



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO  
FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI

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

RELAZIONI TRA CLIMA E  
ACCRESIMENTO SU  
LARIX DECIDUA  
IN VAL MALENCO

Relatore: Prof. Giorgio Vacchiano

Elaborato finale di: Pietro Peretto  
Matricola: 892196

Anno Accademico 2018-2019

# INDICE

<b>1. RIASSUNTO .....</b>	<b>2</b>
<b>2. INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
2.1 Cambiamenti climatici .....	3
2.2 La dendrocronologia .....	8
<b>3. OBIETTIVI.....</b>	<b>11</b>
<b>4. MATERIALI E METODI.....</b>	<b>11</b>
4.1 Inquadramento territoriale .....	12
4.2 Le aree di studio.....	13
4.3 Le piante campionate .....	14
4.4 Metodi di campionamento .....	15
4.5 Preparazione dei campioni.....	16
4.6 L'analisi dei campioni .....	17
<b>5. RISULTATI.....</b>	<b>22</b>
<b>6. DISCUSSIONE.....</b>	<b>39</b>
<b>7. CONCLUSIONI .....</b>	<b>44</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>46</b>

## 1. RIASSUNTO

I cambiamenti climatici hanno messo in atto diversi processi di adattamento all'interno delle comunità vegetali. In ambienti di alta montagna, in cui le piante vivono al limite, questi cambiamenti sono percepiti con maggiore sensibilità. L'obiettivo di questo studio è quello di utilizzare la dendrocronologia, quindi gli anelli di accrescimento, per ricercare la risposta dei larici (*Larix decidua*) ai cambiamenti climatici, quantificandone gli effetti. Lo studio ha come ulteriore obiettivo la datazione delle piante al fine di individuare alberi monumentali, quindi alberi di particolare interesse paesaggistico, naturalistico, storico e culturale da valorizzare e tutelare. Il lavoro di tirocinio è stato svolto all'interno del comune di Chiesa in Valmalenco (SO) e ha previsto lo studio di un totale di 23 larici divisi in due differenti aree. Nella prima fase è stato effettuato il campionamento delle piante apparentemente più vecchie e la misurazione della loro circonferenza. Successivamente si è passati alla preparazione dei campioni in laboratorio al fine di poterli scansionare per poi analizzarli attraverso appositi software di dendrocronologia e di data science. Questi programmi hanno permesso una più rapida e precisa analisi dei dati che ha quindi reso possibile uno studio molto dettagliato delle relazioni tra clima e accrescimento. Dalle due cronologie stazionali si è ricavata una sensibilità di 0,22 e 0,30, quindi le piante studiate hanno risposto in modo rapido agli stimoli esterni, registrando nell'anello il segnale climatico. All'interno delle due cronologie si sono trovate delle ciclicità di 8 anni, particolarmente evidenti nella prima metà del XIX secolo e nel periodo 1900-1980, dovute a *Zeiraphera diniana*. Queste ciclicità non hanno però avuto influenza per quanto riguarda le risposte climatiche, infatti i risultati delle analisi con o senza attacchi di *Zeiraphera* non mostrano variazioni significative. Le temperature di marzo ed ottobre (*coef. di correlazione* = 0,371) e le precipitazioni di febbraio (*coef. di correlazione* = 0,171), giugno e luglio sono risultate essere un fattore positivo per le piante, mentre le temperature estive giocano un ruolo negativo nella formazione di legno. Al termine dello studio si può in ultimo affermare che non sono state trovate piante particolarmente vetuste, nonostante due larici risultino essere molto interessanti per dimensioni (410 cm di circonferenza) ed età (302 anni).

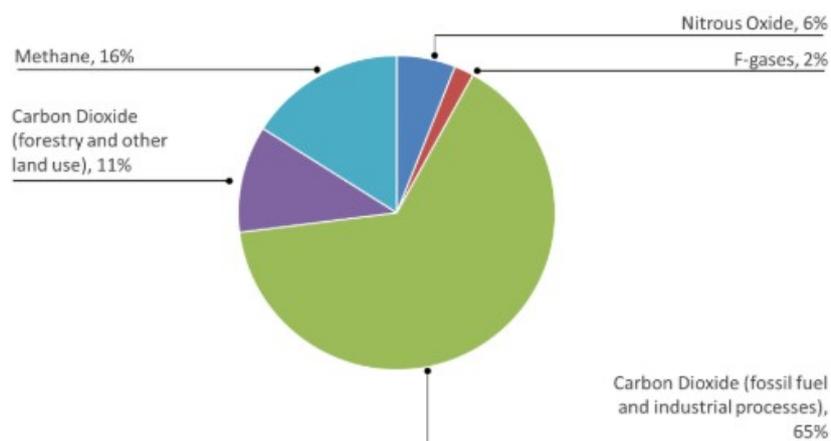
## **2. INTRODUZIONE**

### **2.1 Cambiamenti climatici**

Il clima è un fattore molto importante in grado di influenzare l'equilibrio degli ecosistemi e in modo più o meno diretto tutte le attività umane. Esso non è costante nel tempo, ma estremamente variabile e continuamente soggetto a fluttuazioni, tanto da poter essere considerato come una funzione del tempo (Corona, 1990; Le Roy Ladurie, 1967). Tra la fine del Diciannovesimo secolo e l'inizio del Ventesimo secolo, è andata crescendo la consapevolezza che l'umanità ha un'influenza sul clima in grado di determinare dei cambiamenti climatici. L'interesse su questi temi si fa risalire formalmente al 1992, anno in cui a Rio de Janeiro si svolse la prima Conferenza sul Clima (COP – Conference of the parties). Con questa nuova consapevolezza, la climatologia e le discipline ad essa affini hanno avuto un forte sviluppo.

Cosa regola il clima terrestre? Il clima è influenzato da fattori cosmici, geografici e antropici. I fattori cosmici, per semplificazione, determinano i flussi di radiazione tra Terra e sole: la Terra assorbe parte delle radiazioni solari e riflette un'altra parte di queste radiazioni allo spazio sotto forma di raggi infrarossi. La presenza o meno di vegetazione, l'influenza delle correnti marine, la presenza di importanti bacini di acqua (mari e oceani), la presenza di catene montuose, l'altitudine e la latitudine sono tutti fattori geografici in grado di modificare l'assorbimento delle radiazioni solari. Il clima però è anche influenzato dalla composizione chimica dell'atmosfera. I cambiamenti climatici sono determinati dalle variazioni di concentrazione dei gas ad effetto serra, causati principalmente da fattori antropici. I gas serra sono gas naturali, normalmente presenti in atmosfera, che svolgono un ruolo fondamentale per la vita sulla Terra. Infatti sono responsabili dell'effetto serra, che può essere descritto come la capacità dell'atmosfera che circonda il nostro pianeta di assorbire e trattenere entro un certo livello il calore dei raggi del sole. Senza gas serra la temperatura del nostro pianeta sarebbe eccessivamente bassa per consentire la proliferazione della vita. Questi gas permettono ai raggi solari di attraversare l'atmosfera: sono infatti trasparenti alla radiazione solare in entrata ma riescono nel contempo a trattenere buona parte della radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre, dall'atmosfera e dalle nuvole. Nell'atmosfera terrestre sono presenti diversi gas serra, di origine naturale ed antropica. I principali sono: il vapore acqueo, l'anidride carbonica, il metano e gli alocarburi. Il

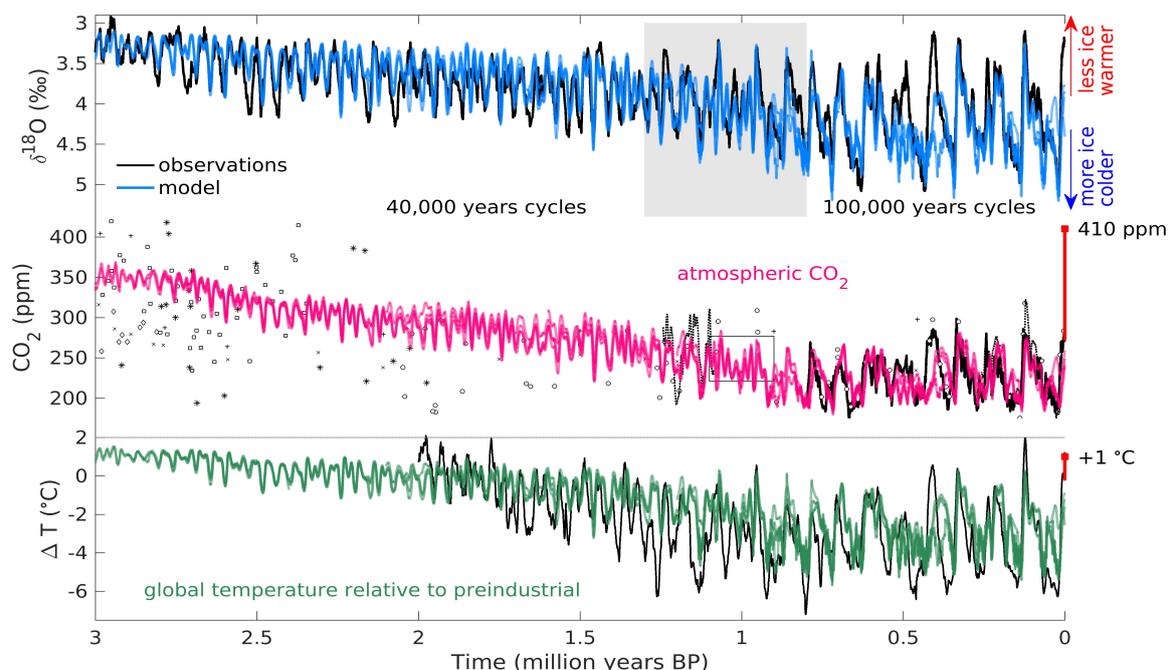
problema del riscaldamento globale ha per oggetto un aumento della temperatura media sulla Terra dovuto ad un'eccessiva concentrazione della CO<sub>2</sub> e degli altri gas presenti nell'atmosfera a causa di emissioni non più solo di origine naturale, ma anche antropica. I principali responsabili dell'incremento globale di anidride carbonica sono il consumo dei combustibili fossili e la deforestazione (IPCC, 2018).



**Figura 1:** emissioni globali di gas serra (IPCC, 2018)

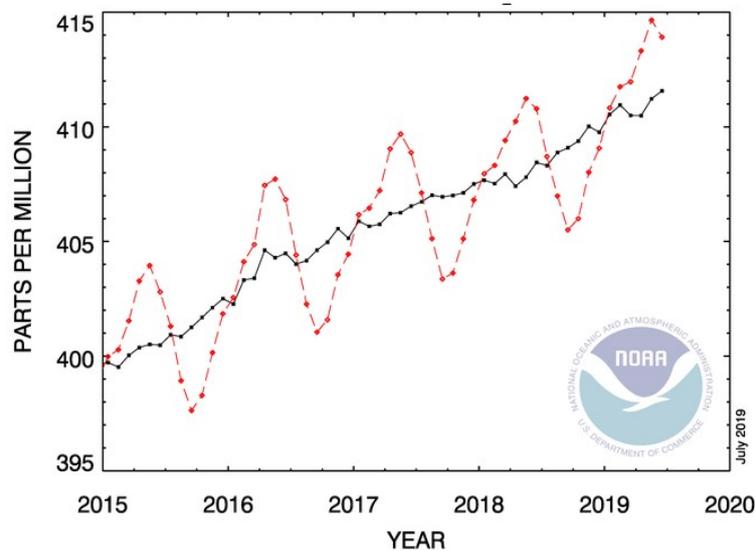
La temperatura media globale cresce in modo proporzionale con la concentrazione di anidride carbonica in atmosfera, come dimostrano i dati dell'osservatorio della National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) di Muana Loa, alle Hawaii. Il NOAA misura dal 1958 le concentrazioni di CO<sub>2</sub> ed il record assoluto come media mensile si è avuto a maggio 2019, con 414,66 parti per milione (ppm) di CO<sub>2</sub>, il dato medio di giugno 2019 è di 413,92 ppm. Questi valori di concentrazione non hanno precedenti negli ultimi 3 milioni di anni (Williet et al., 2019). Per capire meglio questi dati si può prendere in considerazione la concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera registrata prima della rivoluzione industriale, che era di 280 parti per milione.

La crescita è diventata esponenziale negli ultimi decenni, infatti negli ultimi 650mila anni la concentrazione di CO<sub>2</sub> è sempre stata compresa fra 180 e 300 ppm. Il metano, invece, è passato da un valore di 715 ppb (parti per miliardo) registrato nel 1750 a quello attuale che ha superato quota 1.880 ppb. Anche gli altri gas serra hanno subito un aumento più o meno rilevante.

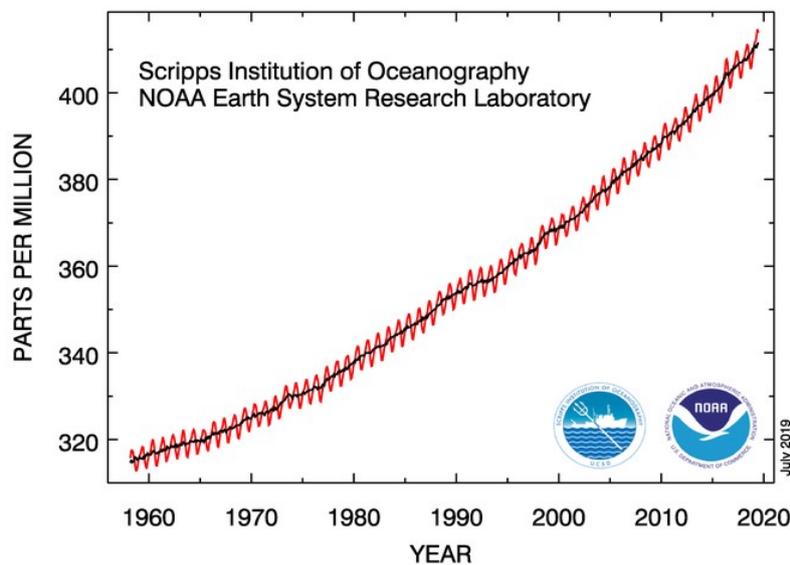


**Figura 2:** concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub>, percentuale di isotopi dell'O in atmosfera e temperatura media globale degli ultimi 3 milioni di anni (Williet et al., 2019)

Dal 1901, la superficie del pianeta si è riscaldata di 0,7–0,9 °C al secolo, ma il tasso di riscaldamento è quasi raddoppiato dal 1975 in poi, raggiungendo valori di 1,5–1,8 °C al secolo, secondo il rapporto internazionale sullo stato del clima del 2017 (State of the climate 2017) compilato dal NOAA. La media globale attuale oscilla in un intervallo inferiore al grado rispetto al massimo dell'Olocene (avvenuto circa 450.000 anni fa), rendendo possibili sviluppi rapidi ed imprevedibili di cambiamento del clima (Hansen et al., 2006). Sulla base degli scenari dei modelli climatici, si stima che entro il 2100 il cambiamento climatico subirà un'ulteriore accelerazione e la temperatura media globale salirà ancora da 1,5 fino a 5° C.



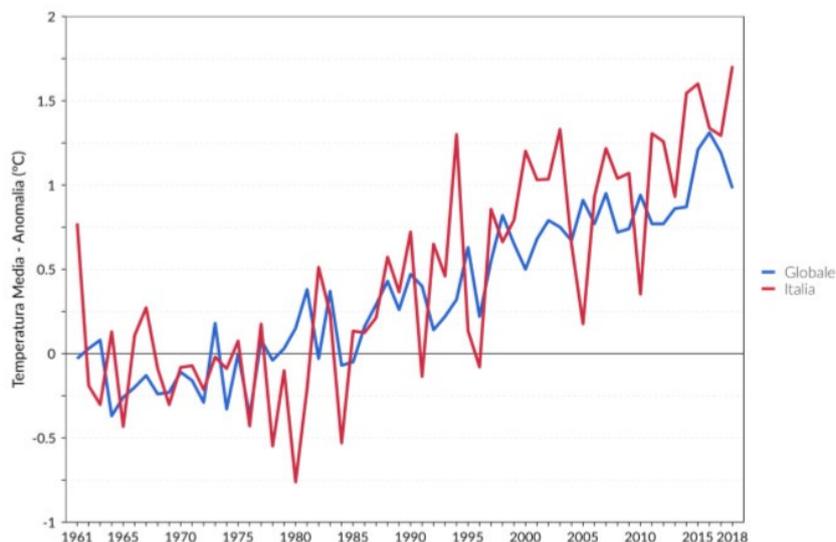
**Figura 3:** media mensile di CO<sub>2</sub> a Mauna Loa dal 2015 (NOAA, 2019)



**Figura 4:** concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> a Mauna Loa dal 1960 (NOAA, 2019)

Tra le regioni europee, il bacino del Mediterraneo è tra quelle più sensibili agli effetti del riscaldamento globale (Schröter et al., 2005). Si stima che nell'arco del prossimo secolo la temperatura sulla penisola italiana possa crescere mediamente fra i 2 e i 4 °C (ISPRA, 2015), con effetti importanti, come l'aumento di fenomeni di dissesto idrogeologico o l'aumento del rischio di incendio. Negli ultimi 120 anni le temperature a livello dell'arco alpino sono cresciute attorno ai 2 °C, quasi il doppio della media globale, ma sono destinate a crescere ancora. I ricercatori pronosticano un aumento di altri 2 °C per i prossimi 40 anni (CIPRA, 2018). Inoltre un aumento della temperatura media di 2-4 °C potrebbe portare ad uno spostamento delle fasce di vegetazione: fra due

fasce contigue, infatti, vi sono in media solo tre gradi di differenza, mentre a livello altitudinale, mezzo grado corrisponde a circa 100 m di quota (Bernetti 2007b).



