



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE E FORESTALI (DAFNE)

Corso di Dottorato di Ricerca in

Scienze e Tecnologie per la Gestione Forestale e Ambientale XXVIII Ciclo

**IL FAGGIO (*Fagus sylvatica* L.) AL LIMITE MERIDIONALE DELL'AREALE: STUDI
DENDROECOLOGICI SUL MONTE ETNA E MONTI PELORITANI**

(s.s.d. AGR/05)

Tesi di dottorato di:

Dott. MERLINO ANGELO

Coordinatore del corso

Prof. BARTOLOMEO SCHIRONE

Firma

Tutore

Prof. GIANLUCA PIOVESAN

Firma

Co-tutore

Prof. ROBERTO MERCURIO

Firma.....

Data della discussione

28/06/2016

Abstract

La ricerca ha cercato di comprendere, attraverso le analisi dendroecologiche, la crescita del faggio (*Fagus sylvatica* L.) in Sicilia. Infatti i siti indagati si trovano sull'Etna e sui Peloritani e sono stati scelti anche in base alle loro caratteristiche stazionali e di esposizione. Trovandosi in stazioni poste al limite dell'areale meridionale di distribuzione, si è cercato di capire come questa specie risponde all'attuale fase di riscaldamento globale. I risultati ottenuti sono stati quelli di aver misurato, attraverso il BAI (*Basal Area Increment*), la crescita del faggio a queste latitudini e l'aver dimostrato una certa specificità nella risposta ecologia delle faggete siciliane al cambiamento climatico. Lo studio ha dimostrato infatti che le faggete siciliane hanno anticipato tutti i processi fisiologici al mese di maggio, al fine di poter contrastare meglio i fenomeni siccitosi che si sono sempre più accentuati negli ultimi tempi, confermando il ruolo di sentinella ecologica che questa specie svolge in questi ecosistemi. Analizzando i trend di crescita con l'utilizzo di particolari indici che misurano i livelli di siccità (SPI – *Standardized Precipitation Index*) invece si è notato che è in atto un preoccupante declino sincronizzato alle crescenti condizioni di stress idrico. Queste situazioni si ritrovano soprattutto in popolazioni poste in situazioni limite altitudinali e/o latitudinali, in accordo con altri studi simili effettuati intorno al Bacino del Mediterraneo.

Parole chiave: *Fagus sylvatica*, Etna, Malabotta, BAI, Dendroecologia, Sicilia, SPI, Bacino del Mediterraneo

Abstract

The purpose of this research was to understand, through dendroecological analysis, beech (*Fagus sylvatica* L.) growth in Sicily (Italy). The investigated sites are located on Mount Etna and Peloritani and were chosen based on their particular stational characteristics. The research plots are situated at the southern limit of its distributional area and we tried to understand how this species responds to the current phase of global warming. The results obtained through calculation of BAI (*Basal Area Increment*), shows that beech growth at these latitudes have a certain specificity in ecological response to climate change. The study has shown that the Sicilian beech woods anticipated all physiological processes in the month of May of the growing season, in order to better contrast the drought periods which have become more marked in recent times. Analyzing the growth trend, using specific drought indices (SPI - *Standardized Precipitation Index*), it was noted that there is an ongoing worrying decline synchronized to the increase of water stress. These conditions were found mostly in sites placed in altitudinal and/or latitudinal limits, in agreement with other similar studies carried around the Mediterranean Basin, confirming beech's role of ecological sentinel that plays in these ecosystems.

