulari alla serie media provvisoria. I coefficienti di correlazione ed il t-

test del confronto tra le singole serie anulari con la media delle rimanenti serie hanno infatti valori che superano le soglie prefissate per la costruzione della serie cronologica media stazionaria. La successiva fase di elaborazione dei dati, finora grezzi, e di analisi statistica è stata effettuata tramite il software open source Rstudio, Version 1.2.1335 © 2009-2019 Rstudio, Inc.. Tramite questo software e grazie a degli appositi script forniti dal prof. Giorgio Vacchiano (*fig.34*, in Appendice) si è proceduto alla fase conclusiva del lavoro. L'analisi statistica effettuata consiste in primo luogo nel calcolo di una serie di indici che permettono la valutazione della qualità della cronologia ottenuta (mean sensitivity, EPS, SNR, Rbar, Series intercorrelation, autocorrelazione, profondità campione). Nelle operazioni seguenti è stato stimato e rimosso quello che viene chiamato "Growth-trend" (Gt), mediante la standardizzazione, o *detrending*, delle singole serie anulari. Il *detrending* è necessario in quanto stima e rimuove la naturale tendenza di crescita biologica della pianta e compensa le variazioni nella geometria del fusto che si ripercuotono sullo spessore anulare, a parità di biomassa prodotta. Nello specifico è stato effettuato un doppio *detrending* (Holmes *et al.*, 1986), utilizzando prima un modello classico di una curva non lineare di crescita biologica della forma  $f(t)=a^{exp(bt)}+k$ , dove l'argomento della funzione è il tempo, utilizzando il modello di regressione non lineare dei minimi quadrati. Il risultato è stato quindi sottoposto ad un'ulteriore fase di *detrending* secondo il metodo d'interpolazione "smoothing spline" che utilizza una funzione spline (una funzione che utilizza diversi polinomi raccordati tra loro per interpolare un insieme di punti appartenenti all'intervallo di definizione) dove la risposta di frequenza è di 0,5 ad una lunghezza d'onda di 2/3 della lunghezza della serie in anni (Cook e Kairiukstis, 1990). Al contempo i valori delle ampiezze anulari vengono indicizzati, cioè ogni serie viene divisa per la tendenza media di crescita, al fine di ottenere ampiezze adimensionali tra loro confrontabili (RWI: ring-width index). In seguito, è stata analizzata l'autocorrelazione della cronologia, per testare la dipendenza di una misurazione anulare dall'accrescimento dell'anno o degli anni precedenti. Le analisi climatiche sono state effettuate tramite l'utilizzo del pacchetto DENDROCLIM2002 di R (Zhang, 2019). Sono state eseguite le correlazioni climatiche con i due fattori che presumibilmente influiscono maggiormente sull'accrescimento legnoso, ovvero la media delle temperature medie giornaliere del mese misurate in gradi Celsius e le precipitazioni cumulate del mese misurate in millimetri, con due metodi presenti nel programma (metodo "corr" e metodo "resp"). Sono state successivamente effettuate correlazioni a media mobile con i due fattori climatici indagati, con una finestra di 25 anni. I dati climatici (temperatura media mensile e precipitazione mensile) sono stati ottenuti dal "Climatic Research Unit" della University of East Anglia (<https://crudata.uea.ac.uk/>); il grigliato copre il territorio con una risoluzione di 0,5° e rende disponibili i dati climatici a partire dal 1901. Infine, è stata elaborata una funzione multivariata del Gershunov-test, cioè il test proposto da Gershunov *et al.* (2001), per testare la significatività delle variazioni in bassa frequenza nella correlazione mobile. Come ultima analisi è stato effettuato un confronto tra la cronologia media stazionaria e quattro cronologie alpine di larice sempre tramite il software CDendro.

## 2.7 Formulario

- $TTest = c * \sqrt{\frac{n-2}{1-c^2}}$  dove: n=overlap; c=correlation coefficient.

- Series intercorrelation: 
$$r_{xy} = \frac{\sum_{t=1}^{t=n} (x_t - m_x)(y_t - m_y)}{(n-1)s_x s_y}$$

dove: x=cronologia campione; y=master chronology;  $x_t$ =valore indicizzato della cronologia campione all'anno t;  $y_t$ =valore indicizzato della master chronology all'anno t;  $m_x$ =media valori indicizzati della cronologia campione;  $m_y$ =media valori indicizzati della master chronology;  $s_x$ =deviazione standard della cronologia campione;  $s_y$ =deviazione standard della master chronology; n=numero degli anni confrontati.

- Mean sensitivity: 
$$mS_x = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{t=n-1} \left| \frac{2(X_{t+1} - X_t)}{X_{t+1} + X_t} \right|$$

dove:  $X_t$ =ampiezza anulare all'anno t;  $X_{t+1}$ =ampiezza anulare all'anno t+1; n=numero degli anni confrontati.

- Expressed Population Signal: 
$$EPS_t = \frac{t * r_{bt}}{t * r_{bt} + (1 - r_{bt})}$$

dove: t=numero medio delle serie anulari;  $r_{bt}$ =correlazione media tra serie anulari.

- Signal to Noise Ratio: 
$$SNR = N \cdot \frac{\bar{r}}{(1 - \bar{r})}$$

dove:  $\bar{r}$ = correlazione media tra serie anulari; N=numero delle serie anulari.

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONI

#### 3.1 Rilievi in campo

I dati dei rilievi dendrologici effettuati in campo sono stati riportati in un foglio di lavoro Excel per le successive elaborazioni (tab.1). Qui vengono riportate le coordinate geografiche e l'altitudine di ogni albero campionato, il DBH con la relativa classe diametrica, l'area basimetrica dell'area di saggio e ad ettaro delle piante presenti in 5m di raggio da quella campionata e l'esposizione del sito di campionamento. Sono riportati inoltre il codice alfanumerico identificativo di ogni campione, la data di campionamento, il sito e gli operatori coinvolti.

Tab.1: dati dei rilievi effettuati in campo e dei parametri dendrometrici rilevati

DATA	OPERATORI	SITO	COD. IDENTIFICAZ.	COORD. NORD	COORD. EST	ALTITUDINE (m s.l.m.)	DBH (m)	CLASSE DIAMETR.	G area saggio (m <sup>2</sup> )	G ad ettaro (m <sup>2</sup> /ha)	ESPOSIZIONE
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A01LD718	45°92'11"	10°39'17"	1760	0,28	1	0,44	56,43	SUD
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A02LD718	45°92'11"	10°39'17"	1755	0,44	2	0,39	49,96	SUD
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A03LD718	45°92'12"	10°39'18"	1750	0,50	3	0,16	20,29	SUD
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A04LD718	45°92'11"	10°39'20"	1740	0,35	1	0,29	36,58	SUD
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A05LD718	45°92'13"	10°39'20"	1790	0,31	1	0,22	27,90	SUD
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A06LD718	45°92'12"	10°39'19"	1780	0,38	2	0,32	40,60	SUD
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A07LD718	45°92'11"	10°39'19"	1740	0,43	2	0,42	53,03	SUD
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A08LD718	45°92'12"	10°39'18"	1730	0,52	3	0,19	23,84	SUD
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A09LD718	45°92'11"	10°39'21"	1735	0,49	2	0,07	8,65	SUD
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A10LD718	45°92'12"	10°39'21"	1720	0,42	2	0,20	25,84	SUD
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A11LD718	45°92'13"	10°39'22"	1770	0,49	2	0,55	70,06	SUD
29/07/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A12LD718	45°92'13"	10°39'21"	1770	0,55	3	0,43	55,22	SUD
06/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A13LD818	45°92'13"	10°39'21"	1720	0,51	3	0,15	18,75	SUD
06/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A14LD818	45°92'14"	10°39'23"	1810	0,58	3	0,47	59,28	SUD
06/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A15LD818	45°92'12"	10°39'22"	1730	0,41	2	0,20	25,90	SUD
06/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A16LD818	45°92'11"	10°39'22"	1690	0,50	2	0,41	52,78	SUD
06/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A17LD818	45°92'10"	10°39'22"	1740	0,51	3	0,30	38,26	SUD
06/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A18LD818	45°92'10"	10°39'21"	1730	0,43	2	0,34	43,77	SUD
06/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A19LD818	45°92'12"	10°39'23"	1775	0,39	2	0,56	71,66	SUD
07/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A20LD818	45°92'10"	10°39'23"	1710	0,32	1	0,05	5,95	SUD
07/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A21LD818	45°92'11"	10°39'22"	1730	0,31	1	0,27	35,01	SUD
07/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A22LD818	45°92'11"	10°39'23"	1660	0,41	2	0,08	10,13	SUD
07/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A23LD818	45°92'10"	10°39'23"	1740	0,33	1	0,21	26,17	SUD
07/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A24LD818	45°92'11"	10°39'21"	1710	0,28	1	0,25	31,26	SUD
07/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A25LD818	45°92'11"	10°39'22"	1740	0,34	1	0,14	18,13	SUD
07/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A26LD818	45°92'11"	10°39'22"	1690	0,30	1	0,08	10,10	SUD
07/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A27LD818	45°92'10"	10°39'22"	1700	0,29	1	0,09	11,73	SUD
07/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A28LD818	45°92'10"	10°39'21"	1710	0,28	1	0,17	21,07	SUD
07/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A29LD818	45°92'11"	10°39'22"	1730	0,45	2	0,07	9,11	SUD
07/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A30LD818	45°92'12"	10°39'23"	1710	0,56	3	0,20	25,29	SUD
08/08/2018	LECCHI	BAZ2	B31LD818	45°91'98"	10°39'35"	1770	0,63	3	0,68	86,00	SUD-OVEST
08/08/2018	LECCHI	BAZ2	B32LD818	45°91'98"	10°39'34"	1785	0,86	3	0,41	51,93	SUD-OVEST
08/08/2018	LECCHI	BAZ2	B33LD818	45°91'97"	10°39'34"	1790	0,87	3	0,11	13,41	SUD-OVEST
08/08/2018	LECCHI	BAZ2	B34LD818	45°91'97"	10°39'36"	1780	0,66	3	0,47	59,90	SUD-OVEST
08/08/2018	LECCHI	BAZ2	B35LD818	45°91'98"	10°39'30"	1770	0,64	3	0,16	20,78	SUD-OVEST
08/08/2018	LECCHI	BAZ2	B36LD818	45°91'98"	10°39'31"	1770	0,56	3	0,46	58,54	SUD-OVEST
09/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ2	B37LD818	45°91'98"	10°39'33"	1780	0,64	3	0,55	69,41	SUD-OVEST
09/08/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ2	B38LD818	45°91'97"	10°39'33"	1760	0,79	3	0,24	30,74	SUD-OVEST
26/08/2018	LECCHI	BAZ2	B39LD818	45°91'98"	10°39'32"	1770	0,64	3	0,59	74,96	SUD-OVEST
08/09/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A40LD918	45°92'13"	10°39'28"	1730	0,36	2	0,24	31,14	SUD
08/09/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A41LD918	45°92'13"	10°39'28"	1710	0,44	2	0,13	15,99	SUD
08/09/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A42LD918	45°92'11"	10°39'29"	1720	0,46	2	0,10	12,93	SUD
08/09/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A43LD918	45°92'11"	10°39'29"	1715	0,35	1	0,46	58,04	SUD
08/09/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A44LD918	45°92'11"	10°39'29"	1710	0,26	1	0,25	32,17	SUD
08/09/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A45LD918	45°92'10"	10°39'27"	1710	0,32	1	0,40	51,30	SUD
08/09/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A46LD918	45°92'10"	10°39'26"	1710	0,44	2	0,33	41,47	SUD
08/09/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A47LD918	45°92'10"	10°39'26"	1700	0,31	1	0,13	16,86	SUD
08/09/2018	LECCHI-BONIOTTI	BAZ1	A48LD918	45°92'12"	10°39'28"	1700	0,34	1	0,14	17,86	SUD

### 3.2 Analisi delle cronologie medie individuali

Nella *tab.2* sono riportati i valori del coefficiente di correlazione e del t-test ottenuti nella fase di mediazione delle due serie ottenute dai rispettivi campioni di ogni singola pianta e l'identificazione delle singole serie che saranno incluse nella costruzione delle due cronologie medie stazionali.

*Tab.2: parametri statistici della correlazione tra carota X e carota Y e identificazione dei campioni utilizzati per la costruzione delle cronologie medie stazionali*

CODICE IDENTIFICAZ.	CorrC tra carota X e Y	TT tra carota X e Y	media finale 2 (corrC>0,6- TT>7,0)	media finale up (corrC>0,7- TT>11,0)
A01LD718	0,75	9,70	x	
A02LD718	0,70	8,40	x	
A03LD718	0,85	14,80	x	
A04LD718	0,80	10,30	x	
A05LD718	0,72	12,50	x	x
A06LD718	0,86	11,20	x	
A07LD718	0,70	7,20	x	
A08LD718	0,69	7,70	x	
A09LD718	0,70	10,80	x	
A10LD718	0,70	6,90		
A11LD718	/	/	x	
A12LD718	0,73	12,50	x	x
A13LD818	0,74	13,20	x	x
A14LD818	0,75	13,70	x	x
A15LD818	0,81	11,60	x	
A16LD818	0,81	14,70	x	x
A17LD818	0,78	15,90	x	x
A18LD818	0,73	12,30	x	
A19LD818	/	/	x	
A20LD818	0,62	5,80	x	
A21LD818	0,64	6,80	x	
A22LD818	0,86	17,90	x	x
A23LD818	0,91	22,30	x	
A24LD818	0,77	11,30	x	
A25LD818	0,83	15,00	x	
A26LD818	0,78	12,30	x	
A27LD818	/	/	x	x
A28LD818	/	/	x	
A29LD818	0,72	12,40	x	x
A30LD818	0,77	13,70	x	x
B31LD818	0,81	16,30	x	x
B32LD818	0,85	16,60	x	
B33LD818	/	/	x	
B34LD818	0,86	20,50		
B35LD818	0,87	22,20	x	x
B36LD818	0,83	18,50	x	x
B37LD818	0,23	3,10		
B38LD818	0,75	13,30	x	
B39LD818	0,86	20,40	x	x
A40LD918	0,93	25,10	x	x
A41LD918	0,85	21,40	x	x
A42LD918	/	/	x	x
A43LD918	0,80	17,20	x	x
A44LD918	0,72	9,30		
A45LD918	0,81	11,10	x	
A46LD918	0,79	17,40	x	x
A47LD918	0,90	18,50	x	x
A48LD918	0,85	13,30	x	
<b>TOTALE</b>	/	/	<b>44</b>	<b>20</b>

### 3.3 Cronologia media stagionale

Nella *tab.3* è mostrato il report di correlazione incrociata tra le varie serie anulari medie delle singole piante da cui è stata ottenuta la serie annuale "media finale up".