**Figura 5:** serie delle anomalie di temperatura globale sulla terraferma e in Italia, rispetto ai valori climatologici normali 1961-1990 (NCDC/NOAA e ISPRA)

Le Alpi hanno reagito in modo differente rispetto al resto della penisola, infatti l'aumento di temperatura più significativo sulle Alpi è stato registrato a partire dagli anni '90, con dei picchi nel 1994, 2000, 2002, e in particolar modo nel 2003, dove sono state registrate le medie di temperatura più alte degli ultimi 500 anni. Per quanto riguarda le precipitazioni si è osservato una loro lieve diminuzione a partire dal 1970 circa (Bosello F. et al., 2007) ma con un aumento dell'intensità (Brunetti et al., 2006). Un ulteriore importante effetto dovuto dall'innalzamento della temperatura media delle Alpi è costituito dallo scioglimento dei ghiacciai. Secondo il parere di molti esperti in glaciologia, con la tendenza attuale (2019) delle temperature medie, entro la fine di questo secolo, molti ghiacciai presenti sulle Alpi, ma anche sulle regioni montane di diverse parti del mondo, non esisteranno più (Zemp M. et al., 2016). Secondo il professor Renato Colucci, glaciologo del Cnr, nel giro di 20-30 si assisterà alla scomparsa dei ghiacciai sotto i 3500 m sulle Alpi. Un cambiamento così rapido e drastico andrà a modificare il mesoclima delle valli interessate dalla presenza di ghiacciai.

Nei confronti dei cambiamenti climatici, i massicci montuosi con la loro concentrazione di riserve idriche ed il patrimonio di biodiversità che custodiscono hanno quindi un

ruolo particolare da svolgere nei confronti degli altri territori. La loro salvaguardia di conseguenza riveste un'importanza sovranazionale.

## **2.2 La dendrocronologia**

La dendrocronologia (dal greco: “*dendron*”, albero; “*kronos*”, tempo; “*logos*”, studio) è la scienza che studia l'accrescimento delle piante legnose attraverso l'analisi degli anelli grazie alla relazione tra tasso di crescita annuale (spessore degli anelli) e condizioni ecologiche. La misura dell'ampiezza degli anelli di crescita rappresenta così un codice che, se ben decifrato, può raccontare la storia dell'albero e della foresta in cui esso vive nonché delle variazioni climatiche che può avere registrato (Swetnam et al. 1999).

Esistono vari metodi per la ricostruzione del clima del passato, basati su informazioni derivanti da diverse discipline quali palinologia, glaciologia, archeologia e altre ancora. Queste discipline, nonostante forniscano informazioni molto utili, si limitano ad una ricostruzione delle tendenze generali su lunghi periodi, con uno scarso grado di dettaglio. La ricostruzione climatica fatta a partire dalla dendrocronologia offre invece numerosi vantaggi rispetto alle altre discipline. Infatti si è in grado di ricostruire dei parametri climatici, come per esempio la temperatura, in modo estremamente dettagliato con una definizione almeno annuale, se non addirittura stagionale o mensile (Nola, 1996). In ogni caso la ricostruzione dendroclimatica deve essere considerata come un approccio complementare, piuttosto che alternativo, ad altre discipline.

La dendrocronologia venne inventata dall'astronomo americano Andrew Ellicott Douglass, che nel 1906 la utilizzò gli anelli di accrescimento di una sequoia per studiare le relazioni con l'attività solare e il clima. Interessante però che il genio di Leonardo da Vinci nel 1500 era già stato in grado di comprendere l'esistenza di una relazione tra gli anelli di accrescimento e il clima. Infatti scriveva che:

*“... li circuli delli rami degli alberi segati mostrano in 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 dove essi erano volti...”*

Nelle regioni a clima temperato le piante con accrescimento secondario formano nuovi tessuti nella parte esterna, accrescendo il proprio diametro. L'accrescimento è legato alla stagione vegetativa, che va da primavera ad autunno, ma dipende da latitudine, altitudine, esposizione ed altri fattori. Nelle regioni temperate il ciclo di crescita degli alberi è distinto in tre fasi: una prima fase di attività di crescita molto intensa (primavera), una di attività meno intensa (estate e autunno) ed infine una fase di riposo assoluto (inverno). In primavera il legno che viene prodotto risulta visivamente più chiaro perché caratterizzato dalla presenza di vasi dal grosso diametro con pareti sottili per permettere un maggior passaggio della linfa come nutrimento della crescita. Più avanti con la stagione vegetativa viene formato il legno estivo (o tardivo), in cui prevale l'esigenza di sostegno. Infatti questo legno si presenta più scuro in quanto è caratterizzato da vasi con diametro inferiore e pareti più spesse.

L'alternarsi di questi due tipi di legno forma gli anelli, che sono generalmente distinguibili ad occhio nudo. L'ampiezza degli anelli tuttavia non è sempre costante ma è influenzata da diversi fattori, come il clima, che gioca un ruolo fondamentale. In genere si può affermare che anelli sottili indicano una difficoltà che ha limitato l'accrescimento, mentre anelli spessi evidenziano una situazione favorevole alla crescita dell'individuo. Lo spessore dell'anello è inoltre strettamente dipendente dall'età della pianta: a parità di condizioni ambientali le piante giovani sono in grado di formare anelli più spessi rispetto a piante adulte o senescenti. Inoltre va sottolineato che alberi della stessa specie cresciuti con le stesse condizioni climatiche mostreranno variazioni sincrone dell'ampiezza degli anelli di accrescimento e non anelli dello stesso spessore per gli stessi anni. Infatti piante differenti mostreranno lo stesso andamento di crescita nonostante abbiano accrescimenti diametrici differenti.

Non tutte le specie sono utilizzabili per studi dendrocronologici, in quanto non tutte le specie sono in grado di registrare nell'anello il segnale climatico con precisione. Infatti alcune specie sono in grado di reagire con grande precisione agli stimoli e quindi risultano utili per le analisi dendrocronologiche. Queste specie si dicono "sensitive", mentre quelle che non reagiscono alle variazioni climatiche vengono definite specie "compiacenti". Una delle piante più adatte agli studi dendrocronologici è il larice (*Larix decidua*), anche se talvolta può mostrare un anello mancante o un falso anello. A seguito di un forte stress si potrebbe formare un cerchio non completo di legno, determinando un anello mancante solamente su una parte della sezione trasversale. A volte invece si

formano due anelli in un anno a causa di un momentaneo arresto della crescita durante la stagione vegetativa, portando alla formazione di un falso anello.

La legge del minimo di Liebig è un principio ecologico che afferma che quando la velocità di un processo è determinata da una serie di fattori separati essa è condizionata da quello più limitante. Quindi si può affermare che all'aumentare dei fattori limitanti e della loro intensità, come nel caso dei Larici in alta quota, gli anelli diventeranno più piccoli ma mostreranno una maggiore correlazione con i cambiamenti climatici ed avranno una maggiore sensibilità. La risposta sarà tanto più sensibile quanto più le piante sono al limite. Il fattore limitante può cambiare nel tempo e nello spazio. Ovviamente va supposto che la pianta abbia presentato nel passato la stessa risposta che noi vediamo oggi. Secondo il principio di Hutton le condizioni limite agiscono sullo stesso tipo di processo in modo analogo nel tempo, mentre possono cambiare frequenza, intensità e luogo dei fenomeni (Corona, 1990).

Sequenze anulari di un sufficiente numero di anni vengono misurate e tradotte in rappresentazioni grafiche, dette curve dendrocronologiche, mediante diagrammi in cui sull'asse delle ascisse sono rappresentati gli anni e su quello delle ordinate lo spessore dell'anello corrispondente (Pezzo e Dorigatti, 1999). Utilizzando programmi statistici, si possono quindi confrontare diagrammi appartenenti ad alberi diversi della stessa specie, cresciuti nella stessa area climatica e che siano vissuti contemporaneamente per un sufficiente numero di anni. Tale processo è detto interdatazione (o cross-dating) e permette di creare delle cronologie dette "cronologie standard", che sono curve di riferimento per una determinata specie ed una determinata area geografica. Come spiegato in precedenza, è possibile che si verificano dei comportamenti anomali nell'accrescimento anulare delle piante, come la formazione di anelli mancanti, incompleti o falsi. È quindi importante avere una serie dendrocronologica affidabile. L'affidabilità di una serie dendrocronologica si fonda essenzialmente sul fatto che essa rappresenti in modo significativo una stima dell'accrescimento radiale annuale medio di una specie in un determinato ambiente. È questo il motivo per cui le serie che vengono utilizzate nelle ricostruzioni climatiche devono essere costituite da un numero sufficientemente elevato di campioni, che siano stati sottoposti sistematicamente alla procedura di interdatazione (Stokes e Smiley, 1968; Fritis, 1976).

Il cross-dating consiste nell'assegnare l'anno esatto di formazione ad ogni anello. La precisione di questa operazione è fondamentale, se si pensa che la ricostruzione climatica si basa sul confronto tra la quantità di legno formata in un determinato anno e i parametri climatici dello stesso anno. Un errore di interdatazione porta quindi al confronto tra dati climatici di un anno con l'ampiezza dell'anno successivo o precedente.

### **3. OBIETTIVI**

Dopo la scoperta del larice millenario della Val Ventina, è nato l'interesse di datare altri alberi apparentemente vetusti nel territorio della Val Malenco al fine di individuare alberi monumentali. Per albero monumentale si intende un soggetto vegetale di particolare valore paesaggistico, naturalistico, monumentale, storico e culturale. Infatti nelle foreste della Val Malenco risultano essere numerose le piante di grandi dimensioni e che quindi potrebbero essere potenzialmente monumentali.

Inoltre, date le potenzialità della dendrocronologia, si è proceduto ad analizzare gli accrescimenti degli alberi campionati al fine di verificare e quantificare gli effetti del cambiamento climatico sul larice alle alte quote. Infatti gli alberi cresciuti a quote elevate e quindi in condizioni limitanti, reagiscono significativamente anche a variazioni minime del clima. Lo studio dendrocronologico di queste piante fornisce in questo modo dati molto precisi su come il clima stia cambiando e quale sia la loro risposta.

### **4. MATERIALI E METODI**

Il presente elaborato è stato svolto in conclusione dell'attività di tirocinio. La prima parte di tirocinio è stata svolta sul campo in Valmalenco, in provincia di Sondrio. In particolare, i lavori di rilevamento sono stati effettuati in Val Sissone.



**Figura 6:** cartina geografica con segnaposto sulla Val Malenco (Suunto, 2019)

#### **4.1 Inquadramento territoriale**

La Val Sissone è una delle tre valli che convogliano le acque nella conca di Chiareggio per dare origine al Màllero, il corso d'acqua che si identifica con la Valmalenco.

La Val Sissone è chiusa verso Ovest e Sud-Ovest da cime oltre i 3000 metri, tra cui il Monte Disgrazia (3678 m). Sono presenti alcuni ghiacciai e alcune formazioni nevose perenni sulle pendici più alte della valle. Il ghiacciaio più esteso è quello del Disgrazia, che si estende nella Val Sissone ed occupa l'ampio pendio compreso tra il Pizzo Ventina (3258 m), il Monte Disgrazia, il Monte Pioda (3434 m) e la quota 3107 delle Cime di Chiareggio. L'ampia fronte si allarga sul pendio per circa due chilometri di larghezza rimanendo sospesa al di sopra del fondovalle e raggiunge attualmente la quota minima di 2600 m. Il ghiacciaio possedeva fino agli anni quaranta dello scorso secolo una notevole lingua che occupava la Valle Sissone e riceveva apporti glaciali dai vicini ghiacciai.



**Figura 7:** la Val Sissone vista da Pian del Lupo, nel comune di Chiesa in Val Malenco (ph. P. Peretto)

È difficile stabilire con una certa precisione la quota minima raggiunta nella Piccola Età Glaciale in quanto il fondovalle è stato di frequente sconvolto da notevoli alluvioni; alcuni lembi di morene fanno presumere che si spingesse fino ad una quota di 1900 m circa. La presenza dei ghiacciai a quote relativamente basse fino a tempi recenti ha sicuramente giocato un ruolo limitante nei confronti della vegetazione, modificando il clima della Valle.

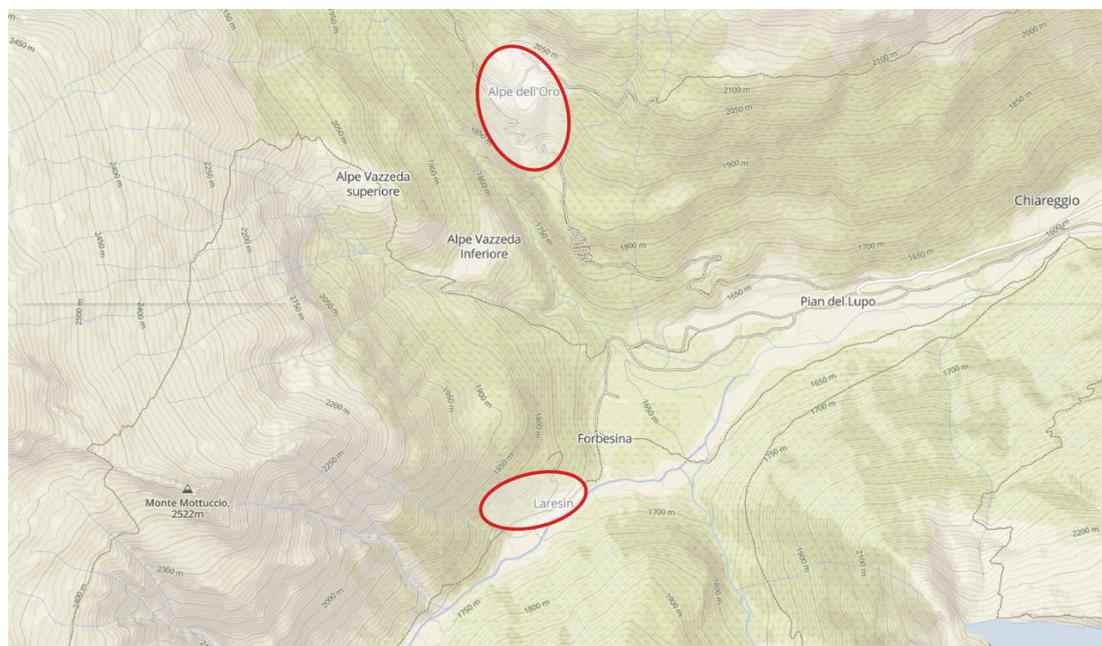
#### **4.2 Le aree di studio**

Per la raccolta dei campioni sono state scelte due aree: l'Alpe Laresin (1710 m) e l'Alpe dell'Oro (2010 m). Le piante campionate nella zona dell'Alpe Laresin si trovavano dai 1700 ai 1900 m, mentre le piante dell'Alpe dell'Oro erano tra i 1950 e i 2000 m circa. La scelta è ricaduta su queste due aree in quanto contenevano un numero elevato di Larici di grosse dimensioni, quindi potenzialmente vetusti e di conseguenza adatti alla ricostruzione dendroclimatica. Inoltre queste due aree sono entrambe esposte a Sud e si trovano a quote abbastanza simili permettendo un confronto più opportuno.