Keywords: *Fagus sylvatica*, Mount Etna, Mount Malabotta, BAI, Dendroecology, Sicily, SPI, Mediterranean Basin

*... Li circuli delli rami
degli alberi segati
mostrano il numero dei suoi anni,
e quali furono più umidi e più secchi
secondo la maggiore e minore loro grossezza.
E così mostrano gli aspetti del mondo
dov'essi erano volti; poiché più grossi
sono a settentrione che a meridio;
e così il centro dell'albero
per tale causa è più vicino
alla scorza sua meridionale
che alla scorza settentrionale.*

*"Trattato di pittura"
Leonardo da Vinci
(1452-1519)*

SOMMARIO

INTRODUZIONE	6
ASPETTI METODOLOGICI	7
<i>La rete dendrocronologica nazionale</i>	7
<i>Localizzazione</i>	7
<i>Descrizione dei siti d'indagine</i>	10
<i>Il campionamento e la costruzione delle curve dendrocronologiche</i>	14
<i>L'Analisi auxologica</i>	15
<i>Il processo di standardizzazione</i>	16
<i>Analisi multidimensionale</i>	17
<i>Relazioni clima – crescita</i>	18
<i>Analisi della variazione di crescita a scala decennale</i>	20
RISULTATI	21
DISCUSSIONE	47
CONCLUSIONI	52
BIBLIOGRAFIA	53
RINGRAZIAMENTI	60
APPENDICI	61

1. Introduzione

Scopo di questo studio è stato la caratterizzazione delle dinamiche di crescita con particolare riferimento all'influenza dei fattori climatici in ecosistemi residuali di faggeta (*Fagus sylvatica*, L.) in Sicilia. Questi boschi si trovano al limite meridionale del loro areale di distribuzione, e approfondire gli studi dendroecologici in questi contesti di frontiera ecologica nell'attuale fase di *global warming* rappresenta un tema di elevato interesse per la comunità scientifica con applicazioni dirette nel campo della conservazione della natura. L'isola infatti, per la sua posizione geografica, riveste un ruolo chiave per comprendere l'ecologia mediterranea con particolare riferimento agli scenari prefigurati dall' IPCC (2014) i quali prevedono che cambiamenti climatici significativi potrebbero determinare la scomparsa di specie che si trovano al limite meridionale del loro areale. In effetti, impatti consistenti dovuti al cambiamento climatico sulla biodiversità delle biocenosi forestali sono ipotizzabili soprattutto nelle zone mediterranee (Resco De Dios et al. 2007; Chen et al. 2015).

In questo contesto, la dendrocronologia ovvero *la scienza che si occupa della collocazione temporale degli anelli annuali d'accrescimento delle piante arboree* (Fritts 1976), rappresenta un valido supporto per lo studio dell'ecologia delle specie. Tra i molteplici aspetti fornisce, infatti, numerosi spunti che permettono di individuare l'impatto delle variazioni climatiche e la frequenza degli eventi di disturbo sulle serie di anelli legnosi.

La metodologia dendrocronologica partendo da una datazione degli anelli di accrescimento, permette dettagliate indagini in campo ecologico (dendroecologia) (Fritts 1976).

La misura dell'ampiezza degli anelli di crescita formati dal cambio cribro-vascolare degli alberi nel corso degli anni, rappresenta così un codice che, se ben decifrato, può raccontare la storia dell'albero, della foresta in cui esso vive nonché delle variazioni climatiche che può avere registrato (Swetnam et al. 1999).

Le indagini climatiche a fini forestali hanno spesso come scopo quello di valutare le esigenze delle diverse specie definendo in termini quantitativi il contesto ambientale che ne permette la vegetazione anche con riferimento anche alle limitazioni imposte dal clima (Mariani & Failla 2007). Uno dei principi fondamentali della dendrocronologia è rappresentato proprio dal concetto di "fattore limitante" (Fritts & Swetnam 1989). Tale fattore influenza gli accrescimenti anulari delle sequenze cronologiche e ne determina la sincronizzazione.