*Tab.3: cross correlation "Media finale up" - Legenda: CorrC= coefficiente di correlazione; TTest= t-test; Olap= overlap*

	Rest	A05LD 718	A12LD 718	A13LD 818	A14LD 818	A16LD 818	A17LD 818	A22LD 818	A27LD 818-Y	A29LD 818	A30LD 818	A40LD 818	A41LD 818	A42LD 818-Y	A43LD 818	A46LD 818	A47LD 818	B31LD 818	B34LD 818- BIS	B36LD 818	B39LD 818
Dated:	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018
	Corr TTest Olap																				
Rest		0,85 14,5 80	0,72 12,6 80	0,80 17,1 163	0,80 16,7 164	0,74 14,0 168	0,79 16,9 175	0,81 16,1 135	0,80 13,6 106	0,79 17,0 174	0,85 18,3 127	0,82 13,9 99	0,82 20,1 193	0,79 17,9 193	0,81 18,0 170	0,75 15,6 192	0,77 11,8 94	0,72 12,5 149	0,70 12,6 171	0,80 17,2 170	0,74 14,5 170
A05L D718	81		0,81 12,2 80	0,76 10,2 80	0,82 12,8 80	0,70 8,0 80	0,69 10,9 80	0,69 8,4 80	0,73 9,4 80	0,78 11,2 80	0,73 8,4 80	0,72 9,1 80	0,77 10,7 80	0,74 9,9 80	0,74 9,6 80	0,74 9,7 80	0,73 9,4 80	0,68 8,2 80	0,69 8,5 80	0,73 9,3 80	0,77 10,7 80
A12L D718	148	81		0,55 8,0 147	0,61 9,3 147	0,67 10,9 147	0,67 10,7 147	0,55 8,1 135	0,62 11,9 106	0,70 9,7 147	0,73 11,9 127	0,56 6,7 99	0,66 10,7 147	0,62 9,6 147	0,65 10,3 147	0,66 10,5 147	0,59 9,4 94	0,48 6,6 147	0,49 6,7 147	0,50 6,9 147	0,49 6,8 147
A13L D818	164	81	148		0,70 12,6 163	0,58 8,9 163	0,64 10,5 163	0,71 11,6 135	0,63 10,2 106	0,69 10,7 163	0,70 9,7 163	0,65 10,8 163	0,65 10,9 163	0,66 11,2 163	0,66 10,9 163	0,65 11,2 163	0,57 5,7 94	0,62 9,5 149	0,64 10,5 163	0,70 13,2 163	0,75 14,4 163
A14L D818	165	81	148	164		0,66 11,2 164	0,67 11,5 164	0,67 10,4 135	0,68 9,1 106	0,69 11,7 164	0,72 10,6 127	0,63 10,3 164	0,63 10,3 164	0,60 9,4 164	0,64 10,7 164	0,62 10,2 164	0,70 9,5 94	0,53 7,6 149	0,58 9,0 164	0,69 12,3 164	0,70 12,6 164
A16L D818	169	81	148	164	165		0,65 10,9 168	0,65 8,1 135	0,75 8,8 106	0,71 14,6 168	0,64 11,4 127	0,64 8,3 168	0,60 10,7 168	0,58 9,2 168	0,55 8,5 168	0,55 8,7 94	0,67 7,8 149	0,54 7,4 149	0,50 7,4 168	0,60 9,6 168	0,52 7,9 168
A17L D818	176	81	148	164	165	169		0,73 12,2 135	0,61 7,9 106	0,68 12,1 174	0,74 12,4 127	0,69 9,4 99	0,66 11,5 175	0,63 10,7 175	0,70 12,7 175	0,68 12,0 175	0,68 8,9 94	0,62 9,7 149	0,63 10,5 170	0,63 10,5 170	0,62 10,4 170
A22L D818	136	81	148	164	165	169	176		0,73 11,0 106	0,61 9,0 135	0,71 12,4 127	0,78 12,3 99	0,73 12,4 135	0,71 11,5 135	0,72 12,0 135	0,66 10,2 135	0,66 8,5 94	0,64 9,5 135	0,62 9,1 135	0,72 12,0 135	0,66 10,2 135
A27L D818 -Y	107	81	148	164	165	169	176	136		0,71 11,0 106	0,72 10,6 106	0,73 10,4 99	0,68 9,5 106	0,67 9,1 106	0,70 11,5 106	0,66 10,6 106	0,70 9,3 94	0,63 8,9 106	0,63 8,3 106	0,58 7,3 106	0,73 9,1 106
A29L D818	175	81	148	164	165	169	176	136	136		0,74 12,5 127	0,66 8,6 99	0,70 13,0 174	0,66 11,5 174	0,65 11,1 174	0,67 11,9 174	0,73 10,1 94	0,54 7,8 94	0,53 8,2 171	0,62 10,3 170	0,53 8,2 170
A30L D818	128	81	148	164	165	169	176	136	136	136		0,69 9,3 99	0,76 13,3 127	0,75 12,6 127	0,74 12,7 127	0,75 12,7 127	0,69 9,1 94	0,66 9,9 127	0,62 8,9 127	0,71 11,4 127	0,70 10,9 127
A40L D818	100	81	148	164	165	169	176	136	136	136	136		0,66 8,8 99	0,63 7,9 99	0,70 9,9 99	0,71 14,0 94	0,82 9,9 99	0,65 6,6 99	0,56 6,2 99	0,72 10,2 99	0,71 10,2 99
A41L D818	194	81	148	164	165	169	176	136	136	136	136	136		0,96 48,3 193	0,69 12,4 170	0,65 11,9 192	0,71 9,7 94	0,60 8,6 149	0,55 8,6 171	0,62 10,3 170	0,56 8,9 170
A42L D818 -Y	194	81	148	164	165	169	176	136	136	136	136	136	136		0,65 11,0 170	0,62 11,9 192	0,66 10,9 94	0,61 8,4 149	0,56 8,7 171	0,60 9,7 170	0,53 8,2 170
A43L D818	171	81	148	164	165	169	176	136	136	136	136	136	136	136		0,76 15,3 170	0,63 7,9 94	0,63 9,7 149	0,59 9,5 170	0,66 11,3 170	0,60 9,7 170
A46L D818	193	81	148	164	165	169	176	136	136	136	136	136	136	136	136		0,66 8,4 94	0,57 8,5 149	0,57 9,0 149	0,61 9,9 170	0,58 9,2 170
A47L D818	95	81	148	164	165	169	176	136	136	136	136	136	136	136	136	136		0,54 6,1 94	0,50 5,5 94	0,64 8,0 94	0,67 8,7 94
B31L D818	150	81	148	164	165	169	176	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136		0,62 9,7 149	0,64 10,0 149	0,67 11,0 149
B34L D818 -BIS	172	81	148	164	165	169	176	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136		0,65 11,2 170	0,66 11,2 170
B36L D818	171	81	148	164	165	169	176	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136		0,76 15,4 170
B39L D818	171	81	148	164	165	169	176	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136	
Minimum Corr	Rest	A05LD 718	A12LD 718	A13LD 818	A14LD 818	A16LD 818	A17LD 818	A22LD 818	A27LD 818-Y	A29LD 818	A30LD 818	A40LD 818	A41LD 818	A42LD 818-Y	A43LD 818	A46LD 818	A47LD 818	B31LD 818	B34LD 818- BIS	B36LD 818	B39LD 818
Minimum Corr	0,70	0,68	0,48	0,55	0,53	0,50	0,61	0,55	0,58	0,53	0,62	0,56	0,55	0,53	0,58	0,55	0,50	0,48	0,49	0,50	0,49

In questa tabella vengono riportati: i parametri statistici di CorrC e t-test del confronto tra le singole coppie di serie, l'*overlap*, ossia il numero di anni in cui le due serie a confronto si sovrappongono, e la lunghezza della serie anulare in anni. La lunghezza della serie più corta è di 81 anni e quella più lunga di 194 anni; la lunghezza media è 153 anni. Per *Larix decidua* non si tratta di valori molto elevati, potendo raggiungere longevità molto maggiori; essendo ignota la dinamica di evoluzione del popolamento e le utilizzazioni passate, non si possono avanzare ipotesi su tale caratteristica. L'*overlap* minimo è di 80 anni, dato dalla cronologia dell'individuo più giovane inserito nella cronologia media stazionale. Le diverse gradazioni di colore riflettono i valori del grado di correlazione tra le due serie confrontate (tonalità più scure all'aumentare dei coefficienti). È stata quindi generata la cronologia "media finale up", ottenuta dalle misure delle ampiezze anulari medie riferite all'anno di datazione dell'anello misurato: la linea spezzata verde è stata ottenuta utilizzando le ampiezze di accrescimento assolute mentre la linea spezzata rossa è il risultato delle misure di accrescimento dopo l'operazione di normalizzazione; per entrambe le spezzate viene visualizzata la relativa deviazione standard (fig.21). Sono ben visibili in questa rappresentazione i così detti "*pointer years*", ossia anni significativi, in quanto durante quella determinata stagione vegetativa la crescita dei vari individui analizzati ha subito una significativa variazione, positiva o negativa, in confronto all'accrescimento medio stazionale. Questi anni caratteristici hanno un'elevata valenza per l'indagine dendrocronologica in quanto sono utili nella verifica della corretta datazione della cronologia stazionale, che può esser effettuata tramite il confronto con altre cronologie ottenute in siti diversi ma che possono esser stati influenzati dai medesimi fenomeni di disturbo. Da notare inoltre la ricorrenza di picchi negativi, anche molto intensi; tali picchi corrispondono ad accrescimenti annuali molto ridotti. L'intensità dei picchi, la loro ciclicità e la letteratura in merito fanno propendere per l'ipotesi che gli anni in cui si riscontrano tali ridotti accrescimenti siano dovuti alle pullulazioni di *Zeiraphera griseana*. I picchi positivi possono esser considerati come anni con condizioni climatiche particolarmente favorevoli all'accrescimento del larice e quindi alla abbondante produzione di nuovo legno. Nei quattro decenni più recenti gli accrescimenti tendono a stabilizzarsi verso valori medi, mentre negli anni precedenti le variazioni di ampiezze assolute tra gli anelli sono maggiori. Ciò può essere in parte dovuto ad una età maggiore, dove gli elevati accrescimenti della fase giovanile non sono più apprezzabili, ed in parte alle dinamiche di crescita del popolamento studiato (es.: utilizzazioni passate, stabilizzazione della struttura del soprassuolo, ecc.).

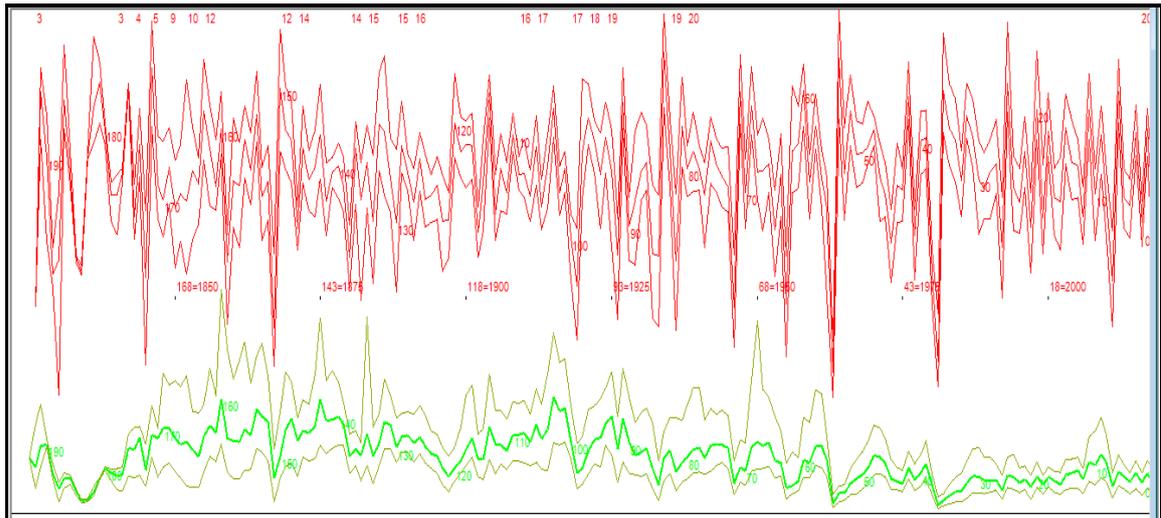


Fig.21: serie annuale “Media finale up”; in ascissa il tempo in anni e in ordinata l’ampiezza annuale; la linea verde rappresenta i valori assoluti dell’ampiezza annuale media e la deviazione standard, la linea rossa i valori normalizzati dell’ampiezza annuale media e la relativa deviazione standard.

Per verificare l’ipotesi della causa dei picchi negativi è stato effettuato il confronto tra un estratto della cronologia “media finale up” ed un estratto dallo studio di Wermelinger et al. (2018) sulle pullulazioni di *Zeiraphera g.*: sono ben evidenti le concordanze temporali tra i picchi positivi delle popolazioni del lepidottero ed i picchi negativi negli accrescimenti di *Larix decidua* (fig.22). Lo studio sulle pullulazioni si riferisce a dati ottenuti da popolamenti di larice in alta Valle Engadina; considerando che, da letteratura (Baltensweiler e Fischlin, 1988), le pullulazioni di *Zeiraphera g.* avvengono negli stessi anni considerando un gradiente latitudinale, mentre si scostano verso un gradiente longitudinale, il confronto può esser ritenuto significativamente valido.