Le coordinate delle due aree di studio sono:

ALPE LARESIN 46°18' N 9°45' E

ALPE DELL'ORO 46°19' N 9°45' E



**Figura 8:** cartina geografica con le due aree di studio in evidenza (Suunto, 2019)

### 4.3 Le piante campionate

All'interno delle due aree sono quindi state selezionate una ventina di piante, scelte in base a vari aspetti. In primo luogo è stato scelto il larice (*Larix decidua*) come unica specie, infatti è una delle piante con sensibilità maggiori e che risulta molto diffusa nella zona. Un altro criterio adottato per la scelta delle piante è stata la dimensione dell'individuo: empiricamente più una pianta ha diametro maggiore e più è vecchia. Dato che l'obiettivo era quello di avere serie dendrocronologiche molto ampie, servivano piante sufficientemente vecchie. Oltre alle dimensioni però i larici scelti dovevano essere in buono stato di salute per garantire dei campioni idonei allo studio.

Il territorio su cui ho lavorato presentava delle zone molto impervie, che sono quindi state evitate sia per evitare rischi che per cercare la massima uniformità delle piante campionate: piante cresciute su suoli poco sviluppati o terreni particolarmente difficili mostrano crescite più limitate rispetto a piante cresciute in condizioni più favorevoli.

I larici scelti sono stati quindi identificati con un codice formato da 4 lettere, indicanti l'area di appartenenza, e da 3 numeri identificativi della pianta. Per l'Alpe Laresin il codice utilizzato è stato LARE000 mentre per l'Alpe dell'Oro il codice è stato FORA000.



**Figura 9:** larice di grosse dimensioni in località Alpe Laresin  
(ph. P. Peretto)

#### **4.4 Metodi di campionamento**

Il campionamento è stato effettuato tramite la trivella o succhiello di Pressler, uno strumento a forma di T con asta perforante cava a forma di tubo che serve a estrarre dal tronco di alberi una “carota”, che è un sottile cilindro radiale di legno.

Per ogni pianta sono state prelevate due carote, una a monte e una sul lato. L’altezza di campionamento è sempre stata di circa 130 cm, cioè a petto d’uomo.

Per distinguere le due carote della stessa pianta, al codice della pianta veniva aggiunta una “x” o una “y” (es. LARE001x).

Le carote venivano quindi misurate e poste all’interno di cannuce di plastica, che hanno funto da supporto provvisorio prima della sistemazione sui supporti fissi. In questo modo sono state evitate eventuali rotture o altri tipi di danni che si sarebbero potuti avere durante il trasporto. Inoltre, durante questa fase, sono state annotate informazioni sulla pianta, come le coordinate, la circonferenza del fusto a petto d’uomo e il numero di campioni prelevati.



**Figura 10:** un'immagine presa durante la fase di campionamento (ph. G. Galli)

#### **4.5 Preparazione dei campioni**

Le carote prelevate sul campo sono quindi state portate in laboratorio, dove ciascuna è stata incollata su di un listello di legno differente. Le fibre del legno della carota sono state poste in modo perpendicolare rispetto al piano orizzontale del sostegno. Si è trattato del passaggio più critico della fase di montaggio, in quanto eventuali errori avrebbero compromesso l'utilizzo del campione. Nel caso di carote con delle fratture si è cercato di ricomporle incollando le due parti in modo che fossero adiacenti. Dove non è stato possibile ricomporle con precisione si è lasciato uno spazio tra le due parti a segnalare la possibile assenza di una parte del campione.

Una volta incollate le carote, queste sono state fissate momentaneamente con lo scotch in attesa che la colla asciugasse. Lo scotch ha consentito di premere il campione nella scanalatura del listello di legno, evitando che si sollevasse. Una volta asciugata la colla e rimosso lo scotch è stato necessario controllare la giusta preparazione dei campioni prima di procedere alla fase successiva di levigatura.

Per la levigatura sono state utilizzate delle lamette particolarmente robuste e taglienti. I campioni venivano bagnati con dell'acqua in modo tale che il legno si ammorbidisse evitando possibili rotture del campione e eliminando parte delle sollecitazioni che avrebbero potuto far cedere la colla. L'obiettivo di questa fase è stato di creare una

superficie piana che rendesse visibile la sezione trasversale. Per questo il taglio doveva essere netto e preciso, infatti un campione preparato in modo errato avrebbe reso più difficili i passaggi successivi. Con acqua e gesso si è quindi colorata la sezione per tutta la sua lunghezza, evidenziando il passaggio da un anello all'altro.



**Figura 11:** campioni pronti alla scansione (ph. P. Peretto)

Giunti a questo punto, i campioni erano pronti per essere scansionati mediante un potente scanner in grado di acquisire immagini ad alta risoluzione (2400 pixel). Molti campioni superavano le dimensioni dello scanner, pertanto si è dovuto scansionare metà campione alla volta, per poi unirle con GIMP, un software per l'elaborazione digitale delle immagini.

#### **4.6 L'analisi dei campioni**

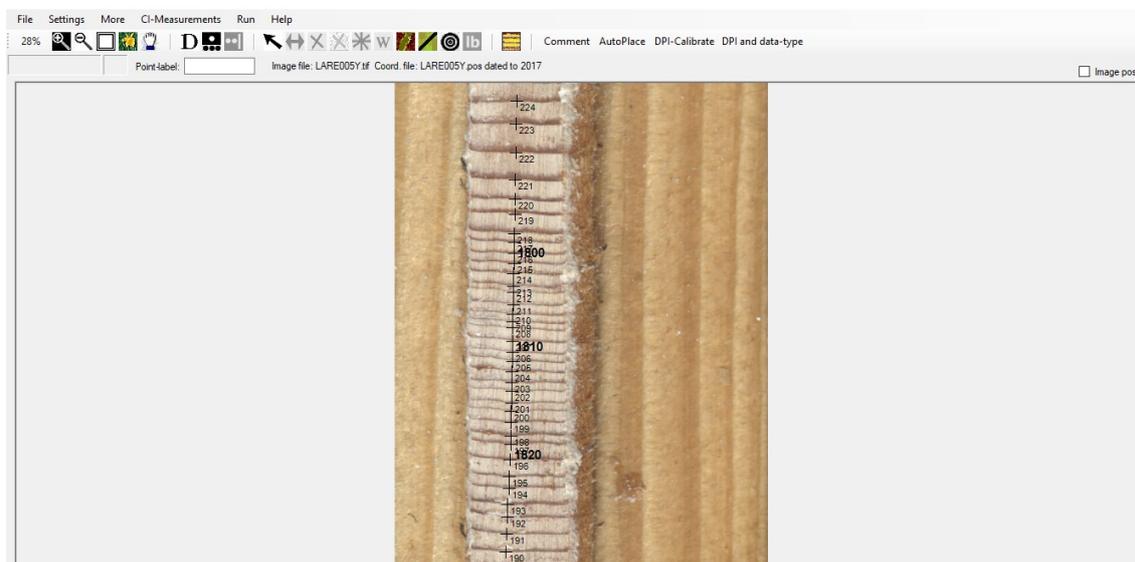
Tramite Coorecorder, da ciascuna scansione dei campioni è stata sviluppata una serie dendrocronologica singola o cronologia elementare rappresentativa del singolo campione. Coorecorder è un software sviluppato appositamente per la dendrocronologia, che permette di contare il numero e misurare l'ampiezza degli anelli. Con un Click sull'anello si pone un punto, che viene letto come una coordinata (x,y). Il programma ha numerose funzioni che semplificano e velocizzano il lavoro di analisi.

Durante il riconoscimento e il conteggio degli anelli è abbastanza facile compiere errori, sia di svista che dovuti alla presenza di falsi anelli o di anelli mancanti. Avere due campioni appartenenti alla stessa pianta permette di avere un confronto più immediato e quindi di trovare le incongruenze tra le due cronologie elementari. Per il confronto è

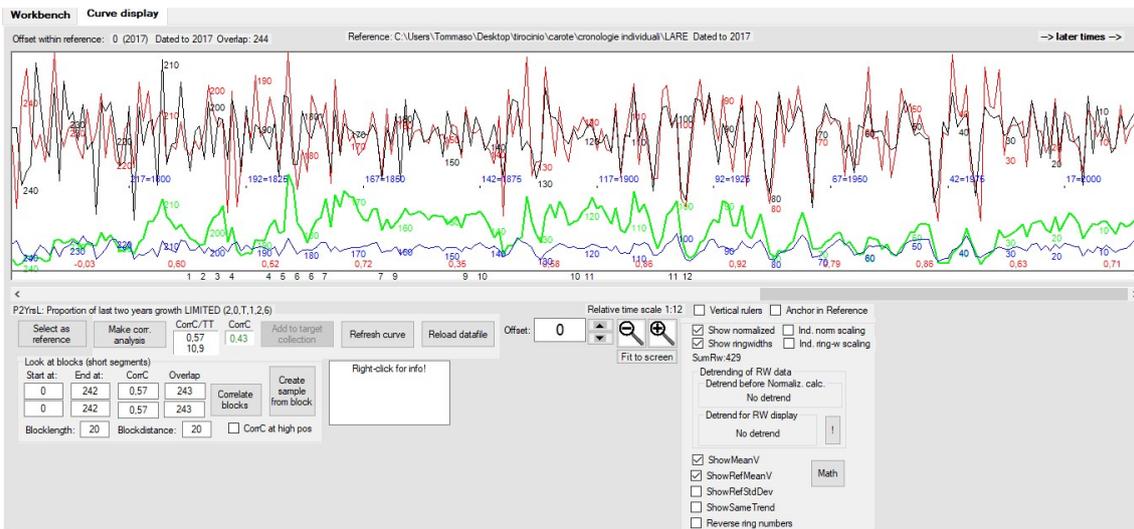
stato molto utile CDendro, un altro software che opera insieme a CooRecorder. Questo programma sviluppa delle curve dendrocronologiche e permette di lavorare con molteplici campioni, avendo quindi un confronto rapido e diretto.

Per le piante in cui sono stati prelevati più campioni le cronologie elementari sono state mediate tra loro, creando delle cronologie individuali. Le singole cronologie sono state così visivamente e statisticamente sincronizzate fra di loro (cross-datazione) al fine di garantire la precisione di misurazione (Holmes, 1983; Grissino e Mayer, 2001). Nella sincronizzazione visuale si confronta l'andamento generale di due curve al fine di verificare la concordanza dei principali minimi e massimi assoluti insieme all'assenza di opposizioni di fase. La sincronizzazione statistica, invece, si basa sui valori calcolati da CDendro e nello specifico dal coefficiente  $t$  di Student relativo al confronto fra due o più cronologie. Il valore di  $t$  dipende, oltre che dalla correlazione  $r$  tra le serie dendrocronologiche, anche dalla loro estensione temporale ovvero tanto più le serie sono lunghe, tanto maggiore è la probabilità di ottenere buoni valori.

Una volta ottenute le cronologie individuali di tutte le piante, si è proceduto mediando a loro volta le cronologie individuali delle piante della stessa area, ottenendo delle cronologie medie di ciascuna stazione (Alpe Laresin e Alpe dell'Oro).



**Figura 12:** creazione di una cronologia individuale su CooRecorder



**Figura 13:** due curve dendrocronologiche a confronto su CDendro

Per la fase ultima di analisi è stato utilizzato RStudio, un sistema di analisi statistica open source che permette di elaborare dati, eseguire calcoli dai più semplici ai più complessi, ottenere rappresentazioni grafiche e molto altro ancora. Sono state quindi prese singolarmente le cronologie stagionali e per prima cosa è stato fatto un sintetico report statistico sulle cronologie. Si sono ottenute quindi delle statistiche riguardo: il numero di serie, il numero di misurazioni, la lunghezza media delle serie, il range, la durata, l'intercorrelazione e l'autocorrelazione. Con l'intercorrelazione vengono confrontate serie diverse per cercare relazioni di dipendenza tra le diverse piante. Con l'autocorrelazione viene indicata la correlazione di una serie con sé stessa, a distanza di uno o più anni nel tempo.

A questo punto è stato eliminato il trend dovuto all'età, infatti con l'avanzare dell'età la pianta è soggetta ad un accrescimento minore. Inoltre, diversi studi hanno dimostrato che la fisiologia degli alberi subisce cambiamenti con l'età e ciò può causare variazioni nel tempo dei segnali climatici legati alla crescita. In *L. decidua*, le variabili della funzione di risposta più importanti cambiano con l'età secondo un modello duplice: in aumento per alberi di età inferiore a 200 anni e in diminuzione o costante per alberi più vecchi. Si pensa che un parametro endogeno legato allo stato idraulico diventi sempre più limitante man mano che gli alberi crescono e invecchiano, inducendo condizioni più stressanti e una maggiore sensibilità climatica negli individui più anziani. Il dato dell'accrescimento è stato quindi "purificato" tramite un detrend esponenziale negativo

prima e un detrend con spline (linea flessibile) con una frequenza di 0,50 e una lunghezza d'onda di 0,67 volte la lunghezza di ciascuna serie.

Successivamente sono stati calcolati altri parametri:  $r_{bar}$  indica la correlazione tra le serie di ciascun sito con trend ripulito: più il valore si avvicina ad 1 e più gli alberi sono legati tra loro. EPS invece misura l'affidabilità della cronologia, cioè indica la probabile appartenenza degli alberi campionati alla stessa popolazione. SNR è il rapporto tra il segnale climatico e la variabilità non dovuta al clima (rumore).

Si sono poi elaborati dei grafici con la cronologia media del sito rappresentanti sia la cronologia standard, che la cronologia residua, cioè senza l'autocorrelazione. I grafici di ACF e PACF sono degli indici di correlazione rispettivamente globale e parziale. In ultimo è stata calcolata la sensitività, che indica la capacità della pianta di rispondere in modo rapido agli stimoli esterni. In generale si può ritenere più affidabile PACF rispetto ad ACF.

Si è quindi iniziata l'analisi climatica. Per avere dati climatici il più precisi possibili sono state estratte le variabili climatiche relative a temperature medie mensili, precipitazioni mensili dal dataset climatico cru ts 3.1 della University of East Anglia per il periodo 1900-2017 in corrispondenza delle coordinate in gradi decimali delle aree di studio. L'estrazione delle variabili climatiche è stata eseguita entro un'area circolare di raggio  $0,05^\circ$  dove il centro è stato posto sulle aree di studio.

Per l'analisi climatica si è anche cercato di capire se era necessario o meno isolare gli attacchi di *Zeiraphera* dalle cronologie. La *Zeiraphera* (*Zeiraphera diniana*) è un insetto microlepidottero, anche detta tortrice grigia del larice, responsabile della completa defogliazione del larice. La particolarità di questo insetto è che ha delle pullulazioni ogni 8-9 anni. Durante le pullulazioni è in grado di defogliare completamente il larice, che quindi mostra una crescita limitata per 2-3 anni. Per verificare la presenza di attacchi di *Zeiraphera* è stata eseguita un'analisi delle frequenze (Morlet wavelet analysis) delle cronologie stazionali.

Successivamente sono stati usati i metodi 3 e 4 del paper di Cerato et al. (2019) per individuare i Pointer Years (PY) corrispondenti ai possibili attacchi. Negli anni

individuati come Pointer Year il valore di indice di accrescimento è stato sostituito con il suo valore medio calcolato negli anni non Pointer Year.

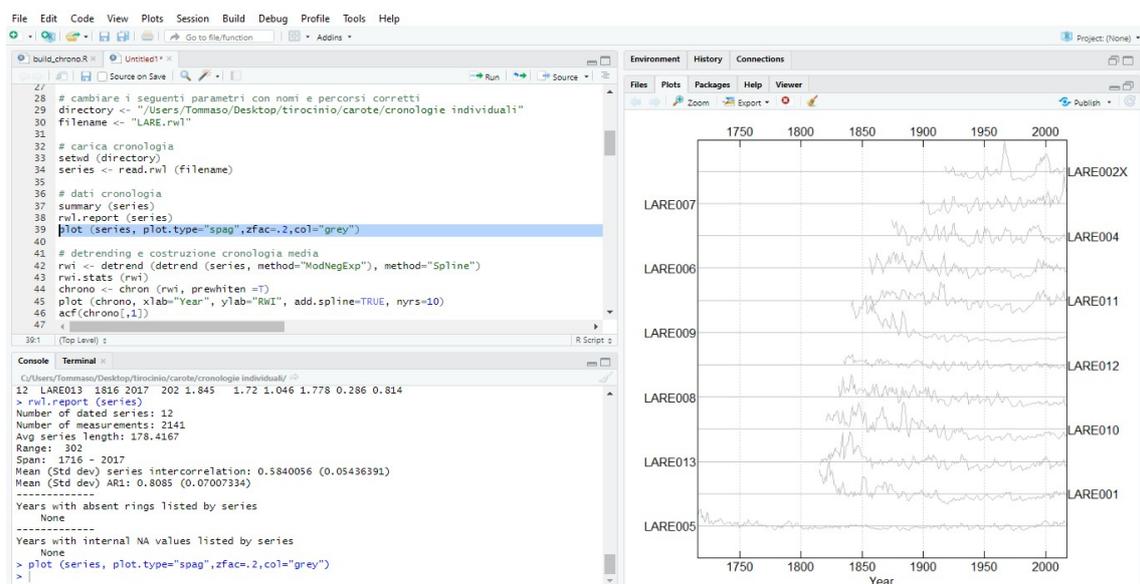
Con il metodo 3 i PY sono stati evidenziati usando gli indici standard di larghezza dell'anello (RWI), la media RWI e la deviazione standard RWI. I PY sono stati identificati negli anni in cui venivano soddisfatte entrambe le seguenti condizioni: la RWI deve essere inferiore alla media del RWI meno la deviazione standard di RWI moltiplicata per 0,85; la RWI deve essere inferiore di 0,6 rispetto alla RWI dell'anno precedente

Con il metodo 4 le serie state filtrate e quindi analizzate per i PY secondo Schweingruber et al. (1990) e Neuwirth et al. (2007) usando la funzione "pointer.norm" del pacchetto "pointRes" in R (Van Der Maaten-Theunissen et al. 2015). Seguendo i metodi di Neuwirth et al. (2007), le soglie di deviazione standard sono state impostate su 1.000, 1.280 e 1.645 per identificare eventi deboli, forti ed estremi. La finestra di analisi è stata impostata su sette anni e il numero minimo delle serie che devono registrare l'evento è stato impostato a 75%.