L'approccio dendroecologico si propone di isolare in una serie dendrocronologica l'informazione desiderata per studiare l'effetto dei fattori ambientali sulle dimensioni degli anelli legnosi. Per il bacino del Mediterraneo esistono molti studi riguardanti la dendroecologia

del faggio (Gutiérrez 1988; Biondi 1992; Biondi 1993; Biondi and Visani 1996; Penuelas & Boada 2003; Lebourgeois et al. 2005; Piovesan et al. 2005; Schirone et al. 2005; Jump et al. 2006; Di Filippo et al. 2007; Resco De Dios et al. 2007; Piovesan et al. 2008b; Maxime & Hendrik 2011; Lebourgeois et al. 2012; Pasho et al. 2012; Weber et al. 2013; Rita et al. 2014; Tegel et al. 2014; Martinez Del Castillo et al. 2016) e lo scopo della presente tesi è stato quello di approfondire la dendroclimatologia del faggio in Sicilia, verificandone la stabilità nelle risposte climatiche e comparandolo ad altre faggete della penisola italiana caratterizzate da strutture diversificate. Infine si è cercato di analizzare come i trend di crescita di queste formazioni forestali variano in relazione ai principali fattori climatici limitanti.

2. *Aspetti metodologici*

2.1 *La rete dendrocronologica nazionale*

Questo lavoro si inserisce nel contesto di una rete di studio dendrocronologica italiana iniziata da Biondi (1992) alla fine degli anni 80 e proseguita nei successivi anni ad opera di diversi ricercatori del DendrologyLab (Di Filippo 2002; Di Filippo et al. 2003; Piovesan et al. 2005; Di Filippo et al. 2007; Piovesan et al. 2008; Alessandrini et al. 2011) e di cui la maggior dei campioni vanno a formare la Banca Dati del Laboratorio di Dendrologia (www.unitus.it/dendro) dell'Università degli Studi della Tuscia.

2.2 *Localizzazione*

Il Faggio (*Fagus sylvatica* L.) è una specie caducifoglie ampiamente distribuita in tutta Europa (Fig. 1). Si ritrovano infatti a Nord dalla Scandinavia e Isole Britanniche, alla Polonia

e penisola balcanica centralmente fino a giungere al sud Europa, nelle sue posizioni più meridionali in Grecia, Italia e Spagna (Jalas & Suominen 1973).

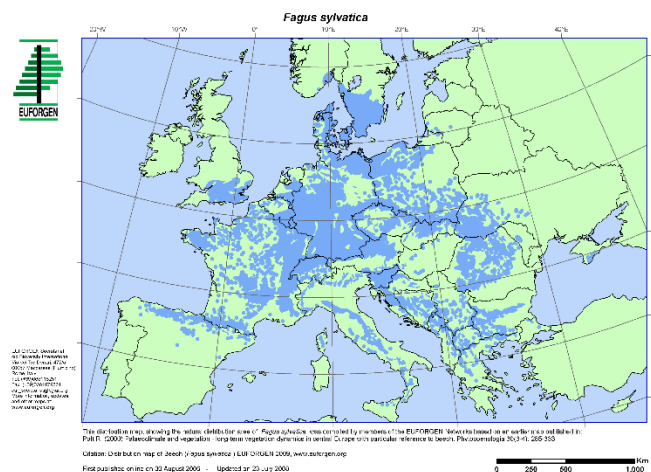


Figura 1 - Mappa di distribuzione del faggio in Europa (Fonte: EUFORGEN)

Hofmann (1960,1991) descrive ecologicamente il faggio come una specie che preferisce climi oceanici, con livelli di piovosità attestati sui 1000 mm (o superiori), e soprattutto una specie molto sensibile alle gelate tardive.

Il faggio in Sicilia costituisce una significativa testimonianza dei rifuggi glaciali e, per certi aspetti, si può considerare come il prolungamento o l'ultima propaggine dei boschi che caratterizzano la dorsale dell'Appennino, delle Alpi fino ad arrivare alle pianure dell'Europa centrale, dove questa specie si estende con una grandiosità insuperabile. In considerazione delle particolari esigenze climatiche, i boschi di faggio nell'isola sono localizzati soltanto sui principali sistemi montuosi e, soprattutto, sui Nebrodi, sulle Madonie, sull'Etna, sui Peloritani (Bosco di Malabotta) e, marginalmente, in provincia di Enna (Bosco della Giumenta e Monte Sambughetti) (Hoffman 1960).