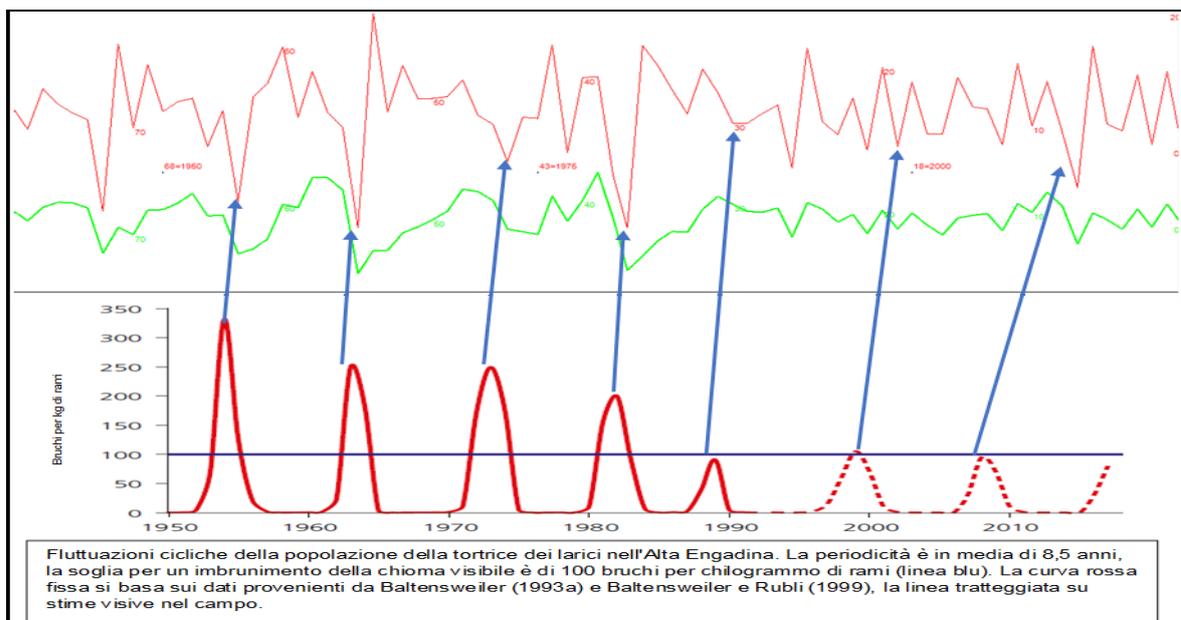


Fig.22: confronto tra un estratto della cronologia “media finale up” ed un estratto riadattato dallo studio di Wermelinger B. et al. (2018) sulle pullulazioni di *Zeiraphera griseana*.

In seguito, è stato generato un grafico rappresentante le singole serie costituenti la media e la loro estensione temporale; viene inoltre indicato il numero di campioni utilizzati nei diversi anni al fine della costruzione della cronologia media stagionale, ovvero la profondità del campione (fig.23). Dalla fine del XIX secolo in poi la profondità del campione è consistente, in quanto la cronologia media è formata da almeno 15 singole serie anulari.

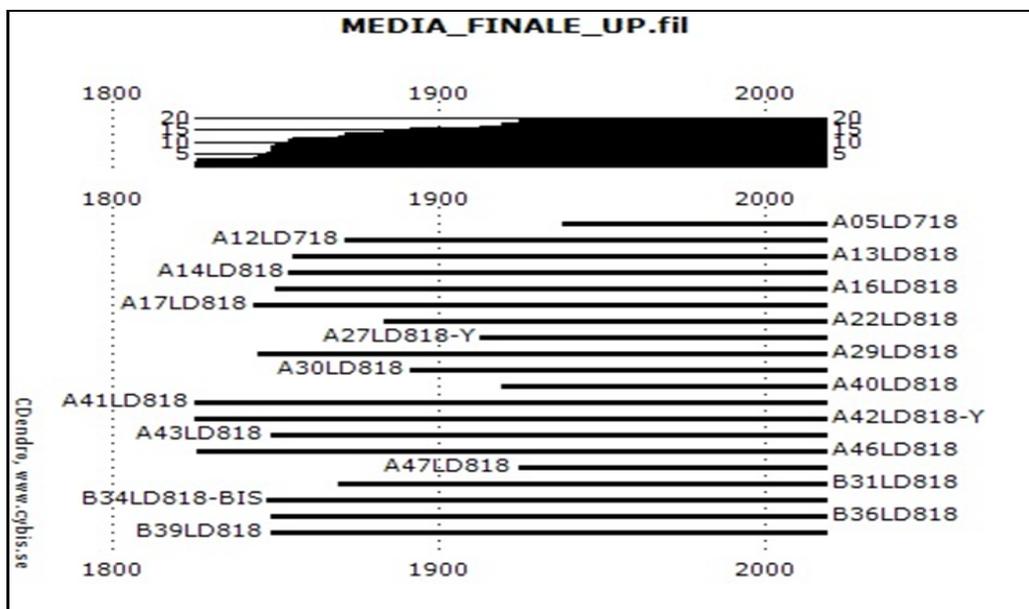


Fig.23: serie anulari inserite in "Media finale up" e loro relativa estensione temporale

Sono stati in seguito calcolati i valori degli indici statistici relativi alle singole serie costituenti la cronologia "media finale up" (tab.4).

Tab.4: parametri statistici delle serie anulari inserite in "Media finale up". *Legenda:* series= codice della serie anulare; first= anno inizio serie; last= ultimo anno serie; mean= media ampiezze anulari in mm; stdev= deviazione standard; skew (skewness)= indice di asimmetria; gini (Gini coeff.)= coefficiente di disuguaglianza di Gini; ar1= autocorrelazione di primo ordine

Number of dated series: 20		Number of measurements: 3060		Avg series length: 152,95					
Range: 194		Span: 1825 – 2018		Mean (Std dev) series intercorrelation: 0,6653568 (0,0823882)					
Mean (Std dev) AR1: 0,7755 (0,08627526)									
series	first	last	year	mean	median	stdev	skew	gini	ar1
A05LD718	1938	2018	81	1,552	1,410	0,675	0,521	0,244	0,763
A12LD718	1871	2018	148	1,216	1,025	0,692	1,316	0,301	0,803
A13LD818	1855	2018	164	1,136	1,050	0,495	0,711	0,241	0,687
A14LD818	1854	2018	165	1,140	1,030	0,543	0,928	0,259	0,788
A16LD818	1850	2018	169	1,255	1,160	0,808	0,827	0,355	0,849
A17LD818	1843	2018	176	1,146	0,935	0,618	0,579	0,302	0,761
A22LD818	1883	2018	135	0,697	0,640	0,349	1,492	0,259	0,491
A27LD818	1912	2018	107	0,930	0,640	0,735	1,386	0,410	0,818
A29LD818	1844	2018	175	0,937	0,750	0,657	1,439	0,360	0,841
A30LD818	1891	2018	128	1,214	1,055	0,885	0,783	0,403	0,885
A40LD818	1919	2018	100	1,407	1,180	0,777	0,582	0,308	0,785
A41LD818	1825	2018	194	0,981	0,875	0,524	0,961	0,290	0,782
A42LD818	1825	2018	194	0,929	0,840	0,499	1,369	0,284	0,705
A43LD818	1848	2018	171	0,889	0,800	0,557	0,728	0,349	0,803
A46LD818	1826	2018	193	0,982	0,800	0,590	1,140	0,324	0,794
A47LD818	1924	2018	95	1,329	1,060	0,860	0,862	0,354	0,757
B31LD818	1869	2018	150	1,466	1,015	1,207	1,590	0,422	0,801
B34LD818	1847	2018	172	1,293	1,200	0,541	0,770	0,231	0,692
B36LD818	1848	2018	171	1,173	0,810	1,131	1,970	0,459	0,883
B39LD818	1848	2018	171	1,275	1,100	0,665	1,475	0,267	0,822

L'estensione temporale delle serie varia da un minimo di 85 anni ad un massimo di 194 anni, con una lunghezza media di 153 anni, ed andando a coprire un arco temporale che va dal 1825 al 2018, per un totale di 3060 anelli misurati. L'intercorrelazione media tra le serie elaborate è di  $0,67 \pm 0,08$ : tale valore rappresenta la media delle singole correlazioni tra la singola cronologia e la cronologia media stazionale. A titolo di paragone, per 4 cronologie medie del gruppo Adamello-Presanella sono stati rilevati valori compresi tra  $0,66-0,75$  (Coppola et al., 2012). La media dell'indice AR1 di autocorrelazione di prim'ordine è di  $0,78 \pm 0,09$ ; ciò indica un'autocorrelazione positiva abbastanza intensa in quasi tutte le serie analizzate. In altri studi i valori ottenuti sono  $0,47-0,77$  (21 cronologie, Danek et al., 2018),  $0,86$  per una cronologia italo-slovena di 1242 anni (Levanič et al., 2001),  $0,67-0,93$  per 4 cronologie venete (Urbinati et al., 2004),  $0,51-0,88$  per 9 cronologie dell'arco alpino riportate nello studio di Urbinati et al., 2004, e  $0,17-0,71$  in 9 cronologie dell'arco alpino riportate da Leonelli et al., 2016. L'accrescimento medio anulare è di  $1,15 \pm 0,43$  mm e tale variabilità può esser spiegata in parte a causa delle differenti età degli individui ed in parte a causa delle diverse condizioni di crescita (profondità substrato, dominanza, area basimetrica G delle piante che crescono entro 5m di raggio dalla pianta campionata). Gli accrescimenti medi riscontrati si attestano intorno a valori medio-alti rispetto a quelli rilevati in cronologie ottenute nell'arco alpino ( $0,5$  mm Coppola et al., 2013;  $0,92-1,12$  mm Coppola et al., 2013;  $1,03$  mm Clalüna A., 2012;  $0,72-0,74$  mm Meile C., 2008;  $1,74$  mm Giertz V., 2002;  $0,42$  mm Clalüna A., 2012;  $0,48$  mm Bräker O.U. e Zingg A., 2010;  $0,78-1,87$  mm Coppola et al., 2012;  $0,92$  mm Levanič et al., 2001). La mediana risulta avere valori sempre inferiori alla media, significando che la distribuzione dei valori di accrescimento assume la forma di una gaussiana con asimmetria positiva, cioè con coda a destra. La deviazione standard calcolata è di  $0,69 \pm 0,43$  mm. I valori più elevati dell'indice di asimmetria sono riscontrati mediamente nelle piante più longeve; sono comunque tutti positivi per le serie analizzate, confermando la forma asimmetrica positiva della funzione di distribuzione ( $skewness=1,07 \pm 0,72$ ). Il coefficiente di disuguaglianza di Gini, che varia tra zero (distribuzione perfettamente omogenea) ed uno (distribuzione completamente sbilanciata), assume valori compresi tra  $0,23$  e  $0,46$  indicando una distribuzione dei valori tendenti all'omogeneità. È stato inoltre generato il classico "spaghetti-plot", un grafico che mette a confronto le serie medie delle singole piante costituenti la cronologia media (fig.24). Le fluttuazioni nell'accrescimento tendono generalmente ad attenuarsi, rimanendo spesso sotto la media, durante gli ultimi 40 anni ed in particolare per gli individui più giovani, probabilmente a causa del rallentamento fisiologico dei ritmi di crescita e della riduzione in spessore degli anelli, a parità di biomassa prodotta, dovuta al continuo incremento diametrico.

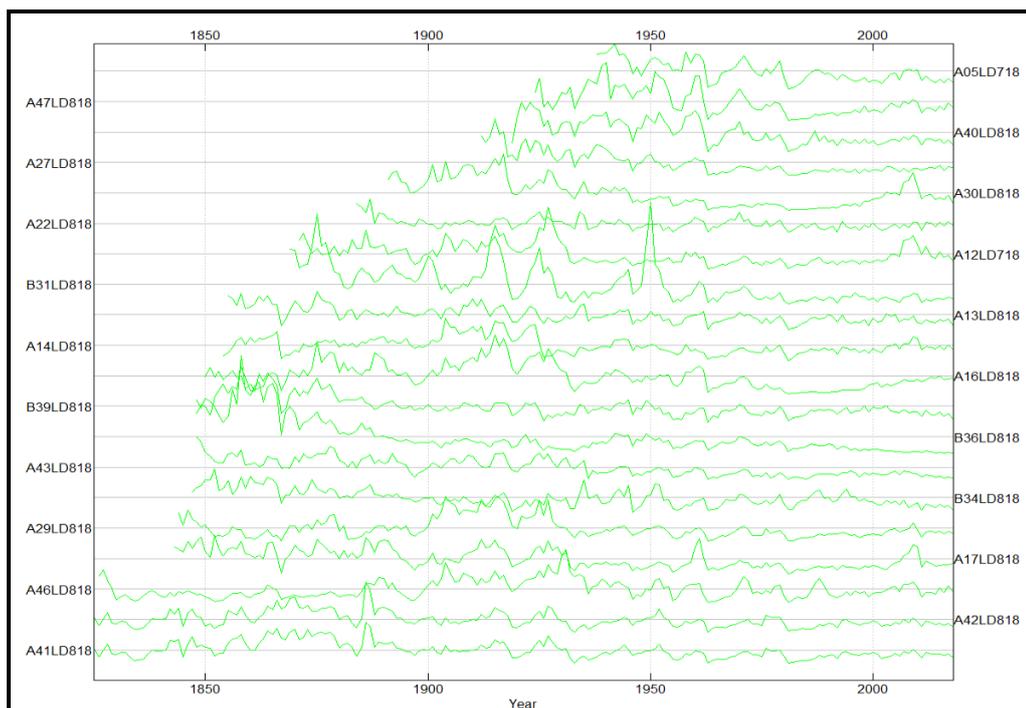


Fig. 24: spaghetti-plot delle serie anulari inserite in "media finale up"

Sono stati poi calcolati i valori degli indici statistici relativi alla cronologia "media finale up" (tab.5). Il numero totale delle serie che formano la cronologia è di 20 piante, mentre il numero medio di serie utilizzate nell'intero arco temporale coperto è di circa 15,8. Sono state calcolate 190 correlazioni tra le serie ed è stato ottenuto un valore di  $r_{bar}$  totale (cioè la media delle singole correlazioni bivariate) di circa 0,61. Tale valore esprime la misura in cui le piante campionate rispondono ai medesimi disturbi ambientali in modo univoco, fornendo quindi la bontà del segnale del campione al di fuori di ciò che possono essere le fluttuazioni dovute alle caratteristiche genetiche e di microstazionalità del singolo individuo. Per confronto, in uno studio di Carrer e Urbinati, 2006, i valori ottenuti su 17 cronologie stazionali di larice oscillano tra 0,29 e 0,68, mentre per 21 cronologie di larici nella catena dei Sudeti tra 0,39 e 0,61 (Danek et al., 2018). Il valore ottenuto di  $r_{bar}=0,61$  sta ad indicare che le piante selezionate durante il campionamento si correlano discretamente bene tra loro. Il valore ottenuto per l'EPS (Expressed Population Signal) è di 0,96. L'EPS rappresenta la quantità di varianza presente nella cronologia di un popolamento (teoricamente infinito) che è spiegata da un sottocampione finito. Vari autori riportano come un valore di EPS maggiore di una soglia di 0,85 sia indice di un'elevata qualità statistica della cronologia, valida quindi anche per l'utilizzo della stessa in ricostruzioni climatiche (Lebourgeois et al., 2005; Buras et al., 2012; Lyu et al., 2016). Altri autori riportano invece come esso non possa essere considerato significativo in tal senso (Wigley et al., 1984; Buras, 2017), ma solo come indice di quanto il segnale estrapolato dalle piante campionate rappresenti il segnale di un popolamento teoricamente infinito. Il segnale comune ottenuto dalle serie analizzate infatti non riflette necessariamente solo le forze climatiche, ma anche disturbi di altra natura (Wigley et al., 1984). L'elevato valore ottenuto per questo indicatore permette di affermare con buona probabilità che,

perlomeno, il sotto-campione esaminato sia rappresentativo del popolamento reale. La dimensione del sotto-campione e la scelta degli individui da carotare in campo sono quindi considerabili come adeguati al tipo di studio svolto. A titolo di paragone, un recente studio svolto su 21 popolamenti di *Larix d.* nella catena dei Sudeti (Polonia) riporta valori compresi tra 0,93 e 0,98 (Danek et al., 2018), mentre nello studio di Leonelli et al. (2016) i valori oscillano tra 0,88 e 0,92 su 9 cronologie alpine. Infine, nella tabella viene riportato il valore del SNR (Signal to Noise Ratio) ottenuto per la cronologia media stazionale. L'SNR è un ulteriore indicatore della forza del segnale, calcolato come il rapporto tra il segnale ipotizzato ed il rumore in esso compreso. L'SNR ottenuto di 24,3 indica che il rumore è almeno 24 volte inferiore al segnale, e che possiamo quindi dire che la maggior parte degli effetti non climatici a breve frequenza siano stati filtrati. In letteratura i valori sono variabili, compresi tra 7,6 e 32,5 (Urbinati et al., 2004), e tra 4,9 e 11,5 in uno studio di Leonelli et al., 2016.