Le cronologie medie standard dei due siti sono state correlate alle serie climatiche da giugno dell'anno precedente a luglio dell'anno in corso mediante correlazione di Pearson (univariata) e analisi delle funzioni di risposta (multivariate) con correzione di Bonferroni per i test multipli. Sono state inoltre eseguite correlazioni con le medie trimestrali delle variabili climatiche considerate.

Per esaminare la stabilità delle correlazioni climatiche nel tempo è stata calcolata la correlazione di Pearson tra le cronologie stagionali e la temperatura e precipitazione mensile su una finestra mobile di 25 anni con procedura bootstrap.

Si è infine tentato di effettuare una ricostruzione climatica a partire dall'anno di inizio di ciascuna cronologia basandosi sulla variabile che risultava maggiormente correlata all'accrescimento diametrico. Questa rudimentale ricostruzione climatica si basa su un modello lineare elaborato sui dati climatici a partire dal 1930. Per questa ricostruzione è stata usata la cronologia stagionale iniziale e non quella "pulita" dagli attacchi di *Zeiraphera* poiché le variazioni erano insignificanti. Il modello è stato validato calcolando l'errore quadratico medio dei valori predetti dal 1930 in poi contro quelli osservati.



**Figura 14:** fase di analisi con RStudio

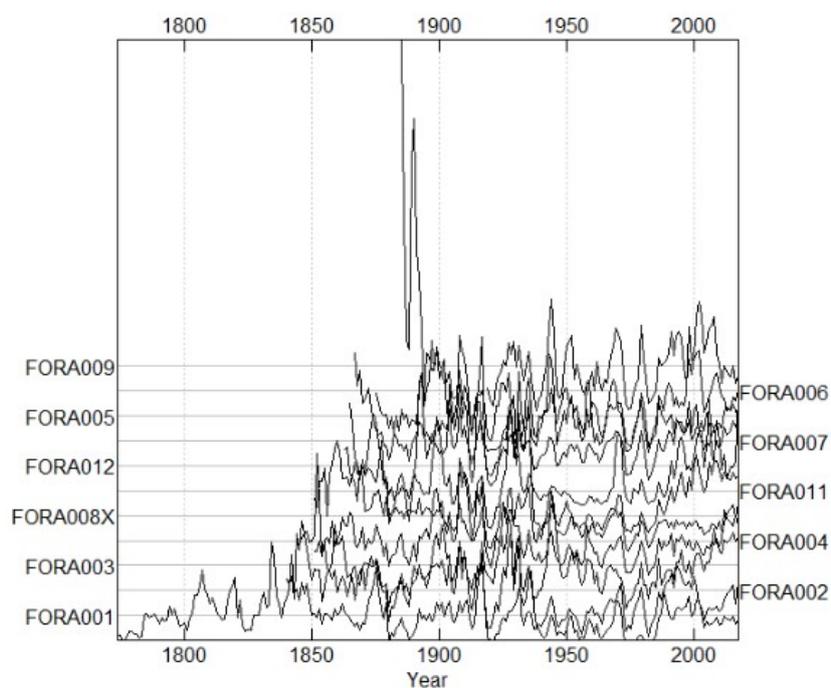
## 5. RISULTATI

In FORA le piante analizzate sono state 11, mentre per LARE sono state 12 (Tabella 1). Nel caso di LARE si ha una cronologia stagionale lunga 302 anni, mentre in FORA lunga 244 anni. La durata si riferisce all'anno di inizio della datazione, quindi 1716 in LARE e 1774 per FORA. La correlazione indica quanto un valore di una variabile dipenda dal valore di un'altra variabile. L'intercorrelazione tra le serie vale 0,68 in FORA e 0,58 in LARE. I valori di autocorrelazione sono alti, rispettivamente 0,75 e 0,81 in FORA e LARE. Questo indica quindi che c'è una stretta relazione di dipendenza all'interno delle serie, mentre ovviamente le diverse piante tra loro sono correlate meno. La deviazione standard è intorno allo 0,06 circa sia nell'autocorrelazione che nell'intercorrelazione, quindi i dati sono omogenei.

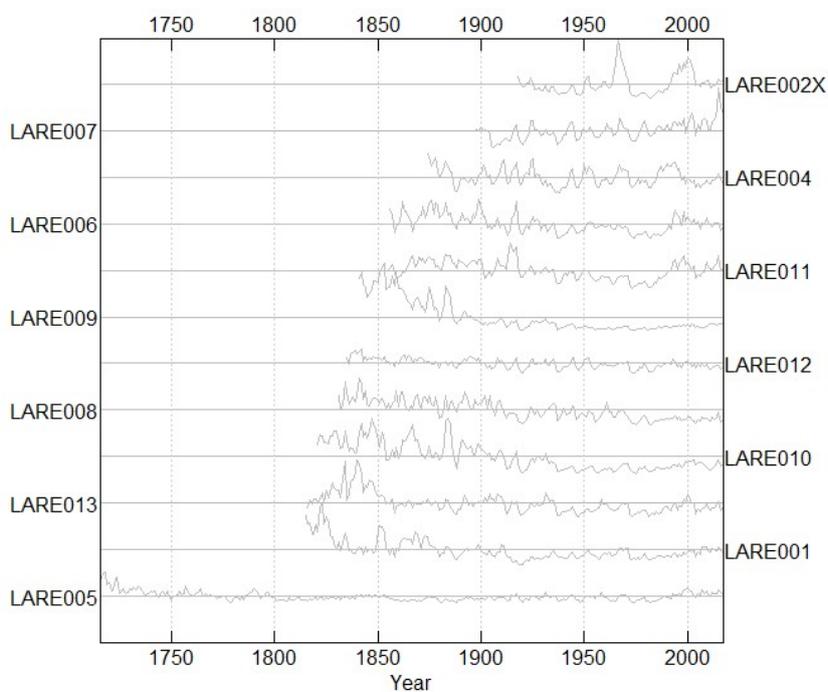
	<b>FORA</b>	<b>LARE</b>
Numero di serie	11	12
Numero di misurazioni	1762	2141
Lunghezza media delle serie	160.1818	178.4167
Range	244	302
Durata	1774 - 2017	1716 - 2017
Intercorrelazione media delle serie (Std dev)	0,68 (0,06)	0,58 (0,05)
Autocorrelazione media delle serie (Std dev)	0,75 (0,05)	0,81 (0,07)

**Tabella 1:** statistiche riguardanti le cronologie stagionali

Dalla media delle cronologie (Figure 15 e 16) sono state ottenute le cronologie stagionali, su cui poi è stata svolta l'intera analisi climatica. Come si può notare dai grafici, si hanno molte informazioni dalla metà dell'800, mentre nel periodo precedente le informazioni sono sempre più scarse.



**Figura 15:** cronologie individuali FORA



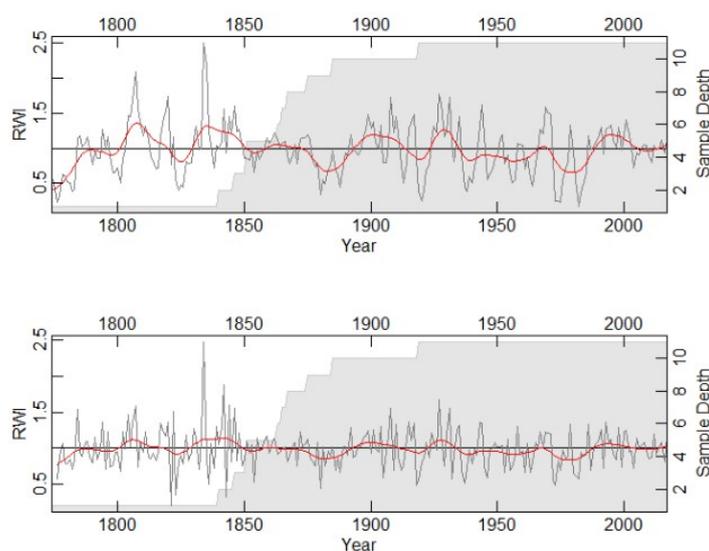
**Figura 16:** cronologie individuali LARE

Le statistiche della Tabella 2 sono state calcolate a partire dalle cronologie stazionali e sono parametri molto importanti per uno studio dendroclimatico. I valori di  $R_{bar}$  ottenuti sono accettabili, nonostante ci si auspicasse valori più alti di 0,564 e 0,482. Le cronologie stazionali si avvicinano molto al valore massimo di EPS, questo indica che le piante hanno risposto in modo molto simile alle variabili esterne. Infine, SNR ci indica che il segnale climatico non è così netto, in quanto c'è molta variabilità non dovuta al clima (rumore).

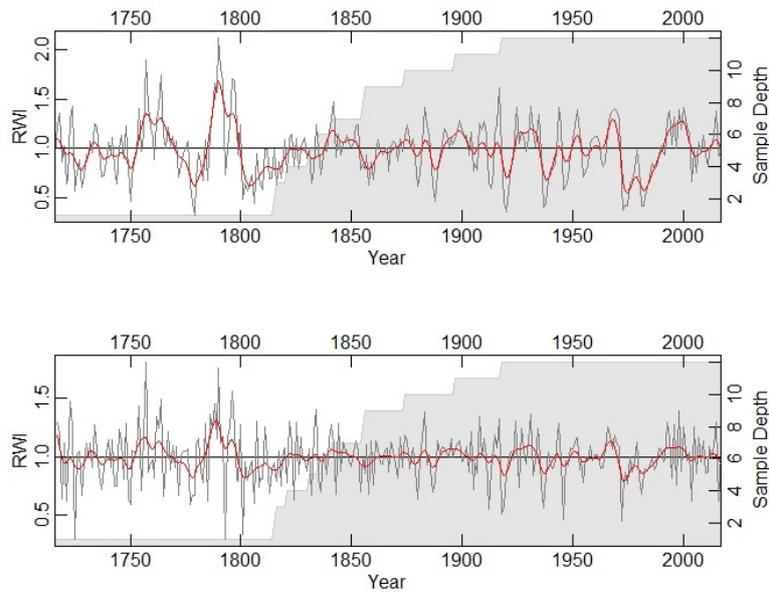
	<b>FORA</b>	<b>LARE</b>
$R_{bar}$	0,564	0,482
EPS	0,903	0,868
SNR	9,35	6,601

**Tabella 2:** statistiche delle cronologie stazionali

La cronologia media di FORA va dal 1774 al 2017, con il numero massimo di 11 campioni a partire dal 1918 (Figura 17). In LARE (Figura 18) la cronologia media va dal 1716 al 2017, con il numero massimo di 12 campioni a partire dal 1917.

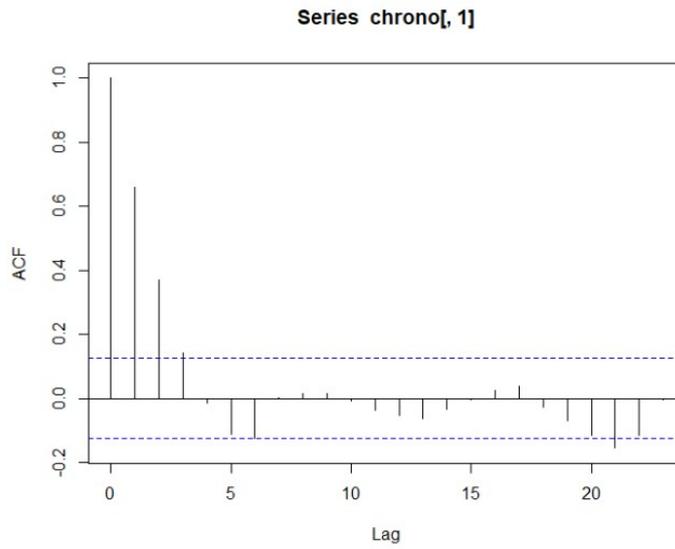


**Figura 17:** cronologia media FORA. La linea rossa rappresenta un ammorbidimento della serie, mentre il colore grigio sullo sfondo il numero di campioni che formano la cronologia. In alto: cronologia standard; in basso: cronologia residua (senza autocorrelazione)

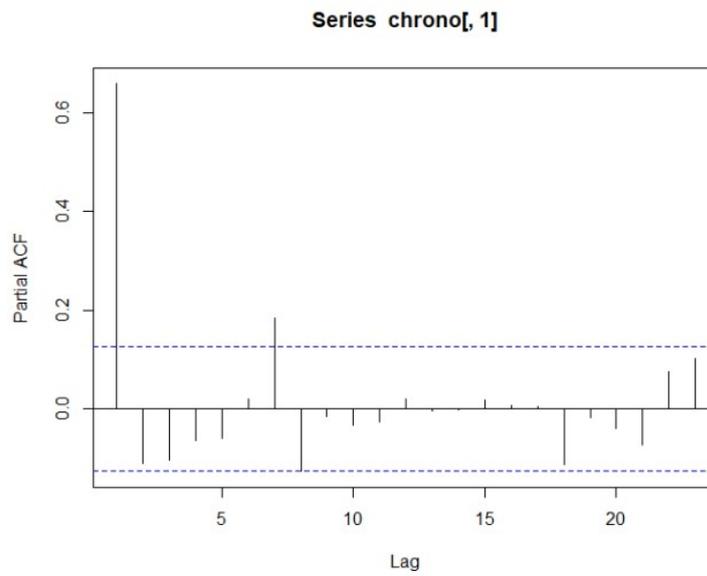


**Figura 18:** cronologia media LARE. La linea rossa rappresenta un ammorbidimento della serie, mentre il colore grigio sullo sfondo il numero di campioni che formano la cronologia. In alto: cronologia standard; in basso: cronologia residua (senza autocorrelazione)

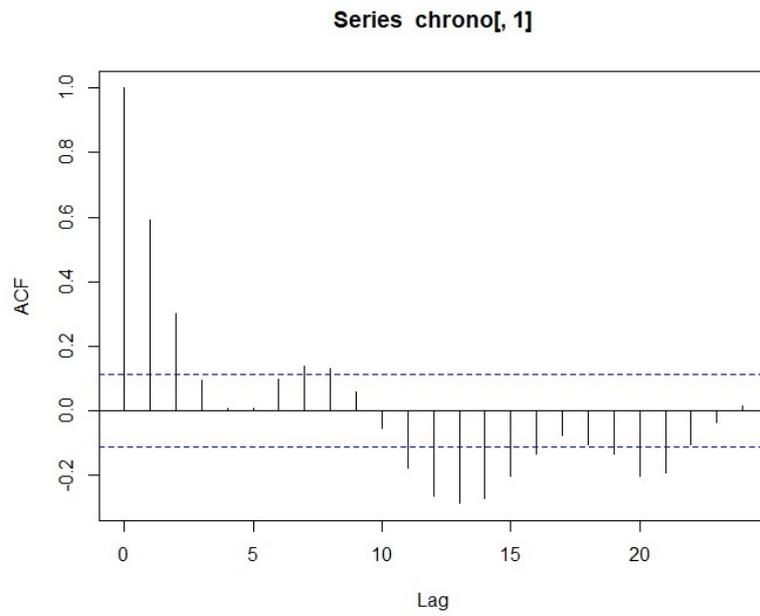
Da come si può osservare, non c'è alcuna autocorrelazione significativa nei primi anni in entrambe le aree di studio (Figure 20 e 22). Si è preferito utilizzare gli indici di autocorrelazione parziale PACF al posto degli indici di correlazione globale ACF (Figure 19 e 21) in quanto il primo metodo viene ritenuto più affidabile. L'affidabilità è data dal fatto che ACF indica se un determinato anello è correlato ad un altro, mentre PACF, se la condizione precedente è verificata, ci dice se lo stesso anello è correlato ad uno degli anni precedenti, senza considerare ACF.