Le foreste di faggio in Sicilia in generale e dell'Etna in particolare, si trovano al limite meridionale di tutta l'area di distribuzione europea della specie e per questo costituiscono un elemento vegetazionale di elevato significato ecologico, genetico e paesaggistico. La peculiarità delle faggete della Sicilia è legata alla possibilità che queste hanno avuto di evolversi in maniera indipendente durante le fasi fredde del Würmiano, tali da costituire un gruppo ben differenziato sia come biodiversità sia come sinecologia (Pignatti 1999). Il faggio si è rifugiato nelle stazioni più umide e fresche nei versanti nord occidentali e orientali del vulcano a quote comprese tra 1400 e 1800-2000 m. Sull'Etna raggiunge il suo limite inferiore a 800 m di quota nella vallone S.Giacomo (Poli et al. 1979) spingendosi in alto fino al limite della vegetazione forestale (2250 m) (Poli Marchese & Patti 2000; Castorina et al. 2005). Strutturalmente, i boschi

di faggio sull'Etna sono molto diversificati e frammentati rispetto alla propria tendenza naturale. Questo è dovuto a diversi motivi che sono legati principalmente all'azione antropica (taglio, pascolo, incendi), ma possono essere anche naturali (colate laviche) ed ecologici (viene sostituito dalla betulla nelle stazioni meno mesofile e dal pino laricio in quelle più xeriche) (Poli Marchese 1982; Mercurio & Spampinato 2008).

Tutti i siti oggetto dello studio sono distribuiti lungo un range altitudinale che varia da 1400-1600 m s.l.m. sull'Etna e 1100-1300 m s.l.m. sui Peloritani (Tab. 1).

Tabella 1 – Dati stazionali dei siti d'indagine - * Proiezione UTM Fuso 33 – Sistema di Riferimento WGS84

Sito	Codice	Lat N*	Lon E*	Specie	Quota (m s.l.m.)	Esposizione	Pendenza (%)	DBH (cm)	H (m)
M.te S.Maria (Etna)	SMA	497795	4186421	<i>F.sylvatica</i>	1468-1509	N	20	43	17
M.te Spagnolo (Etna)	SPA	496846	4186800	<i>F.sylvatica</i>	1401-1415	N	15	44	18
P. del Vescovo (Etna)	VES	503931	4172593	<i>F.sylvatica</i>	1467-1574	S	7	42	20
Malabotta (Peloritani)	MAL	504160	4200700	<i>F.sylvatica</i>	1159-1265	N-W	50	56	25

Per la caratterizzazione climatica si è fatto riferimento ai dati termo pluviometrici relativi alle stazioni di Moltalbano Elicona (1250 m s.l.m.) per il sito di MAL, la stazione di Randazzo (680 m s.l.m.) per i siti SMA e SPA ed infine la stazione di Pedara (803 m s.l.m.) per VES. I dati sono stati reperiti presso la Regione Siciliana – Assessorato Dell' Energia E Dei Servizi Di Pubblica Utilità – Dipartimento Dell' Acqua E Dei Rifiuti – Osservatorio Delle Acque per il periodo intercorso tra il 1957 ed il 2001 che, dal 2002 è stato sostituito dal SIAS (Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano) della Regione Siciliana – Assessorato Risorse Agricole E Alimentari – Dipartimento Interventi Infrastrutturali. Elaborando i dati termici e delle precipitazioni, si è proceduto alla costruzione del climogramma di Walter & Lieth (1960) relativo alla stazione di Petralia Sottana mediante l'utilizzo del package CLIMATOL (Guijarro 2011) del software R (R Development Core Team 2009).

2.3 Descrizione dei siti d'indagine

I siti indagati si trovano in Sicilia. SPA, SMA e VES ricadono all'interno del territorio del Parco Regionale dell'Etna mentre MAL si trova sui monti Peloritani a confine con l'inizio della catena montuosa dei Nebrodi (Fig. 2).