Tab.5: parametri statistici relativi alla cronologia media stazionale

n cores	n trees	n	n.tot	n.wt	n.bt	rbar.tot	rbar.wt	rbar.bt	c.eff	rbar.eff	eps	snr
20	20	15,768	190	0	190	0,607	na	0,607	1	0,607	0,960	24,305

È stata successivamente generata la cronologia “media finale up” ottenuta dalla operazione di media effettuata sulle singole serie secondo la metodologia “Tukey's biweight robust mean”, una media che non risente dei valori “outlayer” (fig.25). In entrambi i grafici vengono riportati in ascissa gli anni di formazione degli anelli ed in ordinata l'ampiezza misurata indicizzata RWI: il poligono grigio indica da quante serie è stata ottenuta la cronologia media durante il relativo anno (profondità del campione), la linea grigia rappresenta i valori misurati indicizzati mentre la linea rossa rappresenta la medesima cronologia ma “ammorbidita” tramite l'utilizzo della funzione *spline*. Il grafico in alto mostra la “cronologia media standard” (Std), mentre il grafico in basso la “cronologia media residua” (Res). La cronologia residua è stata troncata quando la “profondità” del campione, ossia il numero di campioni utilizzati nell'operazione di media delle singole serie, scende sotto un certo valore di soglia. I picchi negativi sono da ricondurre probabilmente come anzidetto alle gradazioni di *Zeiraphera g.*, mentre i picchi positivi possono essere indice di stagioni climaticamente molto favorevoli alla crescita.

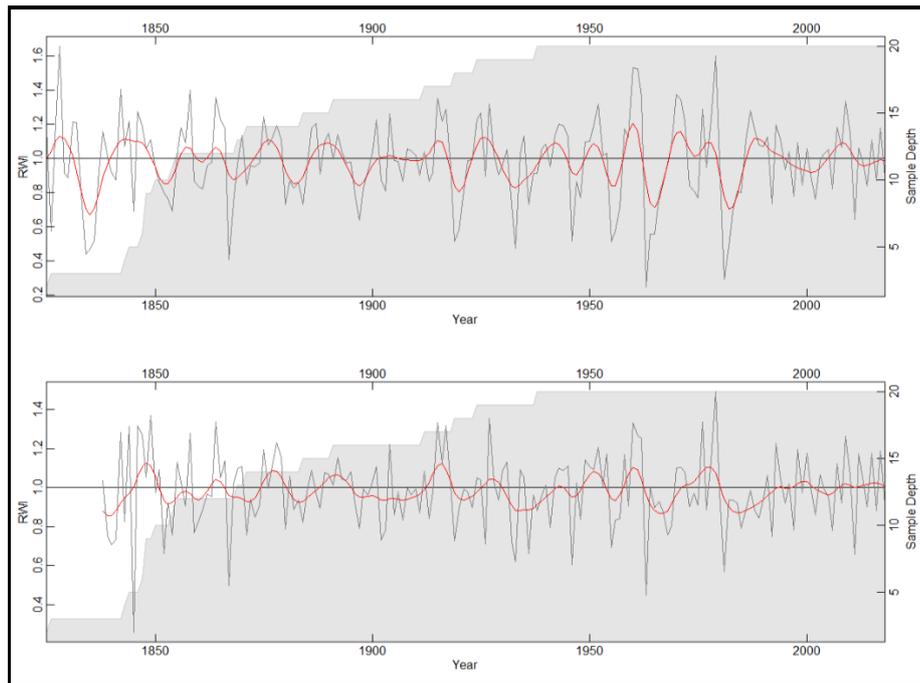


Fig.25: cronologia media standard (sopra) e cronologia media residua (sotto) – linea grigia: cronologia media standardizzata – linea rossa: cronologia media “smooth line” with spline 10 years – poligono grigio: numero di carote utilizzate per la cronologia media

Sempre tramite lo script di R, è stata calcolata la funzione di stima dell'autocorrelazione per la cronologia media stagionale (fig.26). L'autocorrelazione indica il grado in cui la variabile misurata “spessore di accrescimento in un dato anno  $t$ ”, sia dipendente dalla misura degli accrescimenti degli anni compresi tra  $t$  e  $t-n$ , cioè dagli accrescimenti di tutti gli anni a partire da  $n$  anni precedenti all'anno  $t$ . L'andamento sinusoidale della funzione, con una lunghezza d'onda di circa 8 anni, e che tende a smorzarsi a mano a mano che si procede a ritroso con gli anni, suggerisce che sia ancora presente un disturbo non climatico che influenza il segnale. Questo fenomeno di disturbo ambientale ricorrente con un lag medio di 8 anni è molto probabilmente rappresentato dalle pullulazioni di *Zeiraphera griseana*, come ipotizzato in precedenza. L'andamento sinusoidale è comunque in parte legato anche alla stagionalità ed alla fisiologia di crescita: un anno di crescita particolarmente positivo permette ad esempio al larice di poter immagazzinare maggiori risorse per la stagione successiva; viceversa un anno caratterizzato da una stagione vegetativa più breve o climaticamente sfavorevole del solito ricade sulla quantità di riserve disponibili per l'anno a venire. I valori di autocorrelazione che sono esterni alla banda tratteggiata blu indicano la presenza di autocorrelazione significativa di lag corrispondente all'anno in cui si presentano. Nel nostro caso un valore significativamente superiore alle bande limite è quello avente  $lag=1$ , ad indicare che la crescita di un determinato anno è direttamente proporzionale alla crescita avvenuta nell'anno precedente. Sono inoltre presenti alcuni valori ( $lag=3,4,5,6,13,17,18$ ) che sono esterni alla banda tratteggiata e che si trovano in corrispondenza dei picchi d'onda positivi e negativi della funzione di autocorrelazione.

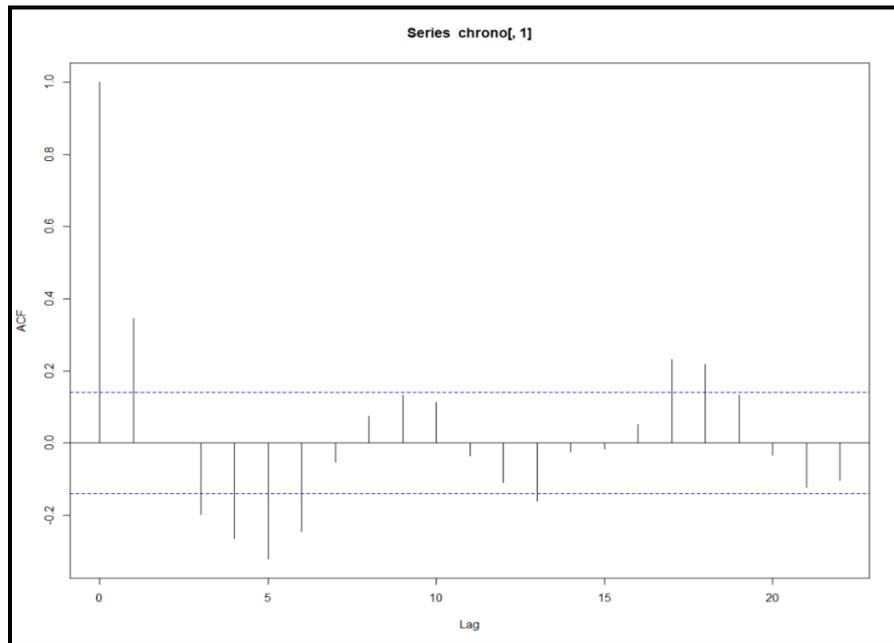


Fig. 26: funzione di auto-correlazione

È stata poi calcolata la funzione di stima dell'autocorrelazione parziale per la cronologia media stagionale (fig. 27). L'autocorrelazione parziale è indice di quanto la variabile spessore di accrescimento in un dato anno  $t$ , è dipendente dalla misura dell'accrescimento del singolo anno  $t-n$ . Da notare che sono presenti valori ( $lag=1,3,4,5,6,11,13,15$ ) che sono esterni alla banda tratteggiata; tali valori sono tutti negativi. I valori negativi riscontrati indicano che la variabilità periodica degli anelli di accrescimento non è spiegabile solamente con l'accumulo delle autocorrelazioni annuali, ma è anche spiegata da una variabilità dovuta a forzanti esterne.

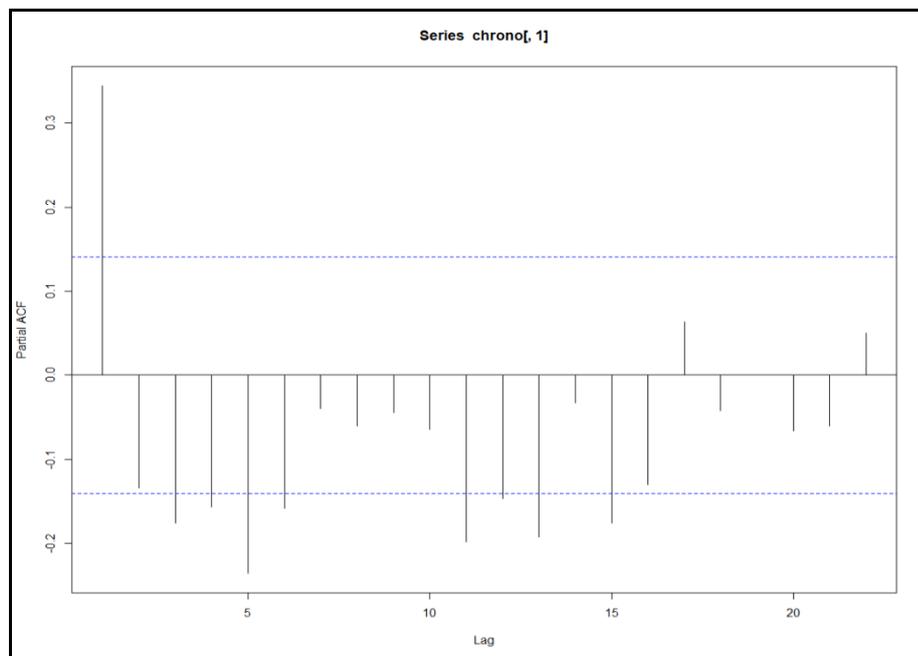


Fig. 27: funzione di auto-correlazione parziale

Un altro indice statistico calcolato riguardo alla serie “media finale up” è la sensitività media ( $ms$ ), ossia il grado di “reattività” nella risposta a variazioni climatiche da parte del campione esaminato. Il range di  $ms$  varia tra 0, ovvero quando ogni anello è uguale agli altri (sensitività nulla), e 2, ovvero quando sia presente un valore nullo in un anello adiacente (anello non formato) (Fritts, 1976). Valori tendenti a 2 implicano una sensitività troppo elevata mentre valori tra 0,1 e 0,5 sono considerati come indice di una sufficiente sensitività media del campione. Il valore riscontrato per la sensitività media di 0,224 conferma che il campione analizzato di *Larix d.* risponde attivamente ed in modo immediato alle variazioni ambientali di alta frequenza (oscillazioni intra e inter-annuali del clima, perturbazioni di varia origine nel breve periodo). Tale valore si attesta su valori medi se paragonato ad altri studi compiuti di recente su *Larix d.*: 0,27-0,38 per 17 cronologie sulle alpi orientali (Carrer e Urbinati, 2006), tra 0,19 e 0,29 nella catena dei Sudeti (Danek et al., 2018), tra 0,11 e 0,13 in uno studio in Trentino (Urbinati et al., 2004), tra 0,15 e 0,27 in 9 cronologie dell’arco alpino (Urbinati et al., 2004), tra 0,23 e 0,29 in 4 cronologie del massiccio Adamello-Presanella (Coppola et al., 2012), tra 0,21 e 0,33 in 9 cronologie dell’arco alpino riportate da Leonelli et al., 2016 e 0,17 in uno studio di 5 cronologie italo-slovene (Levanič et al., 2001). La sensitività media è un indice statistico che è stato ampiamente utilizzato in letteratura per valutare appunto la sensitività di una determinata specie rispetto a determinati fattori ambientali, ma recenti ricerche ne mettono in dubbio l’affidabilità in tal senso (Bunn et al., 2013).