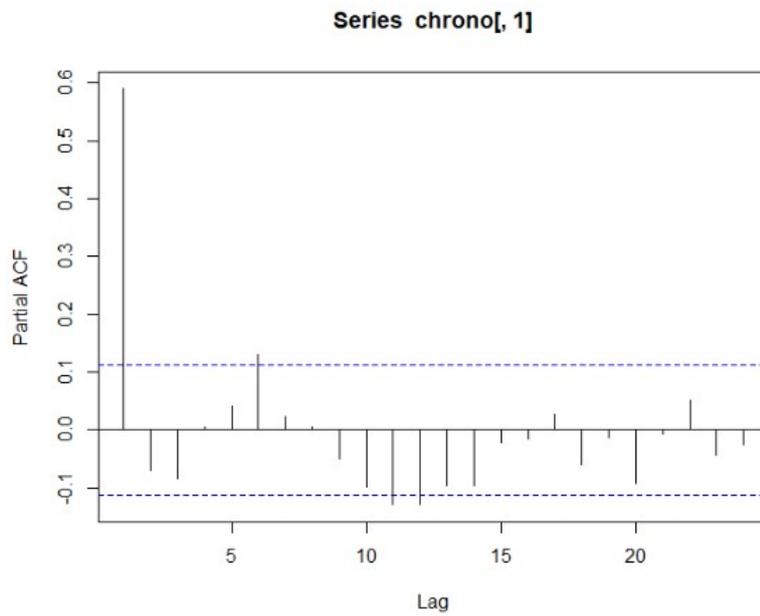
**Figura 19:** indice di correlazione globale FORA. Le righe orizzontali blu tratteggiate delimitano la significatività dei dati ( $p < 0,05$ ).



**Figura 20:** indice di autocorrelazione parziale FORA. Le righe orizzontali blu tratteggiate delimitano la significatività dei dati ( $p < 0,05$ ).



**Figura 21:** indice di correlazione globale LARE. Le righe orizzontali blu tratteggiate delimitano la significatività dei dati ( $p < 0,05$ ).



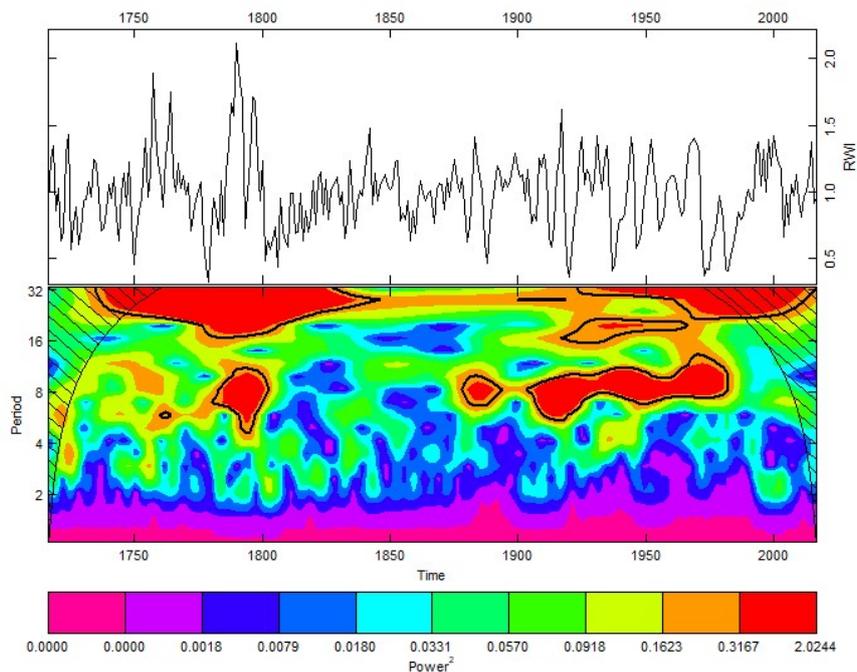
**Figura 22:** indice di autocorrelazione parziale LARE. Le righe orizzontali blu tratteggiate delimitano la significatività dei dati ( $p < 0,05$ ).

Le piante sono considerate sensitive quando il valore di sensitività è maggiore di 0,2. In entrambe le aree di studio abbiamo quindi delle piante sensitive (Tabella 3).

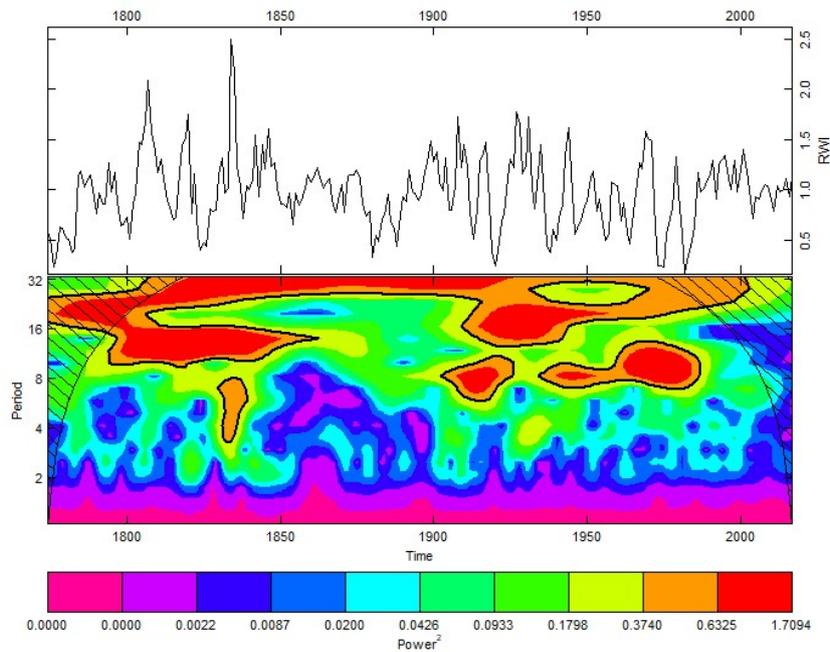
	<b>FORA</b>	<b>LARE</b>
sensitività	0,30	0,22

**Tabella 3:** sensitività delle serie

Si può osservare una presenza significativa di ciclicità nelle cronologie stazionali per frequenze intorno agli 8 anni dal 1900 al 1980 (Figure 23 e 24), che si possono quindi attribuire a *Zeiraphera*. Sono presenti delle ciclicità significative di 8 anni anche nel periodo che va dal 1800 al 1850 in FORA e intorno al 1800 in LARE. Si possono inoltre osservare delle ciclicità molto più significative intorno ai 30 anni dovute probabilmente a oscillazioni climatiche di medio periodo.



**Figura 23:** Morlet wavelet analysis in LARE



**Figura 24:** Morlet wavelet analysis in FORA

Con i metodi 3 e 4 di Cerato sono stati individuati dei Pointer Years corrispondenti ai possibili anni di attacco di *Zeiraphera*. Per avere un dato più significativo sono stati scartati i Pointer Years che comparivano una sola volta. Di seguito i risultati di questa analisi.

Pointer Years in LARE:

- Con il metodo 3: 1880, 1882, 1886, 1888, 1913, 1919, 1956, 1961, 1963, 1973, 1974, 1975, 1982, 1988.
- Con il metodo 4: 1783, 1790, 1801, 1810, 1815, 1816, 1821, 1832, 1833, 1838, 1845, 1850, 1854, 1880, 1888, 1913, 1982, 1992, 2004.

Pointer Years in FORA:

- Con il metodo 3: 1824, 1835, 1843, 1858, 1880, 1887, 1888, 1912, 1919, 1937, 1946, 1972, 1973, 1981, 1986, 1995, 2004, 2016.
- Con il metodo 4: 1725, 1733, 1737, 1738, 1744, 1750, 1755, 1761, 1766, 1772, 1779, 1785, 1789, 1793, 1801, 1806, 1810, 1816, 1821, 1832, 1880, 1888, 1937, 1946, 1973, 1981, 1997, 2004.

Pointer Years in comune:

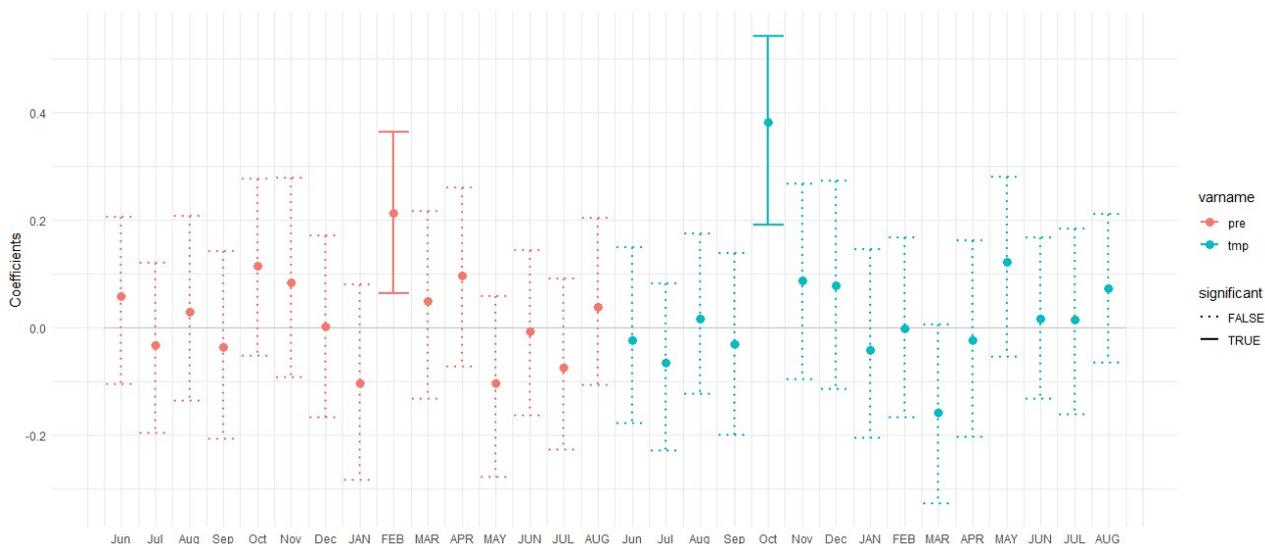
- 1801, 1810, 1816, 1821, 1832, 1880, 1888, 1913, 1919, 1937, 1946, 1973, 1981, 1982, 2004.

Le statistiche della Tabella 4 sono il frutto dell'analisi delle cronologie stagionali rifatte a partire dalle serie "corrette", in cui è stata eliminata l'influenza degli attacchi di *Zeiraphera*. I risultati, confrontati con quelli ottenuti senza eliminare gli attacchi, non mostrano variazioni significative. Per questo motivo è stato ritenuto ininfluente rimuovere il trend periodico dovuto agli attacchi del lepidottero.

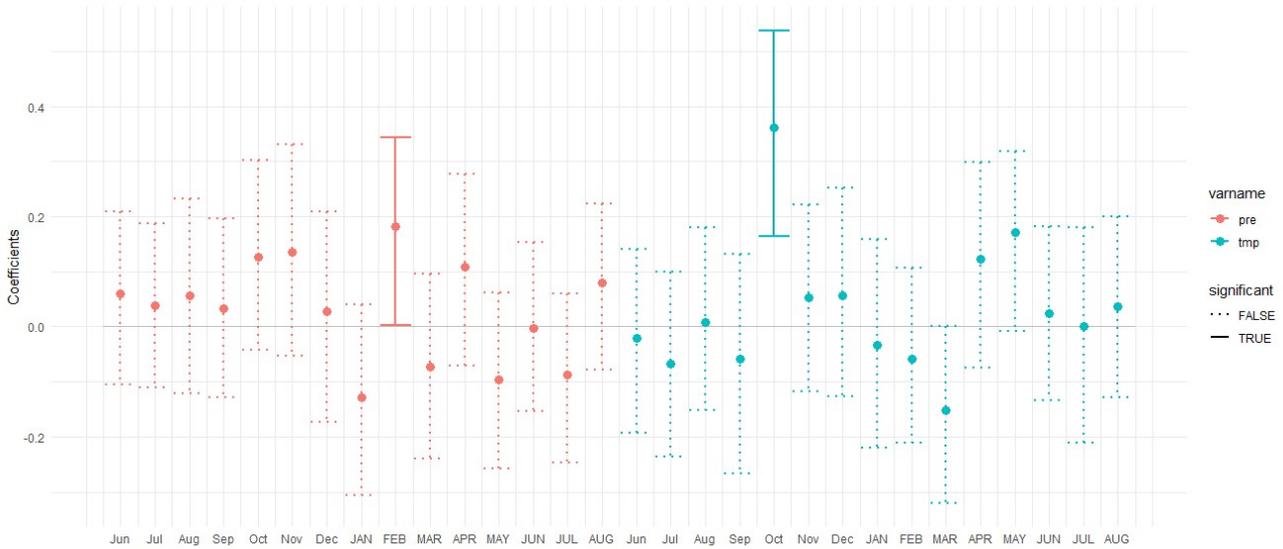
	<b>FORA</b>	<b>LARE</b>
Rbar	0,571	0,480
EPS	0,915	0,885
SNR	10,767	7,71

**Tabella 4:** statistiche delle cronologie stagionali dopo aver sostituito tutti gli anni identificati con il valore medio di RWI negli anni non di attacco

I dati più significativi delle correlazioni climatiche sia in FORA che in LARE sono le temperature di ottobre dell'anno precedente con correlazione positiva (*coef. di correlazione* = 0,371), le precipitazioni di febbraio con correlazione positiva (*coef. di correlazione* = 0,171) e infine, anche se poco significativa, si potrebbe considerare anche la correlazione negativa con le temperature di marzo (Figure 25 e 26).