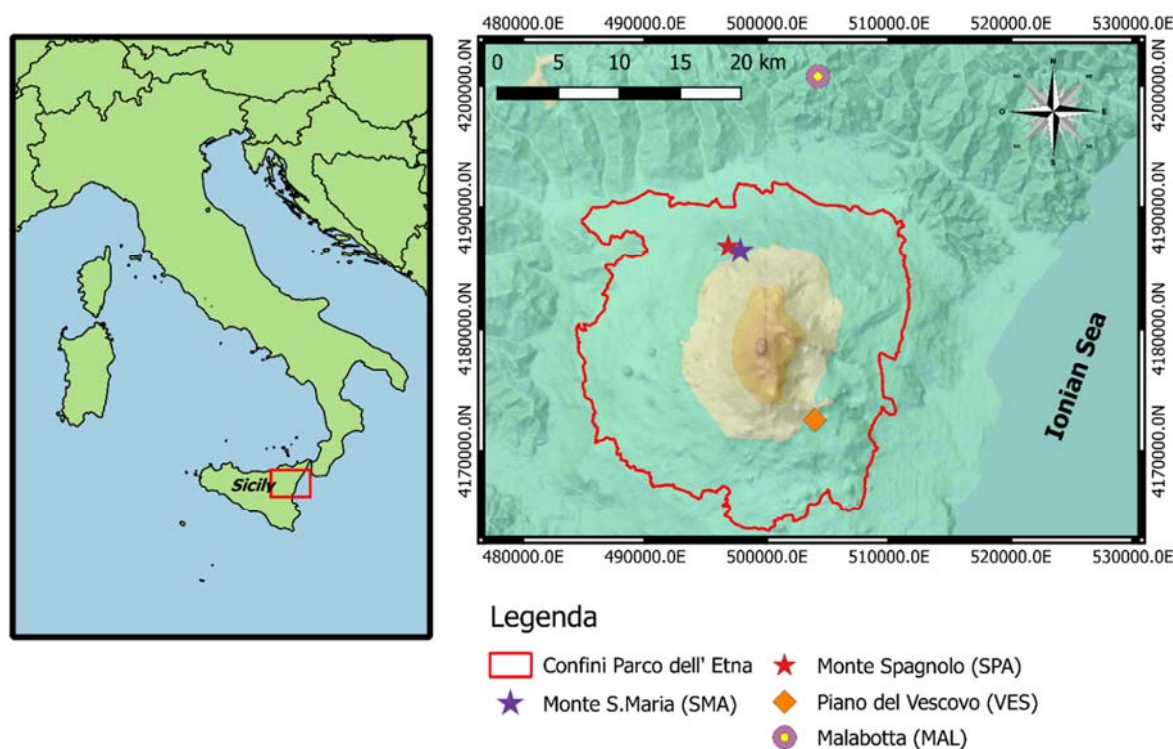


Figura 2 - Inquadramento territoriale dei siti d'indagine (Proiezione UTM Fuso 33 – Sistema di Riferimento WGS84)

I siti di SPA e SMA si trovano sullo stesso versante nord dell'Etna, su due rilievi montuosi che ne danno la denominazione, non molto distanti l'uno dall'altro e probabilmente derivati dalle attività parossistiche del vulcano. Con molta probabilità originariamente facevano parte di un unico sistema forestale, fin quando degli eventi eruttivi risalenti al 1614 -1624 (della durata di 10 anni consecutivi) ed al 1981 (Branca & Del Carlo, 2005) li hanno divisi in due cosiddette “*dagale*” (singolare di dagala che significa isola in arabo). Si tratta di isole di terreno più antico rispetto alle sciare (lave solidificate) circostante (Fig. 3).