### 3.4 Correlazioni climatiche della cronologia media stagionale

Tramite il metodo “corr” di R, viene generato un grafico rappresentante il risultato dei coefficienti di correlazione tra i mesi dell’anno di formazione dell’anello legnoso  $t$  e dell’anno precedente  $t-1$ , con le due principali variabili che solitamente vengono utilizzate in questo tipo di analisi dendrocronologica, cioè le temperature medie giornaliere del mese misurate in gradi Celsius e le precipitazioni cumulate del mese misurate in millimetri (fig.28). Sono stati analizzati i mesi a partire dall’aprile dell’anno precedente fino al settembre dell’anno di formazione dell’anello legnoso, correlando ognuno di essi con le due variabili climatiche analizzate. Il grafico restituisce un’indicazione di quali mesi siano correlati significativamente, ossia con un grado di confidenza superiore al 95%, con le medie delle precipitazioni e delle temperature considerate. Per quanto riguarda le precipitazioni è stata riscontrata una correlazione positiva con i mesi di giugno dell’anno  $t-1$  e febbraio dell’anno  $t$ ; in modo meno significativo si nota comunque una certa correlazione positiva anche con i mesi di novembre, dicembre e gennaio dell’inverno compreso tra le due stagioni vegetative considerate. Sono state ottenute invece correlazioni negative con i mesi di maggio, luglio, ed in minor misura giugno, dell’anno  $t$ . La correlazione positiva con il mese di giugno dell’anno  $t-1$  potrebbe indicare che *Larix d.* tragga beneficio dalla costituzione di discrete riserve idriche nel terreno, le quali garantiscono la disponibilità idrica al momento della formazione tardo-estiva (quindi dopo i mesi più caldi e siccitosi) delle gemme per l’anno successivo. L’effetto positivo delle precipitazioni del febbraio dell’anno  $t$ , nonché di quelle dei mesi invernali che lo precedono, sulla crescita del larice potrebbe invece esser spiegato dal fatto che le precipitazioni in quei mesi, quasi sicuramente a carattere nevoso nel sito oggetto di studio, possano aver favorito la ripresa vegetativa della primavera

proteggendo e isolando il terreno da gelate tardive e garantendo riserve idriche per il dispendioso periodo iniziale dell'attività vegetativa. La correlazione negativa dei mesi di maggio, giugno e luglio dell'anno  $t$  potrebbe esser dovuta invece ad una significativa diminuzione di radiazione solare ricevuta dal larice, nei mesi in cui la crescita vegetativa raggiunge il suo massimo, determinata da una maggior nuvolosità durante tali mesi. Tale condizione implica sicuramente una diminuzione dell'accrescimento di *Larix d.*, specie marcatamente eliofila e molto efficiente dal punto di vista fotosintetico. Per quanto riguarda le temperature medie mensili possiamo vedere l'influenza positiva dei mesi di aprile, ottobre, novembre e dicembre dell'anno  $t-1$  e dei mesi di febbraio e giugno dell'anno  $t$ . Presentano invece una correlazione negativa le temperature di marzo e settembre dell'anno  $t$ ; il dato di settembre non sembra correttamente interpretabile in quanto in quel mese l'accrescimento annuale dovrebbe esser già terminato. La correlazione positiva dell'aprile  $t-1$  potrebbe esser dovuta ad un possibile legame tra un inizio precoce della fase vegetativa e la quantità di gemme che si formano a fine stagione; un'abbondante presenza di gemme coadiuvata da temperature miti durante la primavera successiva porterebbe ad un aumento della superficie fotosintetizzante, la quale garantisce una crescita elevata nell'anno  $t$ . Le temperature dei mesi di ottobre, novembre e dicembre dell'anno  $t-1$  e di febbraio dell'anno  $t$  sono correlate positivamente; un'ipotesi potrebbe essere che temperature di tali mesi più elevate della norma favoriscano la crescita del larice alla stagione vegetativa successiva. La temperatura media di giugno è correlata positivamente con l'accrescimento: temperature più elevate favorirebbero direttamente l'attività cambiale in quanto potrebbe aumentare il ritmo delle reazioni fisiologiche e della fotosintesi, determinando un accrescimento elevato fin dalle prime fasi della stagione vegetativa. Il larice concentra infatti in questo mese gran parte dell'accrescimento legnoso, formando circa il 50% dello spessore anulare in giugno (Urbinati e Carrer 1997, Anfodillo et al. 1998, Carrer et al. 1998). La temperatura di giugno dell'anno  $t$ , è spesso riportata come determinante per la crescita di *Larix d.* (Carrer e Urbinati, 2006; Coppola et al., 2012).

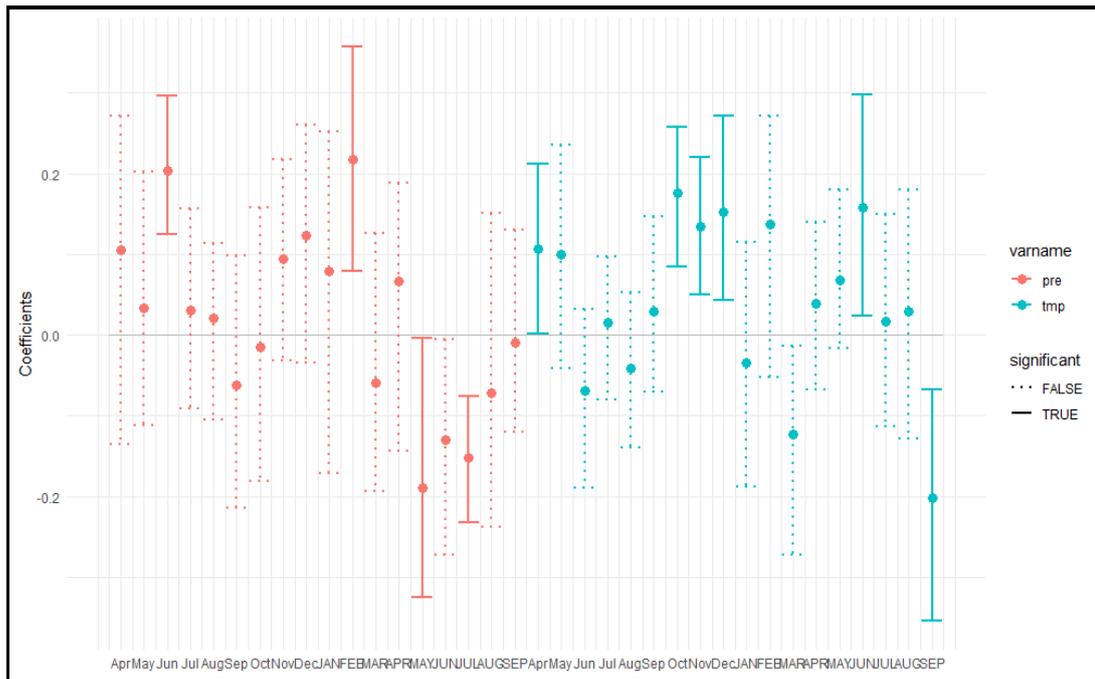


Fig.28: serie anulari inserite in "Media finale up" – correlazioni climatiche

Con il metodo "resp" di R, è stato generato un ulteriore grafico in cui viene mostrato il risultato dei coefficienti ottenuti per la funzione di risposta tra i mesi dell'anno di formazione dell'anello  $t$ , e di quelli dell'anno precedente  $t-1$ , con i due fattori utilizzati in precedenza per la funzione di correlazione, cioè le temperature medie giornaliere e le precipitazioni mensili (fig.29). In questo caso si è tenuto però in considerazione l'influenza dei fattori climatici anche dei mesi precedenti a quello considerato, opportunamente ponderata. Per quanto riguarda le relazioni con le precipitazioni sono sostanzialmente analoghe a quelle ottenute con il metodo precedente. Anche in questo caso rileviamo che nel mese di giugno e dicembre dell'anno  $t-1$  ed in quelli di gennaio e febbraio dell'anno  $t$  la risposta del larice alle precipitazioni medie è positiva. Il larice risponde sempre negativamente alle precipitazioni medie dei mesi di maggio, giugno e luglio dell'anno  $t$ . Per quanto riguarda le temperature si nota una diminuzione del livello di significatività dell'influenza di tale fattore in novembre e dicembre dell'anno  $t-1$ , che rimangono comunque degne di nota. Le risposte positive del larice alle medie mensili di ottobre dell'anno  $t-1$  e di giugno dell'anno  $t$  rimangono invariate rispetto al metodo precedente. Anche in questo caso non sono state rilevate significative risposte negative del larice alle temperature medie mensili.

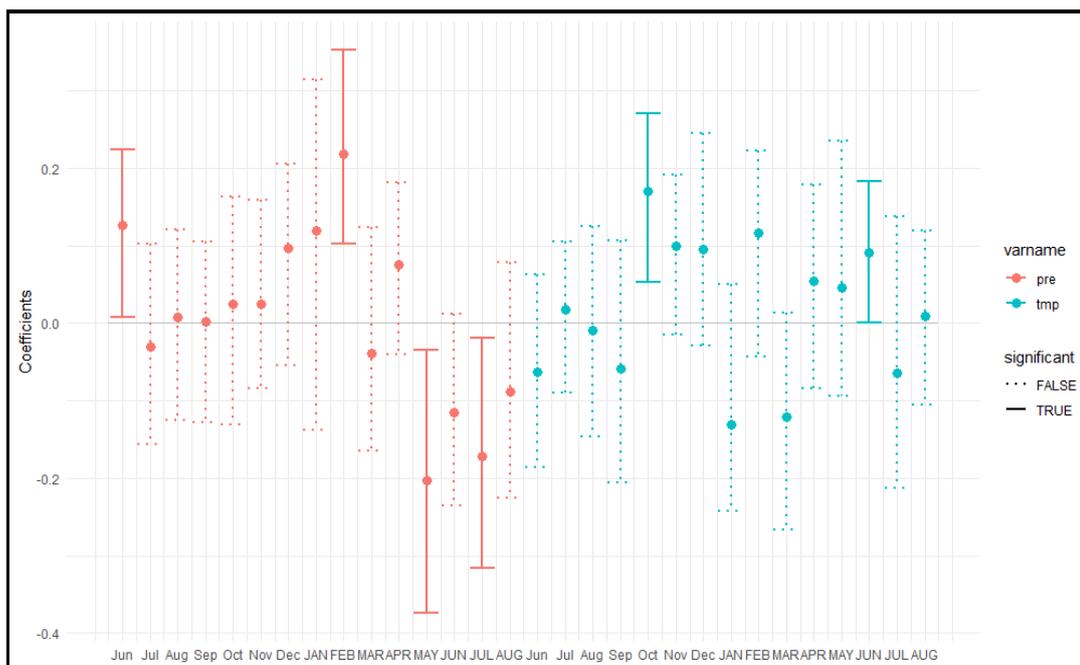


Fig. 29: serie anulari inserite in "Media finale up" – funzione di risposta

I valori dei coefficienti calcolati per le diverse correlazioni fattore climatico-accrescimento legnoso per ciascun mese considerato vengono riportati in tabella per una visualizzazione più immediata (tab.6).

Tab.6: correlazioni clima-accrescimento per *Larix d.*; l'intensità della colorazione delle celle è proporzionale alla significatività del dato.

metodo	mese	apr	may	jun	jul	aug	sep	ott	nov	dec	GEN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP
corr	PRE	0,11	0,03	0,21	0,03	0,02	-0,06	-0,02	0,09	0,12	0,08	0,23	-0,06	0,07	-0,18	-0,13	-0,16	-0,07	-0,01
	TMP	0,11	0,10	-0,07	0,02	-0,04	0,03	0,17	0,14	0,16	-0,03	0,14	-0,13	0,04	0,07	0,16	0,02	0,03	-0,20
resp	PRE	/	/	0,14	-0,03	0,01	0,00	0,03	0,03	0,10	0,12	0,22	-0,04	0,07	-0,20	-0,12	-0,17	-0,09	/
	TMP	/	/	-0,07	0,02	-0,01	-0,06	0,17	0,10	0,10	-0,13	0,12	-0,12	0,05	0,04	0,09	-0,07	0,01	/

Vengono poi calcolati e rappresentati i coefficienti di correlazione tra i fattori climatici considerati nelle analisi precedenti (precipitazioni mensili e temperature medie mensili) ed i mesi dell'anno precedente alla formazione dell'anello e dell'anno di formazione dello stesso (fig.30); questa volta la correlazione è stata calcolata tramite l'utilizzo di una finestra mobile con un intervallo di 25 anni. In questo modo si può valutare l'andamento nel tempo dei coefficienti delle singole correlazioni mese-fattore climatico per il periodo considerato. I valori ottenuti sono stati poi riportati in tabella per una visualizzazione sintetica (tab.7). Le temperature di ottobre dell'anno  $t-1$  hanno tendenzialmente una correlazione positiva con la crescita, correlazione che in diversi periodi risulta essere significativamente valida. Si nota negli ultimi due decenni una perdita di significatività di tale correlazione. Le temperature dei mesi di febbraio e giugno dell'anno  $t$  mostrano una correlazione positiva con l'accrescimento annuale, che è risultata significativa in periodi diversi (1950-1980 circa per febbraio e fino al 1950 circa per giugno) e che mostra, negli ultimi 3-6 decenni rispettivamente, una diminuzione nella significatività della relazione. L'indebolimento della relazione positiva tra l'accrescimento del larice e le

temperature di giugno (ampiamente riportata in letteratura) trova riscontro in un recente studio (Coppola et al., 2012). Nella prima metà del secolo scorso circa, le temperature di marzo dell'anno di formazione dell'anello mostrano una correlazione negativa con la crescita anulare; in questo caso la correlazione si affievolisce dal 1940 al 1970 circa per poi mostrare nuovamente una tendenza verso valori negativi. Le temperature di agosto dell'anno  $t$  presentano una correlazione negativa prima del 1930 circa, positiva dal 1940 al 1970 circa e che diventa non significativa negli ultimi decenni. Da notare, infine, che durante gli ultimi tre decenni le temperature del settembre dell'anno  $t-1$  tendono ad influenzare positivamente l'accrescimento del larice. Ciò potrebbe esser dovuto all'allungarsi della stagione vegetativa. Per quanto riguarda gli altri mesi indagati, le temperature non hanno mostrato significative correlazioni con l'accrescimento degli anelli legnosi di *Larix decidua*. Relativamente alle precipitazioni, i mesi di giugno dell'anno  $t-1$  e di febbraio dell'anno  $t$ , hanno generalmente una correlazione positiva con la crescita anulare. Le precipitazioni di febbraio dell'anno  $t$ , nella seconda metà del secolo scorso, registrano elevati coefficienti di correlazione, suggerendo l'importanza della presenza di copertura nevosa del suolo per la crescita del larice. Tale relazione può esser spiegata attraverso la duplice funzione del manto nevoso, ossia quella di strato isolante contro le gelate primaverili e quella di riserva idrica per la seguente ripresa vegetativa. Anche le precipitazioni di giugno dell'anno  $t-1$  sembrano, negli ultimi decenni, aver acquisito una maggior importanza per l'accrescimento. Le precipitazioni del mese di marzo dell'anno  $t$  sono tendenzialmente correlate negativamente con la crescita. Le precipitazioni di aprile dell'anno  $t$  mostrano invece una correlazione negativa nella prima metà del secolo scorso mentre nelle ultime decadi del secolo scorso la correlazione è diventata positiva. Un andamento opposto è invece stato rilevato per le precipitazioni di agosto dell'anno  $t$ , che da una correlazione positiva sono passate ad avere una correlazione negativa a partire dal 1940 circa, anche se meno significativa. Le precipitazioni dei mesi di maggio, giugno ed in modo minore luglio dell'anno  $t$  presentano invece una correlazione quasi sempre negativa con la crescita. Una elevata piovosità di questi mesi, determinanti per l'accrescimento di *Larix d.*, può esser collegata ad una minor quantità di radiazioni ricevute e quindi ad una fotosintesi potenziale ridotta. In tal modo si potrebbe anche spiegare la correlazione negativa rilevata a partire dal 1970 circa ad ora per settembre dell'anno  $t-1$ , soprattutto collegandola all'allungamento della stagione vegetativa in ambiente alpino recentemente descritto (Menzel e Fabian, 1999; Sparks e Menzel, 2002; Walther et al., 2002; Menzel et al., 2006).