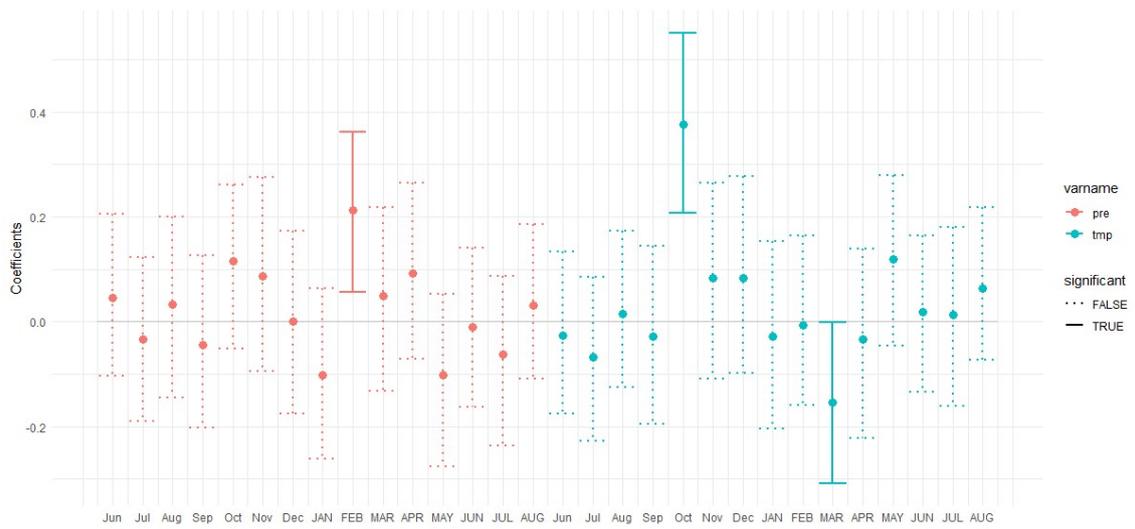


**Figura 25:** correlazioni climatiche tra RWI e precipitazioni (rosso) e temperature medie (blu) da giugno dell'anno precedente a luglio dell'anno in corso calcolate mediante correlazione di Pearson (univariata) con correzione di Bonferroni per i test multipli in FORA. Le linee continue esprimono correlazioni significative ( $p < 0,05$ )

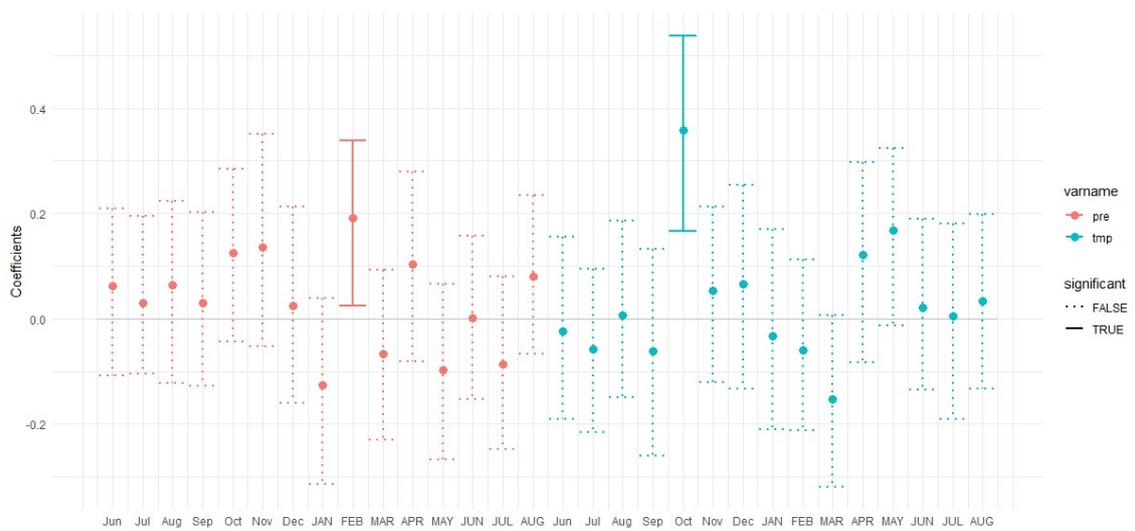


**Figura 26:** correlazioni climatiche tra RWI e precipitazioni (rosso) e temperature medie (blu) da giugno dell'anno precedente a luglio dell'anno in corso calcolate mediante correlazione di Pearson (univariata) con correzione di Bonferroni per i test multipli in LARE. Le linee continue esprimono correlazioni significative ( $p < 0,05$ )

Nelle funzioni di risposta di entrambe le aree (Figure 27 e 28) si può notare una significatività positiva per quanto riguarda le precipitazioni di febbraio dell'anno in corso (*coef. di correlazione* = 0,189) e le temperature di ottobre dell'anno precedente (*coef. di correlazione* = 0,361). Invece le temperature di marzo dell'anno in corso risultano avere una significatività negativa solamente in LARE anche se in FORA il dato non si discosta troppo dall'essere significativo. In ogni caso, come per le correlazioni, il dato più significativo per la crescita dell'anello risulta essere la temperatura media dell'ottobre dell'anno precedente.

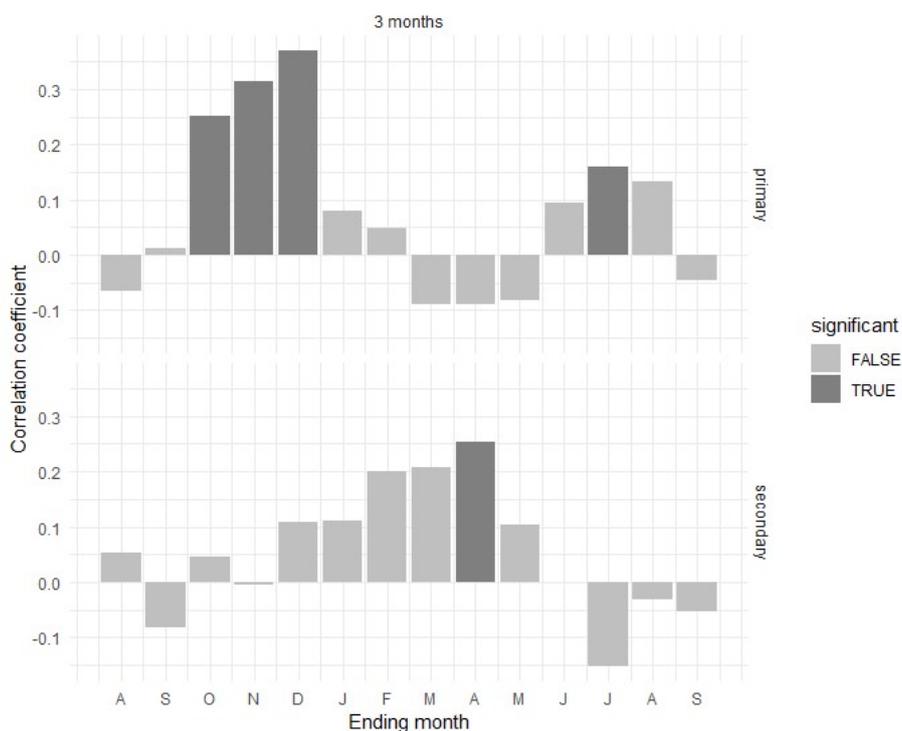


**Figura 27:** funzioni di risposta calcolate mediante regressione lineare multipla. Nel grafico troviamo le precipitazioni (rosso) e le temperature medie (blu) da giugno dell'anno precedente a luglio dell'anno in corso in FORA. Le linee continue esprimono correlazioni significative ( $p < 0,05$ )

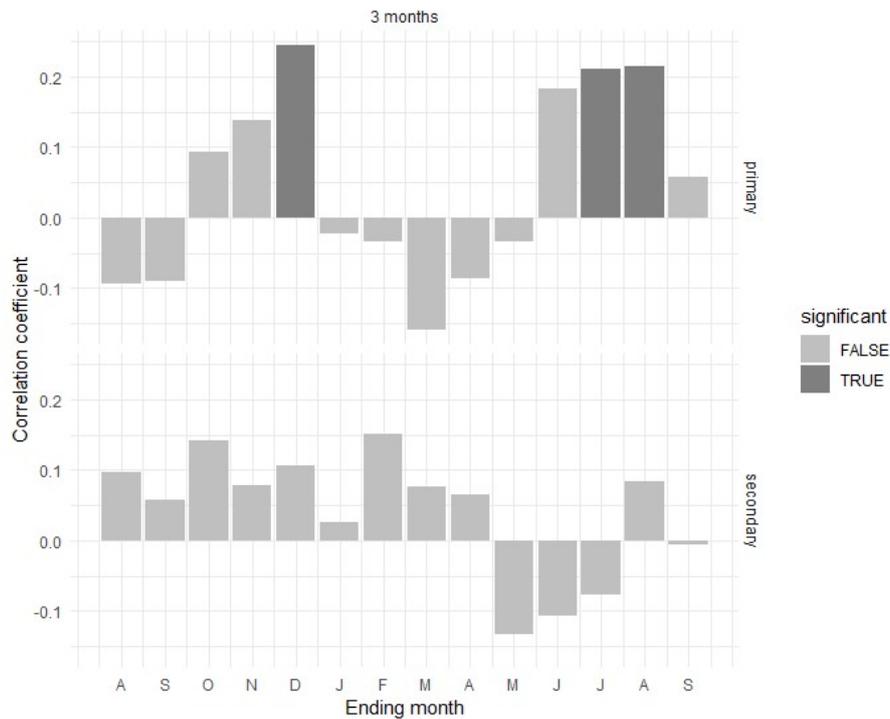


**Figura 28:** funzioni di risposta calcolate mediante regressione lineare multipla. Nel grafico troviamo le precipitazioni (rosso) e le temperature medie (blu) da giugno dell'anno precedente a luglio dell'anno in corso in FORA. Le linee continue esprimono correlazioni significative ( $p < 0,05$ )

Nelle correlazioni tra RWI e medie trimestrali in FORA (Figura 29) si riscontra una correlazione positiva con le temperature nei mesi di ottobre (*coef. di correlazione* = 0,252), novembre (*coef. di correlazione* = 0,313) e dicembre (*coef. di correlazione* = 0,369) dell'anno precedente. Per quanto riguarda le precipitazioni è da segnalare una significatività positiva solo in agosto. In LARE (Figura 30) invece le temperature sono positivamente correlate a RWI solo nei mesi di dicembre dell'anno precedente (*coef. di correlazione* = 0,244), luglio (*coef. di correlazione* = 0,212) e agosto (*coef. di correlazione* = 0,215), mentre per le precipitazioni non si riscontrano significatività.

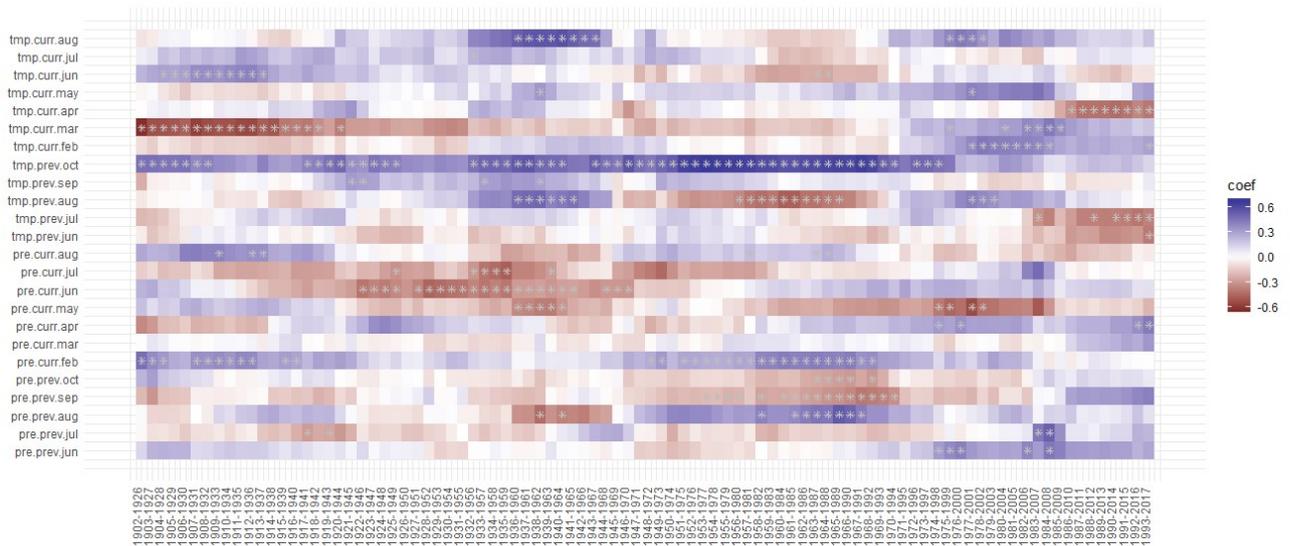


**Figura 29:** correlazioni tra RWI e medie trimestrali delle variabili climatiche (primary: temperature medie; secondary: precipitazioni) in FORA. Il grigio scuro indica le correlazioni significative ( $p < 0,05$ )

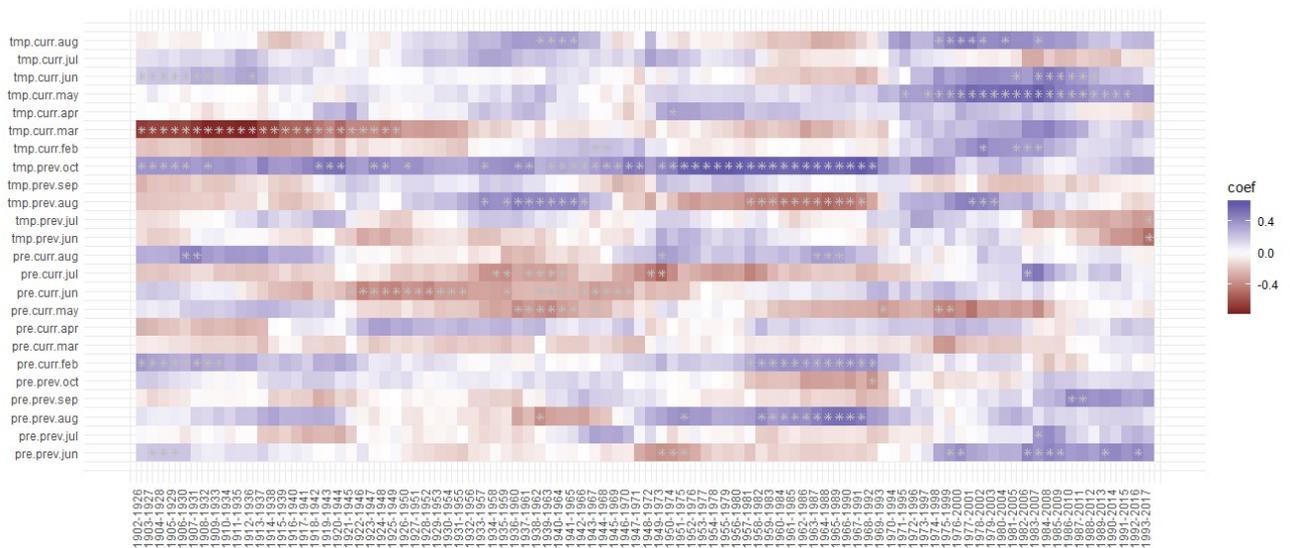


**Figura 30:** correlazioni tra RWI e medie trimestrali delle variabili climatiche (primary: temperature medie; secondary: precipitazioni) in LARE. Il grigio scuro indica le correlazioni significative ( $p < 0,05$ )

Nelle correlazioni mobili di Pearson (Figure 31 e 32) si osserva una correlazione significativamente positiva nelle temperature di ottobre dell'anno precedente e in quelle di maggio e giugno per il periodo più recente. Da inizio '900 fino agli anni '40 le temperature di marzo erano significative in modo negativo, mentre dagli anni '80 ad oggi si nota una significativa tendenza positiva. Anche nelle temperature di giugno e luglio si vede un cambio di tendenza: nel periodo che dagli anni '80-'90 ci porta fino ai giorni nostri si può notare un'influenza significativa e positiva sull'accrescimento delle piante.



**Figura 31:** correlazione mobile di Pearson tra la cronologia stagionale di FORA e le variabili climatiche mensili considerate, su una finestra mobile di 25 anni. In rosso sono indicate le correlazioni negative, in blu quelle positive e gli asterischi indicano le correlazioni significative ( $p < 0,05$ )



**Figura 32:** correlazione mobile di Pearson tra la cronologia stagionale di LARE e le variabili climatiche mensili considerate, su una finestra mobile di 25 anni. In rosso sono indicate le correlazioni negative, in blu quelle positive e gli asterischi indicano le correlazioni significative ( $p < 0,05$ )

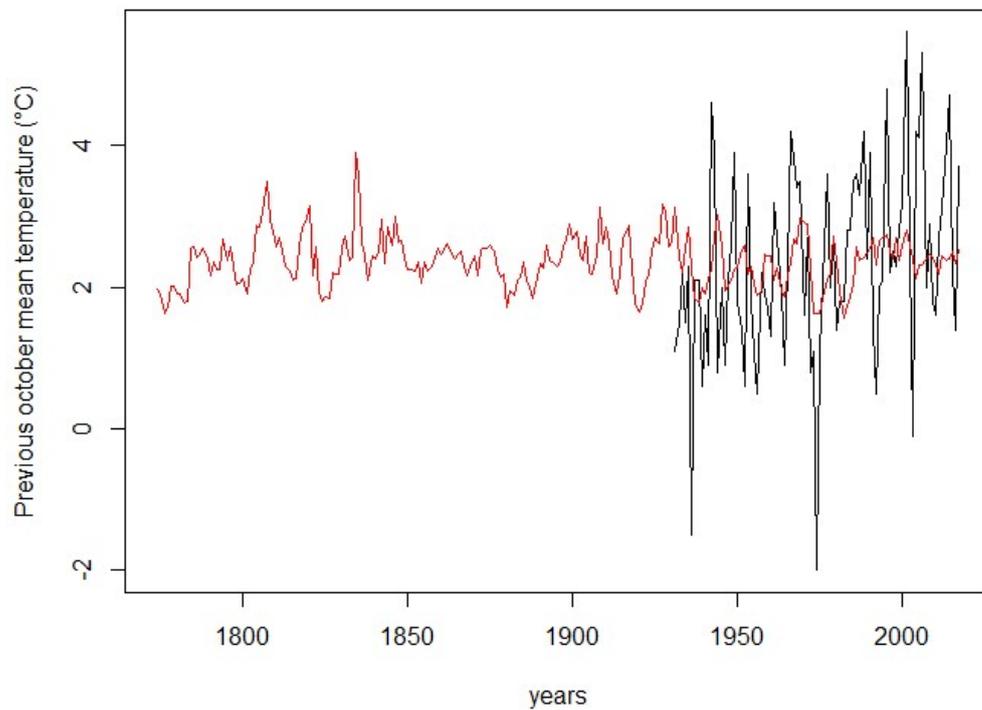
Il modello lineare di ricostruzione climatica (Tabella 5) è significativo sia in FORA che in LARE, ma R quadrato è molto basso ( $< 0,09$ ). Un valore così basso indica quindi che la temperatura di ottobre spiega pochissimo della variabilità della cronologia stagionale, come si nota anche dal valore dell'errore quadratico medio (pari al 135% del RWI

medio). Il livello di significatività espresso dal p value è accettabile in FORA mentre non lo è in LARE. Inoltre, come si può osservare dal plot, non c'è trend temporale.