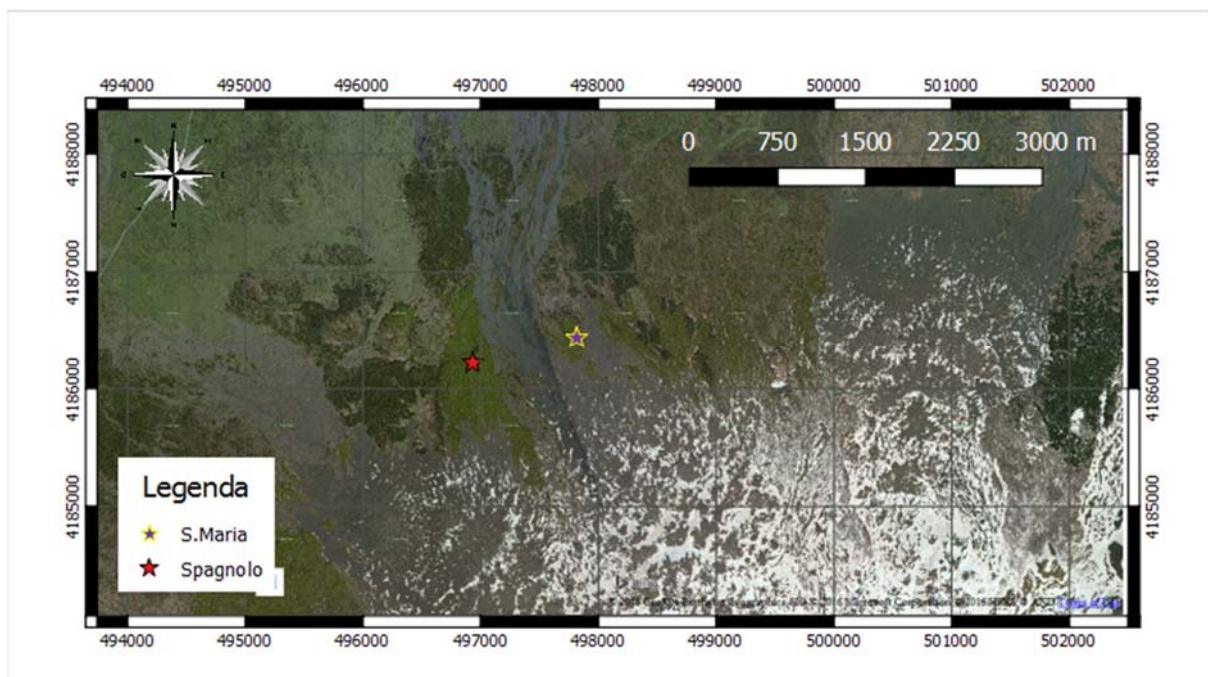


Figura 3 - Inquadramento delle “dagale” di Monte Spagnolo (SPA) e di Monte S.Maria (SMA). Fonte fotografica: foto aeree Bing© Maps2016

Scuderi (1825) nel “Trattato dei boschi dell’Etna” riporta notizie di uno di questi eventi, facendone una descrizione attenta e precisa che viene riportata di seguito:

“Il dì 2 luglio 1614, dopo molte scosse si aprì una voragine, e molte laterali ad essa a tramontana sopra Randazzo. La lava unita in una sola corrente coprì la contrada del Piro, oggi detta di Pilao, distruggendo vigne, e tutto quasi il bosco della Faghita, o bosco di Faggi. Si conservano a Randazzo delle memorie scritte in quel tempo nello quali si dice che, si bruciarono molti alberi, e faggi, e la lava corse dieci miglia; ha corso sino a ora che è l’anno 1624.”

Sempre lo stesso autore riporta anche l’utilizzo che del faggio ne facevano le popolazioni locali. Infatti scriveva che *“Noi non ne tiriam tuttavia quel vero utile, che ne potremmo. Tranne l’uso, che facciam del legno per pochi mobili, e massime per utensili da villa, e per gioghi di aratri, lasciamo il rimanente come inutile.”*

Durante l’800 e fino ai primi anni del 1900, invece tutta quella zona è utilizzata per attività di produzione del carbone (Vincenzo Crimi, 2016 *in verbis*). Gli interventi selvicolturali hanno avuto sempre carattere episodico (nel tempo e nello spazio) e irrazionale. Questa situazione ha portato Hoffman (1960) ad affermare che *“hanno più danneggiato che valorizzato il patrimonio boschivo”*. L’avvento del Demanio forestale della Regione Siciliana (risalente agli anni ‘50 del 1900) e l’istituzione del parco nazionale nel 1983 hanno, praticamente, fatto cessare ogni tipo di attività *“vincolando”* definitivamente le zone.