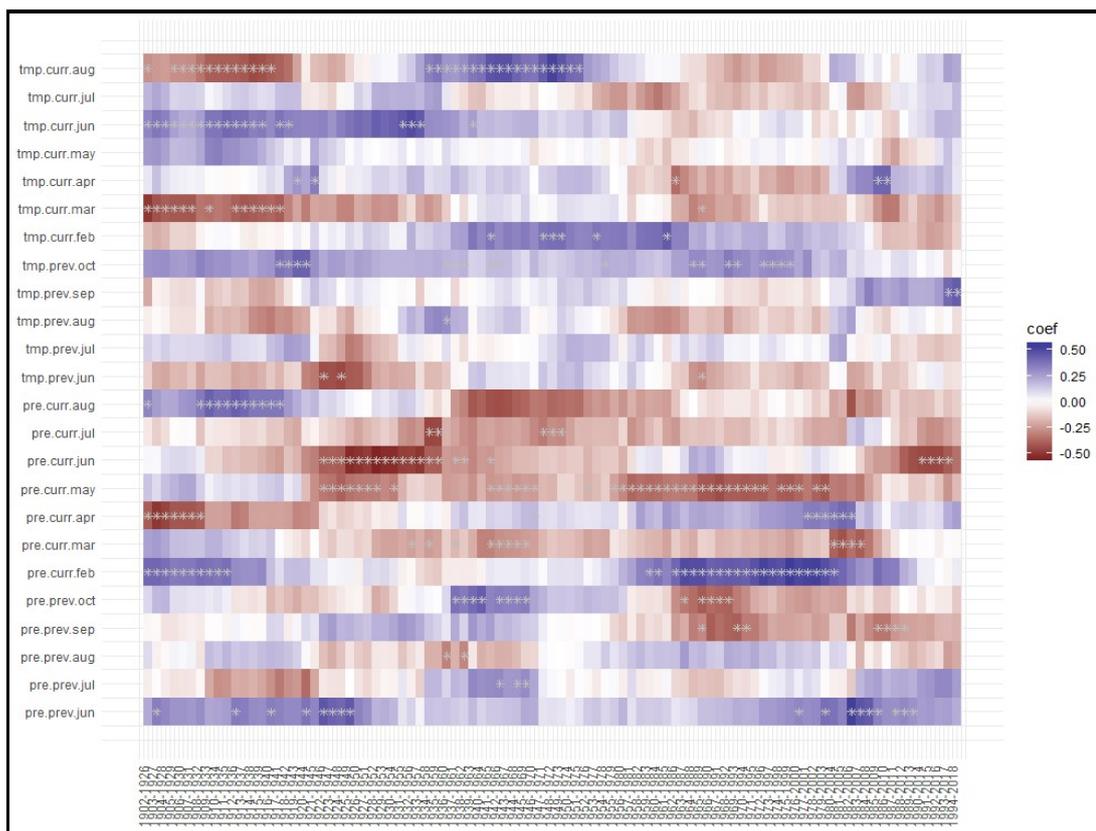


Fig.30: serie annali incluse in “media finale up”; correlazioni a finestra mobile di 25 anni

Tab.7: correlazioni a finestra mobile di 25 anni clima-accrescimento per Larix d. (ns=non significativo).

temperature											
jun	jul	aug	sep	ott	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG
ns	ns	ns	dopo 1990	fino 1990	1950-1970	fino 1930	ns	ns	fino 1945	ns	fino 1930
				ns		ns			ns		1945-1965
											ns
precipitazioni											
jun	jul	aug	sep	ott	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG
fino 1940	ns	ns	ns	ns	fino 1920	dopo 1930	fino 1920		1935-1955		fino 1930
1940-1990			dopo 1980	1950-1960	ns		ns		ns		1945-1965
dopo 1990				ns	1970-2000		dopo 1970		dopo 2000		ns
				1975-1990							
				ns							

Vengono successivamente calcolati i valori del *p-value* per il G-test (Tab.8). Le uniche variazioni nel tempo considerate significative (*p-value*<0,05) sono quelle delle precipitazioni e soprattutto delle temperature di agosto dell’anno corrente. La correlazione positiva delle precipitazioni di agosto fino al 1930 circa è diventata negativa fino al 1970 per divenire poi non significativa, mentre per le temperature si è calcolata una correlazione negativa fino al 1930 e positiva fino al 1970 circa, che poi diviene anch’essa non significativa negli ultimi decenni.

Tab.8: valori ottenuti tramite G-test

GERSHUNOV TEST			
PRECIPITAZIONI		TEMPERATURE	
Jun	0,888	Jun	0,706
Jul	0,436	Jul	0,866
Aug	0,668	Aug	0,600
Sep	0,338	Sep	0,810
Oct	0,276	Oct	0,970
FEB	0,260	FEB	0,388
MAR	0,628	MAR	0,590
APR	0,152	APR	0,574
MAY	0,336	MAY	0,898
JUN	0,232	JUN	0,404
JUL	0,930	JUL	0,630
AUG	0,070	AUG	0,040

### 3.5 Confronto con altre cronologie dell'arco alpino

A titolo di paragone, viene riportato un confronto effettuato tra la cronologia stagionale con quattro cronologie dell'arco alpino, tre italiane ed una austriaca (*fig.31*) ed i valori calcolati di correlazione e del t-test (*tab.9*). Il confronto con le altre cronologie medie di *Larix decidua* dell'arco alpino ha rivelato una discreta sovrapposibilità delle misurazioni anulari, presentando valori di intercorrelazione medi compresi tra 0,33 e 0,46, che raggiungono valori maggiori (tra 0,45 e 0,85) se consideriamo il periodo 1875-2000 delle tre cronologie ottenute sul territorio nazionale (ITA2024L-ITA5042L-ITA5043L). Questo scostamento dei valori delle misurazioni anulari precedentemente al 1850 circa, può esser dovuto alla scarsa numerosità (5-10 serie) delle serie anulari utilizzate per la costruzione della cronologia media stagionale in quel periodo; anche l'età delle piante campionate potrebbe avere un ruolo in questa differenza di risposta al clima. Tali valori di intercorrelazione confermano comunque la bontà della cronologia media stagionale ottenuta e l'elevata teleconnessione di *Larix d.* a scala regionale (Urbinati e Carrer, 2006).

Tab.9: confronto con altre cronologie dell'arco alpino

Serie	CorrC	t-test
ita2024l	0,39	5,7
ita5042l	0,37	3,1
ita5043l	0,46	6,2
aus2004l	0,33	4,2

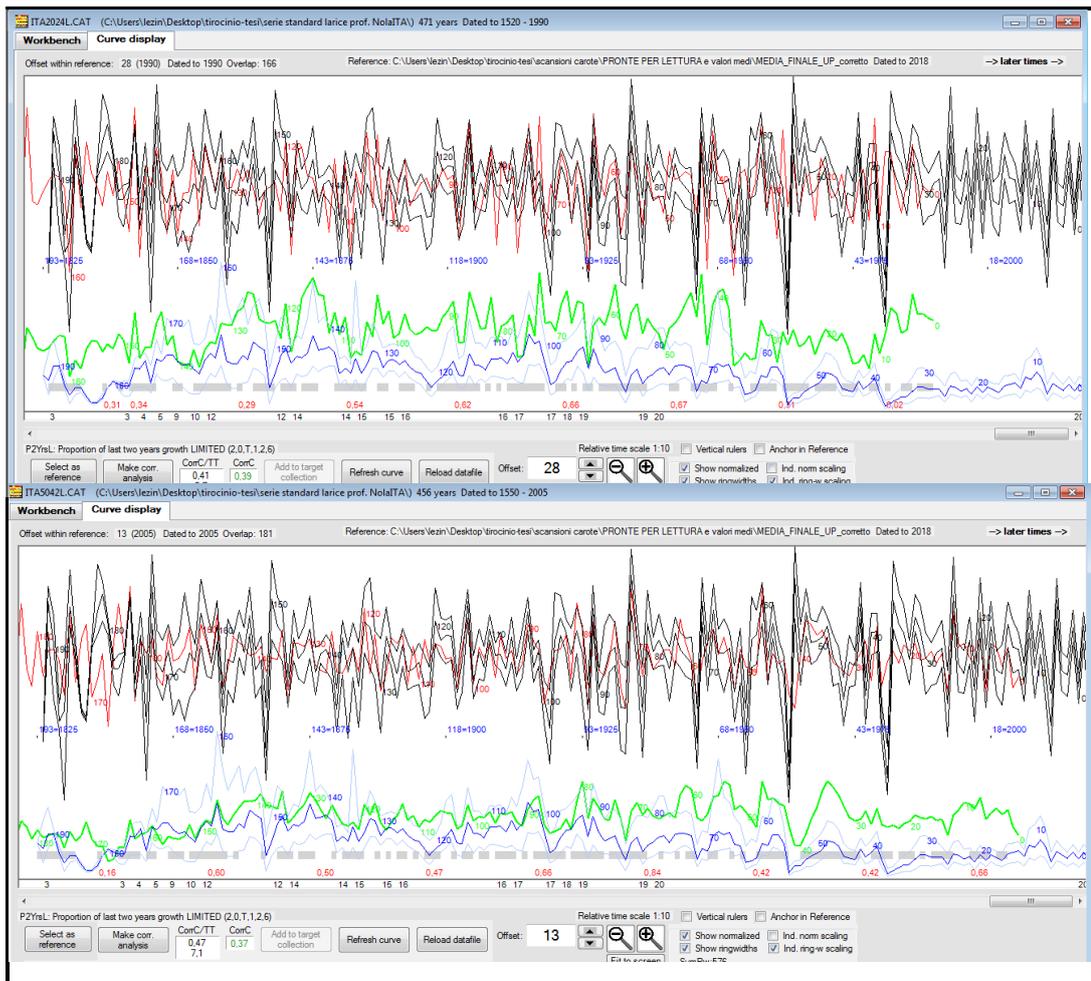


Fig.31: confronto con altre cronologie dell'arco alpino.

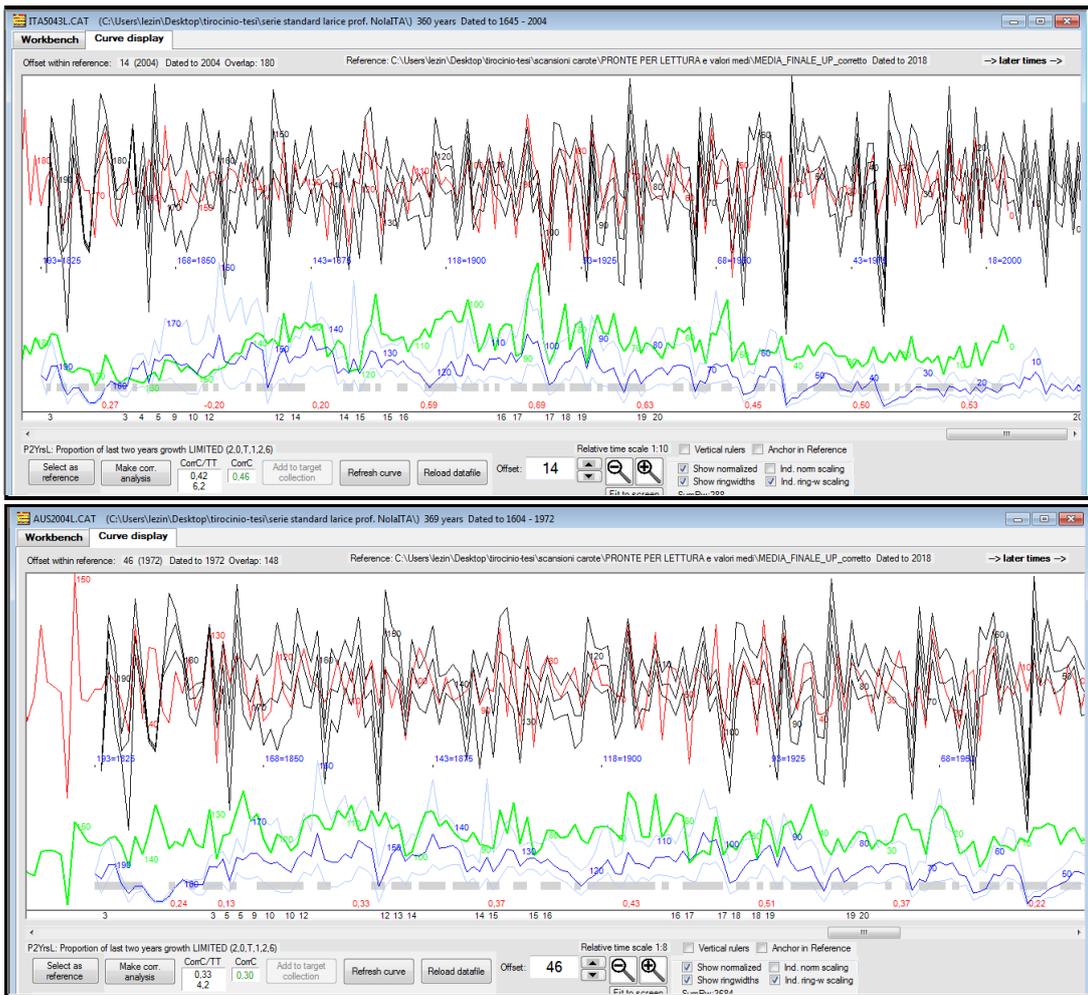


Fig. 31: confronto con altre cronologie dell'arco alpino (continua).