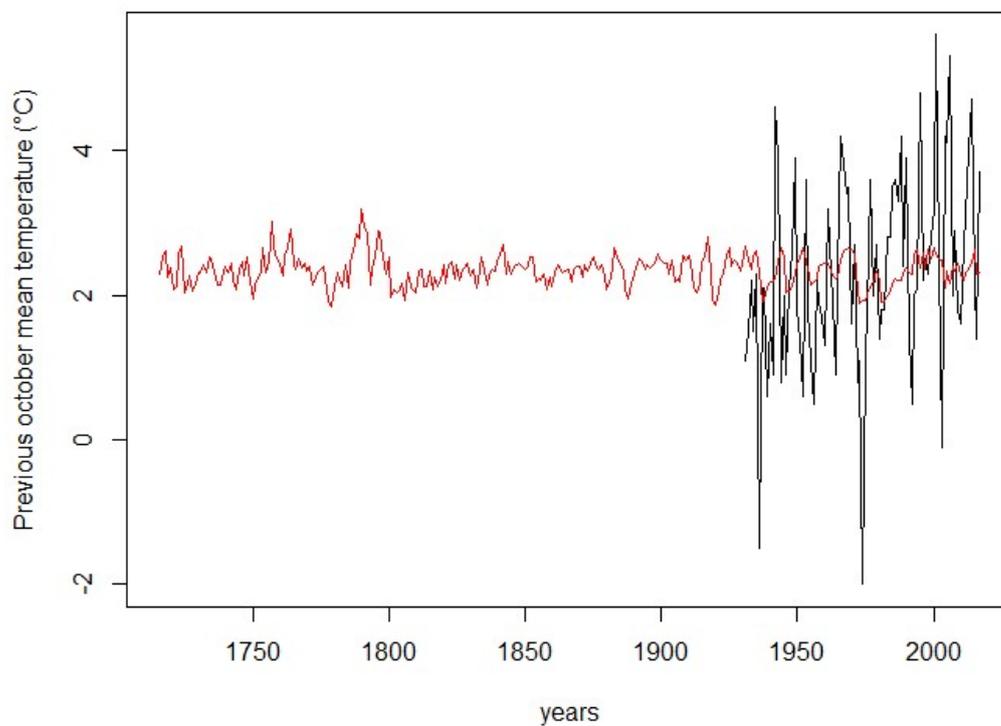
	FORA	LARE
Estimate std	1,007	0,748
P value	0,019	0,142
R <sup>2</sup> corretto	0,051	0,014
Errore quadratico medio	1,396	1,373

**Tabella 5:** statistiche del modello lineare di ricostruzione climatica

In entrambe le ricostruzioni climatiche delle temperature (figure 38 e 39) si può notare come esse non seguano il trend delle temperature realmente registrate nel periodo 1930-2017. Infatti il trend degli ultimi anni porta ad una crescita delle temperature di 2°C, mentre con la ricostruzione si assiste ad una situazione stazionaria per l'intero periodo ricostruito. Oltre a non seguire il trend si può anche osservare come i picchi di massima e di minima non siano raggiunti, anzi il range di oscillazione delle temperature è molto contenuto.

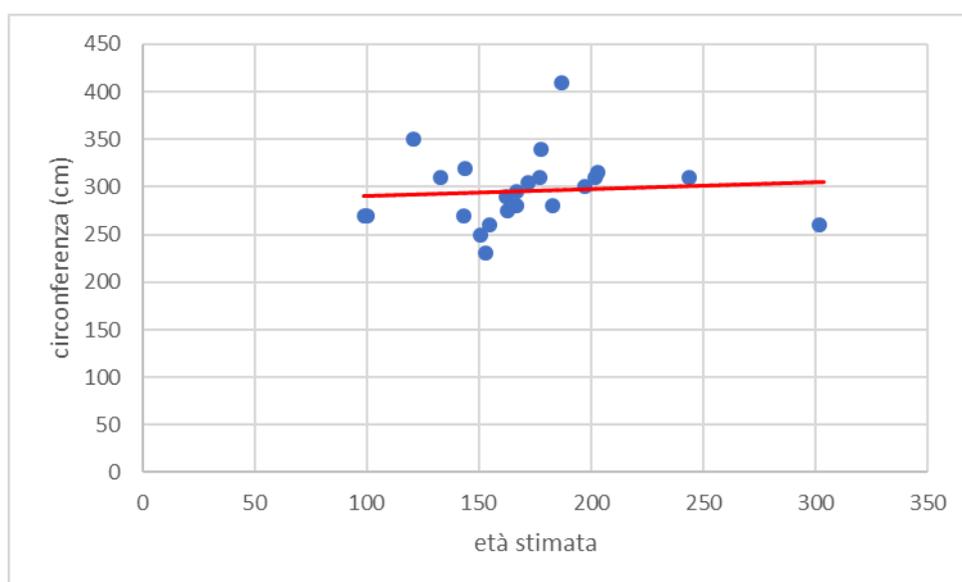


**Figura 33:** ricostruzione delle temperature in FORA basata sulla temperatura dell'ottobre dell'anno precedente. In rosso è indicata la ricostruzione e in nero le temperature reali registrate nel periodo 1930-2017



**Figura 34:** ricostruzione delle temperature in LARE basata sulla temperatura dell'ottobre dell'anno precedente. In rosso è indicata la ricostruzione e in nero le temperature reali registrate nel periodo 1930-2017

Il larice più vecchio raggiunge i 302 anni (Tabella 6), un'età relativamente modesta se si pensa che non distante dalle aree di studio è stato trovato un larice millenario. Invece si può notare come la circonferenza della pianta non sia assolutamente un indicatore affidabile per stimare l'età (Figura 35). Infatti la pianta di dimensioni maggiori ha un'età decisamente più contenuta rispetto alla pianta più vecchia. Questo è facilmente spiegabile con la presenza di un alpeggio a pochi metri dall'albero. Qui, grazie alle attività legate all'alpeggio, questo larice ha sicuramente trovato condizioni di nutrizione minerale decisamente più favorevoli rispetto agli altri larici.



**Figura 35:** andamento della circonferenza al crescere dell'età

<b>Codice pianta</b>	<b>periodo</b>	<b>Età stimata (anni)</b>	<b>Circonferenza (cm)</b>
LARE001	1815-2017	203	315
LARE002	1918-2017	100	270
LARE004	1874-2017	144	320
LARE005	1716-2017	302	260
LARE006	1856-2017	162	290
LARE007	1897-2017	121	350
LARE008	1831-2017	187	410
LARE009	1841-2017	177	310

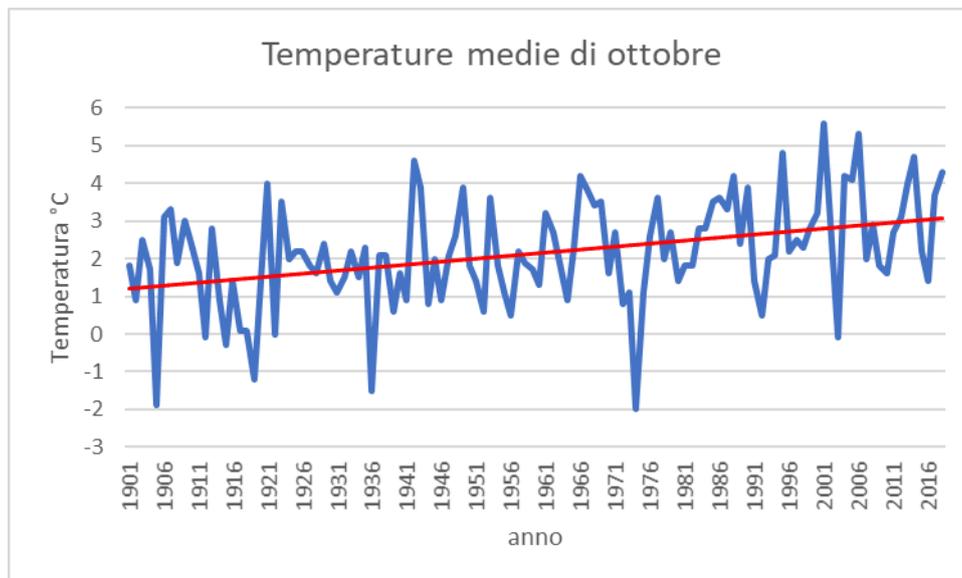
LARE010	1821-2017	197	300
LARE011	1855-2017	163	275
LARE012	1835-2017	183	280
LARE013	1816-2017	202	310
FORA001	1774-2017	244	310
FORA002	1840-2017	178	340
FORA003	1846-2017	172	305
FORA004	1851-2017	167	280
FORA005	1875-2017	143	270
FORA006	1885-2017	133	310
FORA007	1867-2017	151	250
FORA008	1851-2017	167	295
FORA009	1919-2017	99	270
FORA011	1863-2017	155	260
FORA012	1865-2017	153	230

**Tabella 6:** elenco piante datate, con età stimata e circonferenza

## 6. DISCUSSIONE

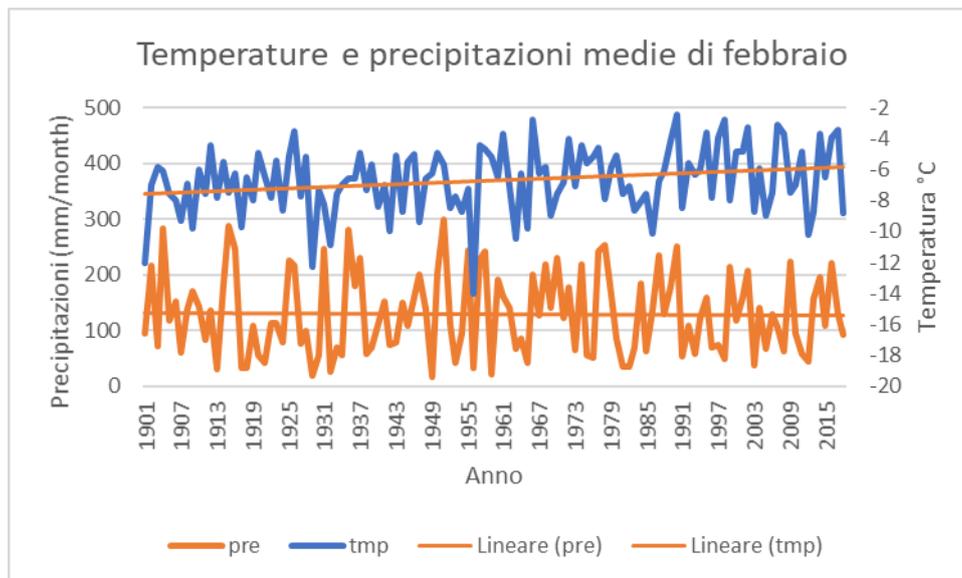
Durante le analisi si sono ipotizzati dei possibili anni di attacco di *Zeiraphera*. Questi sono stati trovati solamente in periodi isolati più o meno lunghi con ciclicità di circa 8-9 anni.

Dalle funzioni di risposta e dalle correlazioni climatiche si è visto come le temperature di ottobre del mese precedente influiscano positivamente sulla crescita dei larici. Infatti si può affermare che le temperature di ottobre risultino cruciali, in quanto questo periodo generalmente corrisponde all'entrata in riposo vegetativo del larice. Temperature alte in questo periodo influiscono sulla qualità, sulle dimensioni e sulla sopravvivenza delle gemme formate per l'anno successivo, quindi indirettamente influiscono sulla capacità di assimilazione della pianta nella stagione successiva (Weber et al., 2007). Questo effetto può essere spiegato con l'innalzamento della temperatura media del mese (Figura 36).



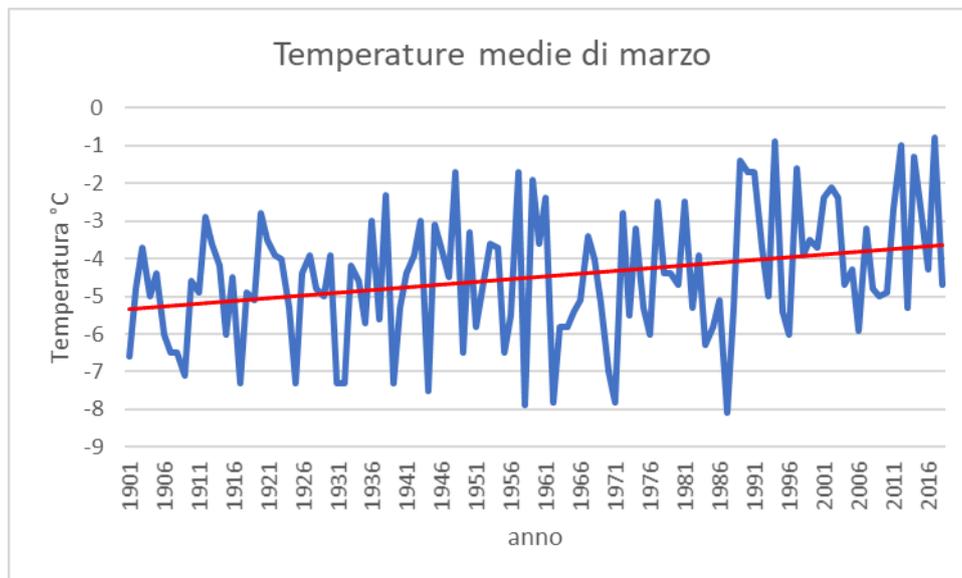
**Figura 36:** temperature medie di ottobre

Inoltre è risultato che le precipitazioni di febbraio hanno un effetto positivo sullo sviluppo del larice, un dato interessante in quanto questo risultato non è stato ritrovato in tutto il periodo studiato. I larici, durante la stagione vegetativa, utilizzano principalmente l'acqua derivante dalla fusione della neve per la propria crescita (Leonelli et al., 2017). Di conseguenza le condizioni estive più severe dovute alle temperature in crescita spiegano il motivo per cui il larice sia particolarmente sensibile alle precipitazioni invernali. A maggior ragione, in suoli superficiali, poco profondi e ad alta quota, l'acqua di fusione del manto nevoso fornisce un serbatoio essenziale (Beniston et al. 2003). Quest'acqua infatti giunge all'apparato radicale per infiltrazione, in modo graduale grazie agli accumuli nevosi invernali che si formano alle quote più alte. Da come si può notare in Figura 37, le precipitazioni rimangono costanti in tutto l'arco temporale dell'ultimo secolo. Il motivo della variazione di significatività delle precipitazioni di febbraio sulla crescita dei larici durante il periodo indagato è difficile da attribuire con chiarezza. Potrebbe essere possibile che in questa dinamica ci siano ulteriori variabili climatiche che rendano i larici più o meno sensibili alle precipitazioni di questo mese.



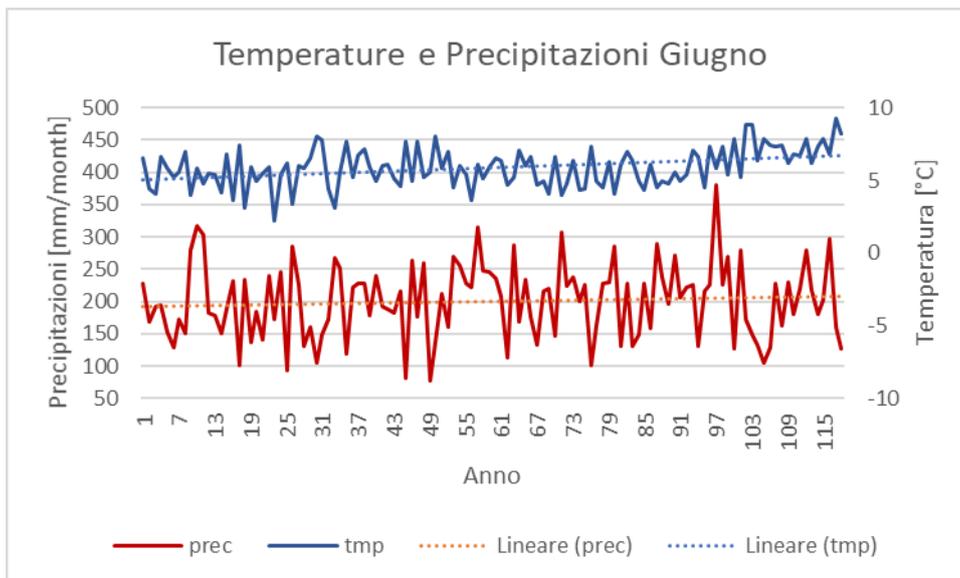
**Figura 37:** precipitazioni e temperature medie di febbraio

Un altro dato interessante, anche se meno significativo dei due precedenti, sono le temperature di marzo che influiscono negativamente sulla crescita dei larici. L'analisi con le correlazioni mobili ha indicato che le temperature di marzo ad inizio '900 risultavano essere negative per la crescita delle piante, mentre dagli anni '70 in poi la tendenza si inverte, facendo diventare positiva l'influenza che la temperatura di marzo esercita sui larici. Il larice verso aprile riprende la stagione vegetativa, quindi le temperature di marzo risultano fondamentali per il ciclo fenologico della pianta. Lo scioglimento della neve inoltre permette alle radici di accedere ad acqua allo stato liquido e allo stesso tempo permette al sole di scaldare il terreno. Questi due condizioni sono necessarie per la ripresa vegetativa, insieme a dei cambiamenti ormonali nelle gemme indotti dalla temperatura. Anche le temperature medie del mese di marzo stanno seguendo il trend registrato su tutte le Alpi (Figura 38), vale a dire un innalzamento di 2 °C circa nell'ultimo secolo. Questa rapida crescita spiega come le temperature di marzo siano passate da fattore limitante per i larici ad inizio del XX secolo a fattore positivo dagli anni '70 ad oggi.

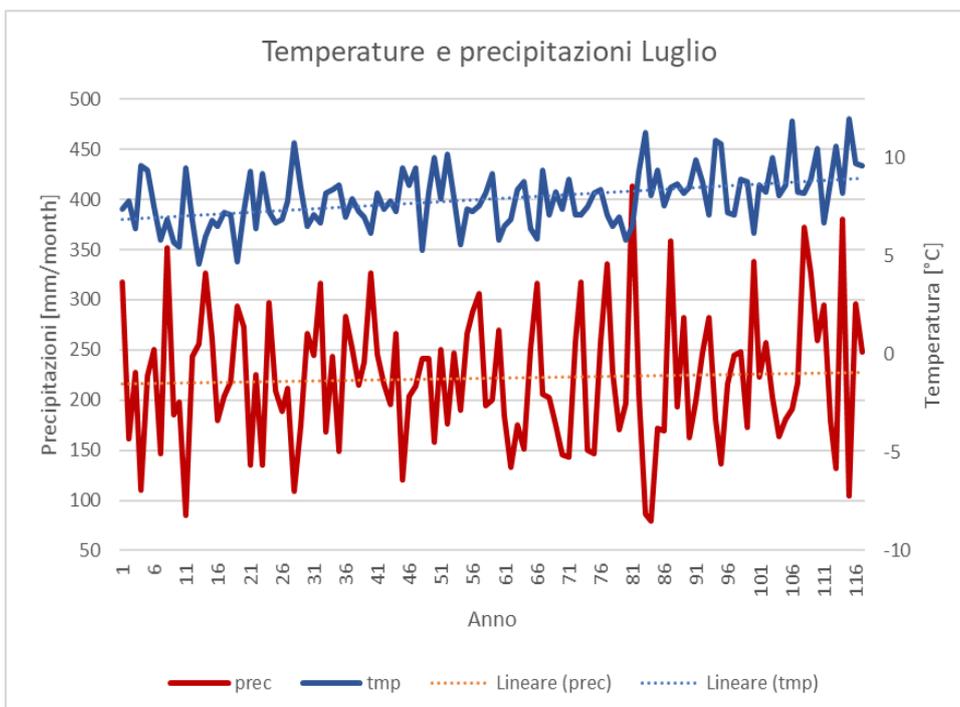


**Figura 38:** temperature medie di marzo

Sempre con le correlazioni mobili di Pearson si ottiene che le temperature di giugno e luglio stanno incidendo in modo sempre più negativo negli ultimi anni, in relazione al loro innalzamento (figure 39 e 40). Allo stesso modo si nota un cambiamento di tendenza dell'effetto delle precipitazioni in questi due mesi estivi, che diventano sempre più favorevoli allo sviluppo dei larici. Infatti temperature alte implicano una maggior evapotraspirazione con forti perdite di acqua sia del suolo che dei tessuti vegetali, che se non controbilanciate dalle precipitazioni piovose porterebbero a situazioni di stress per le piante. Inoltre le temperature più alte determinano un rapido scioglimento del manto nevoso, che funge da fonte principale di acqua durante la stagione estiva. È chiaro quindi come le precipitazioni di questi due mesi risultino favorevoli allo sviluppo delle piante. La relazione clima-accrescimento emersa da questo studio per le precipitazioni e le temperature per i mesi di giugno e luglio è stata riscontrata anche negli studi effettuati da Serre F. nel 1978 sulle Alpi Marittime francesi.



**Figura 39:** temperature e precipitazioni medie di giugno



**Figura 40:** temperature e precipitazioni medie di luglio

Nella ricostruzione climatica si nota subito come questa non segua il trend reale e tantomeno non raggiunga i picchi di massima e di minima. La spiegazione più semplice è quella che i larici in esame non vivano in condizioni particolarmente limitanti e che quindi non abbiano reagito in modo significativo ai cambiamenti climatici. Per spiegare ciò è utile introdurre la legge del minimo di Liebig, un principio ecologico che afferma

che quando la velocità di un processo è determinata da una serie di fattori separati essa è condizionata da quello più limitante. Perciò più aumentano i fattori limitanti e la loro intensità, più gli anelli mostrano una maggiore correlazione con i cambiamenti climatici. Quindi la risposta è tanto più precisa quanto più le piante sono al limite, di conseguenza si può giungere alla conclusione che le piante analizzate non vivano in condizioni particolarmente limitanti

In secondo luogo le cause della scarsa risposta dei larici ai cambiamenti climatici si potrebbero ricercare in imprecisioni durante le analisi, che anche se minime avrebbero alterato i risultati.

In conclusione allo studio si può affermare che nonostante in LARE si abbia una cronologia stazionale più lunga e la pianta più vecchia, il segnale climatico è stato registrato con meno precisione rispetto a FORA. Infatti il rumore dovuto a variabili non climatiche è più alto e la sensibilità più bassa.

Durante il lavoro di campionamento sul campo sono state incontrate delle difficoltà legate alla bassa qualità del legno di molte piante. Per questo motivo le piante studiate sono state circa un terzo di quelle campionate. I campioni più rovinati sono stati scartati in partenza, infatti riuscire a ricostruire una cronologia individuale a partire da un campione frazionato in molteplici parti avrebbe richiesto molto tempo, precisione ed esperienza.

Sono inoltre state necessarie molte correzioni durante la levigatura, in quanto le sezioni che non presentavano una superficie piana non venivano scansionate correttamente.

## **7. CONCLUSIONI**

Con questo studio si è cercato di datare i larici alla ricerca di alberi monumentali e di quantificare l'effetto dei cambiamenti climatici sul loro accrescimento.

Al termine della ricerca si sono datati con successo 23 larici, tra cui vanno segnalati due individui particolarmente interessanti: uno di oltre 300 anni di età e uno di 410 cm di circonferenza. Entrambi i larici non risultano essere alberi monumentali ma comunque

rimangono esemplari interessanti per dimensioni ed età. In particolare, il larice di circonferenza pari a 410 cm, è caratterizzato dalla presenza di un sorbo (*Sorbus* L.) sviluppatosi all'interno di una vecchia branca rotta posta a circa 2 m di altezza dal suolo. Questo particolare, insieme alle dimensioni, rendono la pianta unica.

Il secondo obiettivo dello studio era quello di quantificare l'effetto dei cambiamenti climatici sulla crescita dei larici. Fin dalle prime analisi è apparso chiaro quanto poco influisse il clima sulla crescita. Le cause sono difficili da attribuire con certezza, ma si possono sicuramente ipotizzare. Una prima causa, la più probabile, è data dal fatto che i larici campionati non crescano in condizioni particolarmente limitanti. Questa situazione, infatti, spiegherebbe come i cambiamenti climatici non abbiano portato a particolari reazioni delle piante in fatto di accrescimento. La scarsa risposta dei larici potrebbe anche essere stata data da possibili errori o imprecisioni commesse durante lo svolgimento del tirocinio. Inoltre, come dimostra lo studio di Carrer e Urbinati del 2004, si conferma che il segnale climatico è massimizzato negli alberi più vecchi, ma anche che una procedura di campionamento non stratificata per età potrebbe portare a cronologie medie distorte a causa della maggiore quantità di rumore presente in alberi più giovani.

In ogni caso si sono registrate delle piccole, ma significative risposte dei larici alla variazione di precipitazioni e temperature nel corso dell'ultimo secolo. In particolare sono risultate particolarmente rilevanti le temperature di marzo, che hanno influito positivamente sulla crescita dei larici. Infatti, nel caso di neve al suolo, le temperature più miti avrebbero contribuito al suo scioglimento, mentre nel caso di una copertura nevosa assente avrebbero avviato la pianta verso la ripresa vegetativa. In ogni caso l'effetto principale è una partenza anticipata della stagione vegetativa. Anche le temperature di ottobre, essendo aumentate mediamente di quasi 2 °C, hanno consentito alla pianta di prolungare la stagione vegetativa. Sempre a causa dell'innalzamento delle temperature medie, è apparso come le temperature estive siano diventate un fattore limitante per la crescita, in quanto aumentano l'evapotraspirazione. Allo stesso tempo, invece, le precipitazioni di giugno e luglio hanno sempre più un ruolo positivo per lo sviluppo dei larici. Infatti le precipitazioni di questi mesi risultano fondamentali per bilanciare l'acqua persa dal suolo e dalla pianta a causa delle alte temperature.

Queste dinamiche sono destinate a cambiare in futuro, proprio perché stiamo assistendo a dei cambiamenti climatici molto rapidi. Si è visto infatti come la sensibilità dei larici al clima è soggetta a variazioni nel tempo, con un anticipo progressivo della stagione vegetativa e una maggiore sensibilità a mesi in cui prima non lo era. In futuro, se il clima continuerà a seguire lo stesso trend attuale, i larici quasi sicuramente tenderanno a colonizzare i territori posti alle quote più alte, perdendo la competizione alle quote più basse.

Con il comune di Chiesa in Valmalenco (SO) si è stabilita una collaborazione per permettere di proseguire in futuro con studi di questo genere, al fine di valorizzare ulteriormente il territorio della Valmalenco. In questa direzione si è già pensato di creare un progetto per la valorizzazione degli alberi studiati grazie a dei nuovi percorsi turistici che evidenzino le particolarità culturali e naturalistiche della Val Malenco, con particolare riguardo ai larici e alla dendrocronologia. La progettazione di questi percorsi sarà ad opera dell'architetto paesaggista Matteo Carnelli e includerà anche dei pannelli illustrativi che guideranno l'escursionista durante la camminata.

## **8. BIBLIOGRAFIA**

Cambieri F., Catasta G., Montrasio A., Stella A., Garbarino M., Lingua E., Nagel T., Godone D., Motta R., Il ghiacciaio Ventina e il Sentiero Glaciologico Vittorio Sella

Carrer M., Urbinati C., (2004), Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*

Cerrato R., Cherubini P., Büntgen U., Coppola A., Salvatore M. C., Baroni C., (2019), tree-ring-based reconstruction of larch budmoth outbreaks in the Central Italian Alps since 1774 CE

Corona E., (1990), incostanza del Clima: fluttuazioni pregresse. In Susmel L.: Principi di Ecologia. Ed. Cluep, Padova: 356-362

Beniston M., Keller F., Koffi B., Goyette S., (2003), Estimates of snow accumulation and Volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions. Theoretical and Applied Climatology

Bernetti G (2007b). Riscaldamento dell'atmosfera e fasce di vegetazione. In: "Botanica e Selvicoltura". Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, Italy, pp. 121-125.

Blasi C (2010). La vegetazione d'Italia. Palombi Editore, Roma, Italy, pp. 539

Bosello F., Marazzi L., Nunes P. A. L. D., (2007), le alpi italiane e il cambiamento climatico: elementi di vulnerabilità ambientale ed economica e possibili strategie di adattamento

Brunetti M., Maugeri M., Monti F., Nanni T., (2006), temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series

Di Filippo A., Piovesan G., Baliva M., Presutti Saba E., Barbieri A., Di Fiore L., (2016), ricerche dendroecologiche nel Parco Nazionale delle foreste casentinesi, monte Falterona e Campigna

Di Pasquale G., Cona F., Buonincontri M., D'Auria A., corso di tecnologia del legno e dendrocronologia (Uni Napoli)

Hansen J., Sato M., Ruedy R., Lo K., Lea D. W., Medina-Elizade M., (2006), global temperature change

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, (2018), Special report: Global Warming of 1.5 °C

Le Roy Ladurie E., (1967), Histoire du climat depuis l'an mil, Flammarion, p. 367

Leonelli G., Battipaglia G., Cherubini P., Saurer M., Siegwolf R. T. W., Maugeri M., Stenni B., Fusco S., Maggia V., Pelfini M., (2017), *Larix decidua*  $\delta^{18}\text{O}$  tree-ring cellulose mainly reflects the isotopic signature of winter snow in a high-altitude glacial valley of the European Alps

LIFEGATE, (2019), Cosa sono i cambiamenti climatici, cause e conseguenze, <https://www.lifegate.it/persone/news/cambiamenti-climatici-cause-conseguenze>

Nola P., (1996), le serie dendrocronologiche la ricostruzione del clima del passato

Pezzo M. I., Dorigatti S., (1999), studi dendrocronologici in Italia: un aggiornamento

Pignatti G., (2010), la vegetazione forestale di fronte ad alcuni scenari di cambiamento climatico in Italia

Redazione QualEnergia.it, (2019), Clima, sempre più CO<sub>2</sub>: a luglio 2019 siamo a 414 ppm, <https://www.qualenergia.it/articoli/clima-sempre-piu-co2-a-luglio-2019-siamo-a-414-ppm/>

Romano D., Arcarese C., Bernetti A., Caputo A., Contaldi M., Cordella M., De Lauretis R., Di Cristofaro E., Federici S., Gagna A., Gonella B., Moricci F., Taurino E., Vitullo M., (2019), Greenhouse gas inventory 1990-2017, ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)

Merlino A., Schirone B., Piovesan G., Mercurio R., (2016), il faggio (*Fagus sylvatica* L.) al limite meridionale dell'areale: studi dendroecologici sul monte Etna e monti Peloritani

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, <https://www.climate.gov/>

Scotti R., Galluccio A., (2008), Lombard Glaciers face the climate change (XX-XXI centuries)

Serre, F. 1978. The dendroclimatic value of the European larch (*Larix decidua*) in the French Alps. Tree-Ring Bulletin

Sessione della Conferenza delle Alpi, (2009), piano d'azione sul cambiamento climatico nelle alpi

Schröter D., Cramer W., Leemans R., Prentice C., Araújo M. B., Arnell N. W., Bondeau A., Bugmann H., Carter T. R., Gracia C. A., de la Vega-Leinert A. C., Erhard M., Ewert F., Glendining M., House J. I., Kankaanpää S., Klein R. J. T., Lavorel S., Lindner M., Metzger M. J., Meyer J., Mitchel T. D., Reginster I., Rounsevell M., Sabaté S., Sitch S., Smith B., Smith J., Smith P., Sykes M. T., Thonicke K., Thuiller W., Tuck G., Zaehle S., Zierl B., (2005), Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe

Swetnam T. W., Allen C. D., Betancourt J., (1999), applied historical ecology: using the past to manage for the future

Weber P., Bugmann H., Rigling A., (2007), Radial growth responses to drought of *Pinus sylvestris* and *Quercus pubescens* in an inner-Alpine dry valley

Zebisch M., Tappeiner U., Elmi M., Hoffmann C., Niedrist G., Pedoth L., Pinzger S., Pistocchi A., Tasser E., (2012), klima report (CIPRA - Commissione Internazionale per la PRrotezione delle Alpi)

Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Huber J., Barandun M., Machguth H., Nussbaumer S. U., Gärtner-Roer I., Thomson L., Paul F., Maussion F., Kutuzov S., Cogley J. G., (2019), Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016

Żywiec M., Muter E., Zielonka T., Delibes M., Calvo G., Fedriani J. M., (2017), Long-term effect of temperature and precipitation on radial growth in a threatened thermo-Mediterranean tree population