#### **4. CONCLUSIONI**

Dall'analisi effettuata sui campioni prelevati in località Bazena, sono stati ottenuti risultati positivi per quanto riguarda la costruzione di una cronologia stagionale di *Larix D.* in ambiente alpino. I valori dei principali parametri statistici individuati per la cronologia "media finale up" sono in linea con i valori di altre cronologie di confronto. La cronologia stagionale ottenuta dalla cross-datazione di 20 delle piante campionate copre un arco temporale di 194 anni, precisamente dal 1825 al 2018; l'intercorrelazione media calcolata tra le serie elaborate è di  $0,66 \pm 0,08$  ed indica che le singole cronologie sono discretamente rappresentate nella cronologia media stagionale. L'accrescimento medio anulare rilevato è compreso tra 0,72mm e 1,58mm, evidenziando buone condizioni generali di crescita nella stazione studiata; l'altitudine non estrema per il larice rispetto ad altri studi in ambiente alpino sembra permettere accrescimenti mediamente superiori. L'indice AR1 rilevato è di  $0,77 \pm 0,12$ , denotando un'intensa dipendenza dell'accrescimento di un anello con l'accrescimento dell'anno precedente. Il valore medio delle correlazioni tra le singole serie, cioè  $r_{bar}$ , è di 0,607 ed indica che i campioni correlano sufficientemente bene tra loro. Il valore ottenuto per l'EPS di 0,96 indica che il sotto-campione utilizzato per lo studio spiega al 96% la quantità di varianza presente nella cronologia di un popolamento teoricamente infinito. Relativamente all'SNR, il valore ottenuto di 24,3 descrive un segnale ambientale sufficientemente intenso rispetto al rumore. La sensibilità media rilevata di 0,224 si conferma come valore accettabile ad indicare una buona reattività di *Larix d.* agli stimoli climatici. Per quanto riguarda le correlazioni clima-accrescimento, entrambi i fattori climatici indagati ricoprono un importante ruolo. In particolare, il larice pare esser molto sensibile alle precipitazioni di giugno dell'anno  $t-1$  ed a quelle dei mesi invernali, soprattutto febbraio. Tale risultato potrebbe indicare l'elevato apporto idrico necessario al larice in momenti determinanti della stagione: il larice si avvantaggerebbe di un abbondante manto nevoso che isola il suolo nei mesi più rigidi e di precipitazioni che fungano da riserva idrica (necessaria sia alla ripresa primaverile dell'attività cambiale che alla produzione delle gemme durante la conclusione della stagione precedente). Sempre per quanto riguarda le relazioni con il regime udometrico, è stata rilevata un'interessante correlazione negativa tra l'accrescimento e le precipitazioni cumulate dei mesi estivi dell'anno di formazione dell'anello. I mesi di maggio, giugno, luglio ed in minor misura agosto, sono correlati tutti negativamente: in particolar modo risente dei primi due mesi, ove si concentra la maggior parte della crescita effettuata dal larice durante la stagione vegetativa. Una spiegazione plausibile di tale situazione potrebbe essere l'incidenza che ha la minor quantità di radiazione solare ricevuta dall'apparato fogliare, a causa di una situazione meteorologica mediamente più perturbata, sull'attività fotosintetica di questa conifera marcatamente eliofila. Estati siccitose non sembrano quindi limitare la crescita del larice nel sito oggetto di studio, probabilmente a patto che nei mesi precedenti si siano costituite sufficienti riserve idriche. Condizioni climatiche maggiormente oceaniche sono notoriamente svantaggiose per il larice. Relativamente alle temperature, i dati più evidenti sono stati ottenuti riguardo alle correlazioni positive con i mesi autunno-invernali precedenti l'inizio della stagione

vegetativa. Una possibile ipotesi è che un autunno ed un inverno meno rigidi possano permettere al larice un minor consumo delle riserve accumulate; anche minori danni da gelo alle strutture deputate alla successiva stagione vegetativa possono influire positivamente sulla crescita annuale. I mesi di gennaio e marzo dell'anno  $t$  sono invece, anche se meno significativamente, negativamente correlati con le temperature: tale dato risulta di difficile interpretazione, ma potrebbe esser verificato con ulteriori studi. Infine, viene confermata la correlazione positiva riscontrata con le temperature di giugno dell'anno  $t$ , già ampiamente documentata in letteratura. Per quanto riguarda le correlazioni a media mobile di 25 anni, i risultati più significativi sono stati ottenuti per quanto riguarda le precipitazioni dei mesi di inizio stagione vegetativa (correlazione negativa per maggio e giugno anno  $t$ ) e del mese di febbraio dell'anno  $t$  (correlazione positiva). Anche le temperature di ottobre dell'anno  $t-1$  e di febbraio dell'anno  $t$  presentano tendenzialmente una correlazione positiva con la crescita. Il confronto con altre cronologie medie di *Larix decidua* dell'arco alpino conferma la bontà della cronologia media stagionale e la sua replicabilità al di fuori del sito oggetto di studio. Quanto ottenuto in quest'analisi delle relazioni con il clima di *Larix d.* in Valle Camonica vuole esser d'appoggio alla conoscenza dei fattori che maggiormente influenzano la crescita di questa specie negli ultimi decenni. Se confermati, tali risultati possono fungere da elementi utili a considerazioni sulla conservazione, diffusione e comportamento di questa conifera rispetto al clima passato, presente e futuro. Inoltre, nonostante non fosse lo scopo perseguito da questo studio, durante le fasi di analisi dei dati è stata rilevata la marcata influenza di *Zeiraphera G.* sull'accrescimento di *Larix d.*; si è visto infatti che, perlomeno negli ultimi 50 anni, gli accrescimenti minori ottenuti dal larice potrebbero esser direttamente collegati ad intense defogliazioni da parte del lepidottero. Anche questo aspetto potrebbe essere in futuro meglio indagato, al fine di avere a disposizione dati più precisi e recenti che possano supportare la gestione e difesa di *Larix d.* nel territorio della Valle Camonica. Nel territorio del Parco dell'Adamello, le formazioni di lariceti puri o di lariceti in successione con pecceta occupano da sole più del 20% del territorio. I modelli climatici elaborati per l'area alpina evidenziano la concreta possibilità di un incremento delle temperature medie al 2100 di ben 3° C, oltre ad una sensibile diminuzione delle precipitazioni annuali con una sensibile riduzione di quelle estive ed un più moderato aumento di quelle invernali (Pignatti, 2011). Si riportano di seguito tre estratti (Ducoli, 2012) ritenuti rilevanti nell'ottica di questo studio (fig.32-33). Dal confronto tra le proiezioni climatiche delle aree considerate con i risultati ottenuti circa l'influenza dei regimi termo-udometrici annuali, risulta che il larice comune è una specie la quale potrebbe trarre vantaggio dalle future condizioni ambientali. Il suo areale potenziale potrebbe quindi essere gestito puntando sulla effettiva diffusione e gestione delle formazioni forestali di *Larix d.*

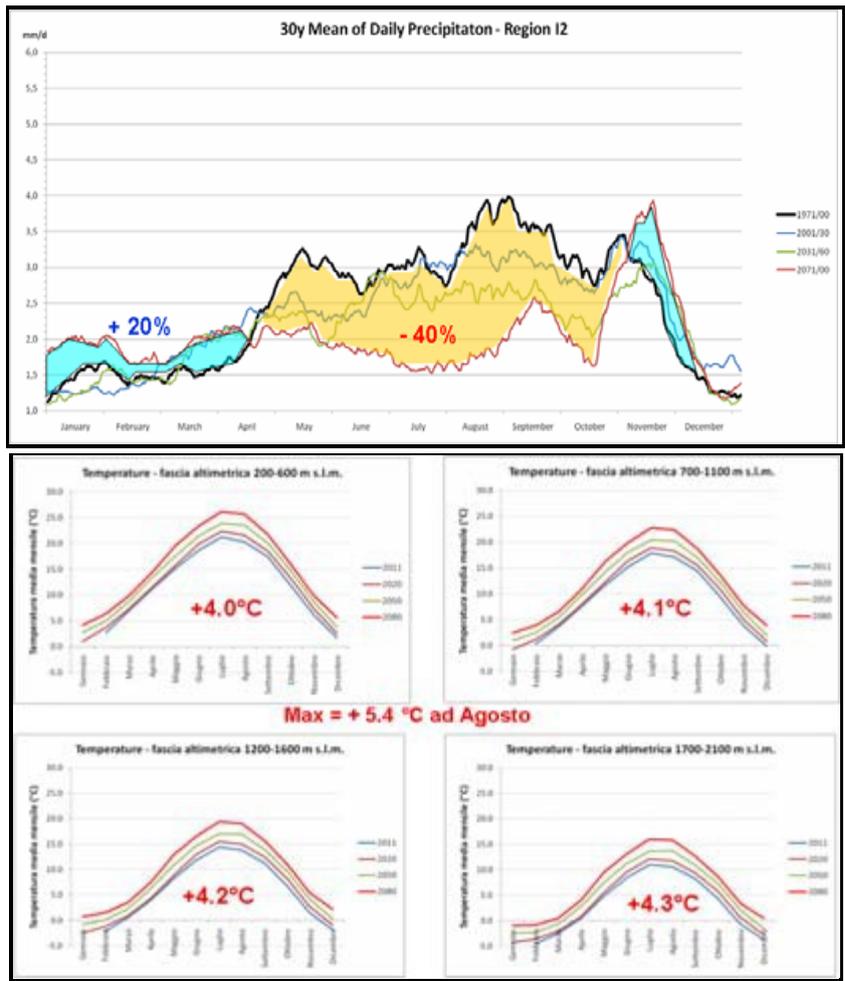


Fig.32: Gerosa et. al. Modelli di cambiamento climatico per la Valle Camonica, 2011

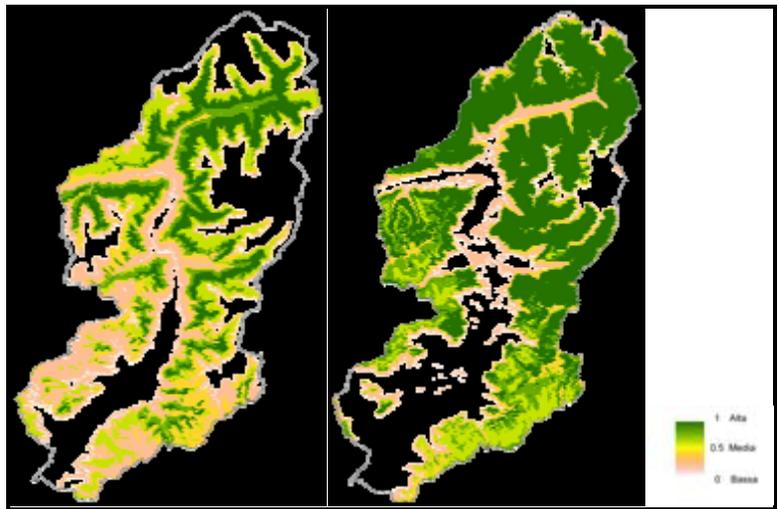


Fig.33: Gagliuzzi, Comini, Nastasio. Modelli di cambiamento dell'areale potenziale delle principali specie forestali della Valle Camonica secondo le proiezioni climatiche al 2080 (ERSAF, 2011)

## 5. APPENDICE

```
RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function
Addins
Source on Save
Run Source

1 # installazione librerie aggiuntive di R
2 # DA EFFETTUARE SOLO LA PRIMA VOLTA
3 install.packages("dplR")
4 install.packages("treeclim")
5 install.packages("sp")
6 install.packages("rgeos")
7 install.packages("R.utils")
8 install.packages("lubridate")
9 install.packages("crulibrary(treeclim)
10 lts")
11 install.packages("gam")
12 install.packages("pointRes")
13 #togliere diesis a quelli sopra per installarli
14 # carica librerie
15 library(sp)
16 library(rgeos)
17 library(R.utils)
18 library(treeclim)
19 library(dplR)
20 library(lubridate)
21 library(cruts)
22 library(gam)
23 library(pointRes)
24
25 # cambiare i seguenti parametri con nomi e percorsi corretti
26 directory <- "C:/users/lezin/Desktop/tirocinio-tesi/scansioni carote/PRONTE PER LETTURA e valori
27 filename <- "MEDIA_FINALE_UP_corretto.rwl"
28
29 # carica cronologia
30 setwd(directory)
31 series <- read.rwl(filename)
32
33 # dati cronologia
34 summary(series)
35 rwl.report(series)
36 plot(series, plot.type="spag", zfac=0.5, col="green")
37
38 # detrending e costruzione cronologia media
39 rwi <- detrend(detrend(series, method="ModNegExp"), method="spline", nyrs=20)
40 rwi.stats(rwi)
41 chrono <- chron(rwi, prewhiten=T)
42 plot(chrono, xlab="Year", ylab="rwi", add.spline=TRUE, nyrs=10)
43 acf(chrono[,1])
44 pacf(chrono[,1])
45
46 # dati e export cronologia media
47 sens1(chrono[,1])
48 #write.crn(chrono[,c(1,3)], sub(".",rwl", "_std.crn", filename))
49 #write.crn(chrono[,c(2,3)], sub(".",rwl", "_res.crn", filename))
50
51 # scarica file climatici
52 url.pre <- "https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrq/cru_ts_4.03/cruts.1905011326.v4.03/pre/cru_ts4
53 url.tmp <- "https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrq/cru_ts_4.03/cruts.1905011326.v4.03/tmp/cru_ts4
54 url.pet <- "https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrq/cru_ts_4.03/cruts.1905011326.v4.03/pet/cru_ts4
55
56 gz.tmp <- tempfile(pattern = "tmp", fileext = ".gz")
57 download.file(url.tmp, gz.tmp); gunzip(gz.tmp) #160 Mb
58 link.tmp <- list.files(dirname(gz.tmp), pattern = "tmp", full.names = T) [1]
59
60 gz.pre <- tempfile(pattern = "pre", fileext = ".gz")
61 download.file(url.pre, gz.pre); gunzip(gz.pre) #215 Mb
62 link.pre <- list.files(dirname(gz.pre), pattern = "pre", full.names = T) [1]
63
64
65 # imposta coordinate dell'area di studio
66 # inserire le coordinate giuste al posto di quelle inserite qui sotto
67 lat = 45.9210 # latitudine in gradi decimali
68 lon = 10.3927 # longitudine in gradi decimali
69 point = SpatialPoints(cbind(lon,lat), proj4string = CRS("+proj=longlat +ellps=WGS84"))
70 buffer = gBuffer(point, width = .05, id="1")
71 buffer <- spatialPolygonsDataFrame(buffer, data.frame(NA))
72 gz.pet <- tempfile(pattern = "pet", fileext = ".gz")
73 download.file(url.pet, gz.pet); gunzip(gz.pet) #66 Mb
74 link.pet <- list.files(dirname(gz.pet), pattern = "pet", full.names = T) [1]
75
76
77 # estrai clima per le coordinate individuate
78 range = c("1901-01-01", "2018-12-31")
79
80 br.pre <- cruts2raster(link.pre, buffer, timeRange = range, type="brick")
81 br.tmp <- cruts2raster(link.tmp, buffer, timeRange = range, type="brick")
82 br.pet <- cruts2raster(link.pet, buffer, timeRange = range, type="brick") # times <- attr(br.tmp)
83 tmp <- raster::extract(br.tmp, buffer, fun = mean, na.rm = T)
84 pre <- raster::extract(br.pre, buffer, fun = mean, na.rm = T)
85 pet <- raster::extract(br.pet, buffer, fun = mean, na.rm = T)
86
87
88 # correlazioni climatiche
89 corr <- dcc(chrono[,c(2,3)], clim[,c(1:4)], var_names = c("tmp", "pre"), selection = .range(exclu
90 resp <- dcc(chrono[,c(2,3)], clim[,c(1:4)], var_names = c("tmp", "pre"), selection = .range(exclu
100 plot(corr); plot(resp)
```

Fig.34: script di R utilizzato per analisi statistiche e correlazioni climatiche.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Anfodillo T., Carrer M., Rento S., Urbinati C., 1998. Growth dynamics of *Picea abies* Karst and *Larix decidua* Mill. and climatic factors: first results of a study at the timberline; in Italian Eastern Alps. Colloque international "Végétation et sols de montagnes: diversité, fonctionnement et evolution" Grenoble (F), luglio 1996, *Ecologie* 29(1-2), pp.253-259.
- Anfodillo T., Rento S., Carraro V., Furlanetto L., Urbinati C., Carrer M., 1998. Tree water relations and climatic variations at the alpine timberline: seasonal changes of sap flux and xylem water potential in *Larix decidua* Miller, *Picea abies* Karst and *Pinus cembra* Linnaeus. *Annals of Forest Sciences* 55, pp.159-172.
- Baltensweiler W. and Fischlin A., 1988. The Larch Budmoth in the Alps. In: *Dynamics of Forest Insect Populations*, Plenum Press, New York, pp.331-351.
- Begum S. et al., 2013. Regulation of cambial activity in relation to environmental conditions: understanding the role of temperature in wood formation of trees. *Physiologia Plantarum*, 147, pp.46-54.
- Belletti P., 1999. Variabilità genetica in popolazioni di larice (*Larix decidua* Mill.) dell'arco alpino occidentale. *Monti e Boschi* 2, pp.48-53.
- Bernetti G., 1995. *Selvicoltura speciale*, UTET, pp.275.
- Biondi F. and Qeadan F., 2008. Inequality in Paleorecords. *Ecology*, 89(4), pp.1056-1067.
- Biondi F. and Waikul K., 2004. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* (30), pp.303-311.
- Bräker O.U. and Zingg A., 2010. NOAA/WDS Paleoclimatology - Bräker - Rabins - LADE - ITRDB SWIT338. <https://doi.org/10.25921/dxtn-n490>
- Bunn A. G. et al., 2013. Using simulations and data to evaluate mean sensitivity as a useful statistic in dendrochronology. *Dendrochronologia*, 31 (3), pp.250-254.
- Bunn A. G., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26 (2), pp.115-124.
- Bunn A. G., 2010. Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia*, 28 (4), pp.251-258.
- Buras A. et al., 2012. Can shrubs help to reconstruct historical glacier retreats?. *Environmental research letters*, Institute of Botany and Landscape Ecology, University of Greifswald, pp.2-6.
- Buras A., 2017. A comment on the expressed population signal. *Dendrochronologia* 44, pp.130-132.

Calvo E., Piccardi B., Celona F., Guglini M., Gaiani G., Ravanelli G., Ciampitti M., Bazzoli M., Craveri L.; Ballardini P., Cavalli G., Grimaldelli R., Moizi P., Deligios G., 2017. Rapporto sullo stato delle foreste in Lombardia 2017. Copyright 2018, ERSAF, pp.18-108.

Carrer M. and Urbinati C., 2006. Long-term change in the sensitivity of tree-ring growth to climate forcing in *Larix decidua*. *New Phytologist*, 170, pp.861-872.

Carrer M., Anfodillo T., Urbinati C., Carraro V., 1998. High altitude forest trees sensitivity to global warming: results from long-term and short-term analyses in the Italian Eastern Alps forests. In: *The Impacts of Climate Change on Forests* (Beniston M, Innes JL eds). *Lecture Notes in Earth Sciences* Springer Verlag, pp.161-178.

chronologies at different altitudes from the Adamello-Presanella Massif (Italian Alps). *Quaternary Research*, 77, pp.344-354.

Clalüna A., 2012. Einfluss von klimatischen Schwankungen auf das Dickenwachstum von Arve und Lärche an zwei Höhenlagen in Sils im Oberengadin. Bachelor thesis, ETH Zürich, Zürich.

Cook E. R. and Kairiukstis L. A., 1990. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, pp.108-120.

Cook E. R. and Pederson N., 2011. Uncertainty, Emergence, and Statistics in Dendrochronology. In Hughes M. K., Swetnam T. W. and Diaz H. F., Springer editors, *Dendroclimatology: Progress and Prospects*, pp.77-112.

Cook E. R., 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization, Dissertation. The University of Arizona, Tucson, pp.23-36.

Coppola A., Leonelli G., Salvatore M.C., Pelfini M., Baroni C., 2012. Weakening climatic signal since mid-20th century in European larch tree-ring

Coppola A., Leonelli G., Salvatore M.C., Pelfini M., Baroni C., 2013. Tree-ring-based summer mean temperature variations in the Adamello-Presanella Group. *Clim Past* ,9, pp.211-221.

Da Ronch F., Caudullo G., Tinner W., de Rigo D., 2016. *Larix decidua* and other larches in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp. 108-110.

Danek M., Chuchro M., Walanus A., 2018. Tree-Ring Growth of Larch (*Larix decidua* Mill.) in the Polish Sudetes-The Influence of Altitude and Site-Related Factors on the Climate-Growth Relationship. *Forests*, 9 (663), pp.6-8.

De Martin D., 2019. Pensieri, opere, foto e cammini tra le Dolomiti del Cadore. <http://www.danil.com/blog/2009/11/21/il-larice-albero-del-sole/>.

- Del Favero R., 2004. I boschi delle regioni alpine italiane, pp.102-137, 483-504.
- Dorren L. K. A., Berger F., le Hir C., Mermin E., Tardif P., 2005. Forest Ecology and Management 215, pp.183.
- Ducoli A., 2012. Modelli di gestione forestale per il Parco dell'Adamello. Tipografia Brenese, pp.52-160.
- Fowler A., Boswijk G., 2003. Chronology stripping as a tool for enhancing the statistical quality of tree-ring chronologies. Tree-Ring Research, 59 (2), pp.53-62.
- Fritts H. C., 1976. Tree rings and climate. Academic Press, pp.18-280.
- Fritts H.C., and Swetnam T.W., 1989. Dendroecology: A tool for evaluating variations in past and present forest environments. Adv. Ecol. Res. 19, pp.111-187.
- Gershunov A., Schneider N., and Barnett T., 2001. Low-frequency modulation of the ENSO-Indian Monsoon rainfall relationship: Signal or noise?. Journal of Climate 14, pp.2486-2492.
- Giertz V., 2002. NOAA/WDS Paleoclimatology - Giertz - Obergurgl - LADE - ITRDB AUST004 <https://doi.org/10.25921/byb1-ps03>
- Holmes R. L., Adams R. K., Fritts H. C., 1986. Tree-Ring Chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin with Procedures Used in the Chronology Development Work Including Users Manuals for Computer Programs COFECHA and ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, Arizona, pp. 54-58.
- Hughes M.K., 2002. Dendrochronology in climatology - the state of the art. *Dendrochronologia* 20, pp.95-116.
- Kaennel M. and Schweingruber F. H., 1995. Multilingual Glossary of Dendrochronology. Paul Haupt Publishers, Berne, pp.467.
- La Marca O., 2004. Elementi di dendrometria, Pàtron editore, Bologna, pp.12-33.
- Lebourgeois F. et al., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees* 19, Springer Verlag, pp.385-401.
- Levanič T., Pignatelli O., Čufar K., 2001. A regional larch chronology of trees and historical buildings from Slovenia and Northern Italy. *Dendrochronologia* 19 (2), pp.221-229.
- Leonelli G. et al., 2016. Multispecies dendroclimatic reconstructions of summer temperature in the European Alps enhanced by trees highly sensitive to temperature. Springer Science+Business Media Dordrecht.

- Lyu S. et al., 2016. A 414-year tree-ring-based April-July minimum temperature reconstruction and its implications for the extreme climate events, northeast China. *Climate of the Past* 12, European Geosciences Union, pp.1879-1888.
- Meile C., 2008. Einfluss der Klimavariabilität auf das Wachstum von Lärchen und Fichten in Gebirgswäldern bei Bergün. Semesterarbeit. ETH Zürich, Zürich.
- Menzel A., Fabian P., 1999. Growing season extended in Europe. *Nature* 397, pp.659.
- Menzel A., Sparks T.H., Estrella N., Koch E., Aasa A., Ahas R., Alm-Kübler K., Bissolli P., Braslavská O., Briede A., Chmielewski F.M., Crepinsek Z., Curnel Y., Dahl A., Defila C., Donnelly A., Filella Y., Jatczak K., Mage F., Mestre A., Nordli Ø., Penuelas J., Pirinen P., Remisova V., Scheifinger H., Striz M., Susnik A., Van Vliet A.J.H., Wielgolaski F.E., Zach S., Züst A., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12 (10), pp.1969-1976.
- Morandini R., 1956. Il larice nella Venezia Tridentina, pp.270.
- Norris J. E., Di Iorio A., Stokes A., Nicoll B.C., Achim A., 2008. Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions. Springer Netherlands, pp. 167-210.
- Phipps R.L., 1985. Collecting, preparing, cross-dating and measuring tree increment cores. US Geological Survey Water Resource Investigations Report, pp.3-41.
- Piano di Governo del Territorio del Comune di Breno.
- Pignatti G., 2011. Forest vegetation in view of some scenarios of climate change in Italy. *Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology*, vol.8, pp.1-12.
- Praciak A. et al., 2013. The CABI encyclopedia of forest trees, CABI, Oxfordshire, UK Press, pp.172-178.
- R Core Team, 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.r-project.org/>.
- Rossi S., Deslauriers A., Anfodillo T., 2007. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 152, pp.1-12.
- Schweingruber F. H., 1996. Tree Rings and Environment – Dendroecology. Haupt Press Berne, pp.609.
- Shiyatov S. G., 1967. Fluctuations of Climate and Age Structure of Stand of the Larch Forest Tundra in the Mountains of the Polar Urals. Nauka publishing House, Leningrad, pp.377-398.
- Sorooshian S. and Martinson D. G., 1995. Proxy Indicators of Climate: An Essay; in *Natural Climate Variability On Decade-to-Century Time Scales*, National Academy Press, Washington, D.C. 1995, pp.490-495.

- Sparks T.H., Menzel A., 2002. Observed changes in the seasons: an overview. *International Journal of Climatology* 22, pp.1715-1725.
- Speer J. H., 2009. *Fundamentals of Tree-Ring Research*. University of Arizona
- Srivastava Lalit M., 1973. Cambial Activity in Trees. In *Arnoldia, the Arnold arboretum*, 33 (1), pp.46-66.
- Studhalter R. A., 1956. Early history of crossdating. *Tree-Ring Bulletin* 21 (1-4), pp.31-35.
- Tranquillini W., 1979. *Physiological Ecology of the Alpine Timberline*, pp.137.
- Trouillier M. et al., 2018. Visualizing Individual Tree Differences in Tree-Ring Studies. *Forests* (9) 216, pp.3-5.
- Urbinati C., Carrer M., 1997. Ricerche dendroecologiche sui dinamismi spazio-temporali in larici-cembreti di timberline nelle Dolomiti orientali. *Dendroecologia: una scienza per l'ambiente fra passato e presente*, Atti del XXXIV Corso di Cultura in Ecologia, San Vito di Cadore 1-5 settembre, pp.169-185.
- Urbinati C., Carrer M., Anfodillo T. & Rento S., 1996. Dendrocronologia al limite superiore del bosco: dinamismi di accrescimento e fattori climatici. *Dendronatura* 1, pp.41-50.
- Urbinati et al., 2004. Accrescimento radiale e sensibilità climatica di pino silvestre e larice in ambienti di limite in Val di Tovel (TN). *Studi Trent. Sci. Nat., Acta Biol.*, 81, Suppl. 2, pp.53-71.
- Venables W. N. and Ripley B. D., 2002. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition Springer-Verlag, R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Walther G.R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin O., Hoegh-Guldberg J.M., Bairlein F., 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, pp.389-395.
- Wermelinger B., Forster B., Nievergelt D., 2018. *Zyklen und Bedeutung des Lärchenwicklers*. Eidg. Forschungsanstalt WSL CH-8903 Birmensdorf, pp. 4.
- Wigley T. M. L. et al., 1984. On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23, pp.200-213.
- Zhang C., 2019. Package 'treeclim'. Online document. <https://cran.r-project.org/web/packages/treeclim/treeclim.pdf>

## **7. RINGRAZIAMENTI**

Si ringrazia il prof. Giorgio Vacchiano e la prof.ssa Paola Nola per la disponibilità mostrata.

Un ringraziamento particolare a Lorella, per il sostegno mai mancato durante questo percorso e per i sacrifici fatti in questi anni.