Strutturalmente si riscontrano due piani, di cui quello dominante è formato da piante derivanti da rinnovazione naturale e vecchi polloni ormai affrancati, mentre su un piano dominato si possono ancora notare vecchie ceppaie mature, derivanti probabilmente dalle ultime attività antropiche avvenute in quei contesti. Marginalmente ai due siti è presente un rimboschimento di pino calabro (*Pinus nigra* Arnold. ssp. *Calabrica* (Land.) E.Murray) realizzato dall'azienda foreste demaniali della Regione Siciliana nei primi anni '50 del secolo scorso.

Il sito di VES si trova nel versante Sud - Orientale dell'Etna. È ubicato all'interno di due impluvi formati dall'incontro di due valloni: il "Vallone Cava Mangano" (o del Tripodo) ed il "Vallone Zappini". La particolare ubicazione nel contesto del massiccio etneo fa sì che Hoffman (1960) consideri questa zona come la migliore nel territorio di Zafferana Etnaea, poiché le particolari condizioni createsi permettono al faggio di superare agevolmente il periodo di aridità estiva. Strutturalmente presenta un unico piano dominante di faggio, mentre sul piano dominato possono riscontrarsi castagno, sorbo, acero montano. Il piano dominante si presenta come un ceduo maturo, diretta evoluzione dell'ultima utilizzazione risalente al 1945 (Hoffman 1960).

Il Bosco di Malabotta (MAL) (Fig. 2), ricade all'interno del Comune di Montalbano Elicona, in Provincia di Messina. Si trova all'interno dell'omonima riserva naturale Istituita dal Piano Regionale, con D.A. 477 del 25/7/97 ed attualmente affidato in gestione al Dipartimento Regionale dello Sviluppo Rurale e Territoriale della Sicilia. Il bosco nel suo complesso si estende per circa 80 ha. La faggeta in questione rappresenta un biotopo di particolare interesse essendo stazione eterotopica. Infatti, il faggio vegeta ad una quota inferiore rispetto alla parte sommitale del bosco (che raggiunge i 1200 M s.l.m. circa) in cui si ritrova il cerro (*Q. cerris* L.). La particolare conformazione dei luoghi e le particolari condizioni climatiche che si creano in questa stazione, fanno sì che il faggio si sostituisca alla vegetazione che normalmente si ritrova a quelle quote.

Infatti, soprattutto i versanti esposti a settentrione, sono soggetti a correnti umide (sotto forma di nebbie) provenienti dal mar Tirreno che, risalendo contribuiscono ad accrescere l'apporto idrico sotto forma di precipitazioni occulte.

Nel complesso la faggeta di Malabotta presenta una struttura tipica della fustaia disetanea, con piante anche di notevoli dimensioni che occupano il piano dominante. Si cominciano inoltre a notare l'apertura di buche nella volta arborea causate dalla morte di alberi dominanti, questo permette alla rinnovazione di insediarsi.

L'analisi del climatica mostra che tipicamente si tratta di un clima tipicamente mediterraneo (Figura 4), in cui la piovosità media annua massima (periodo 1957-2013) si raggiunge nella stazione di Montalbano Elicona (MAL), co un apporto idrico di 1069 mm. Le stazioni etnee di Randazzo (SPA & MAL) vanno rispettivamente da 978 a 752 mm circa. Le temperature medie annue minori, nonostante la quota inferiore si riscontrano a MAL (11 °C), mentre sono simili sull'Etna (15.3 °C per Randazzo e 14.4 °C per Pedara). Il periodo di aridità estiva maggiore risulta a VES, sicuramente dovuto al fatto di avere un'esposizione meridionale.

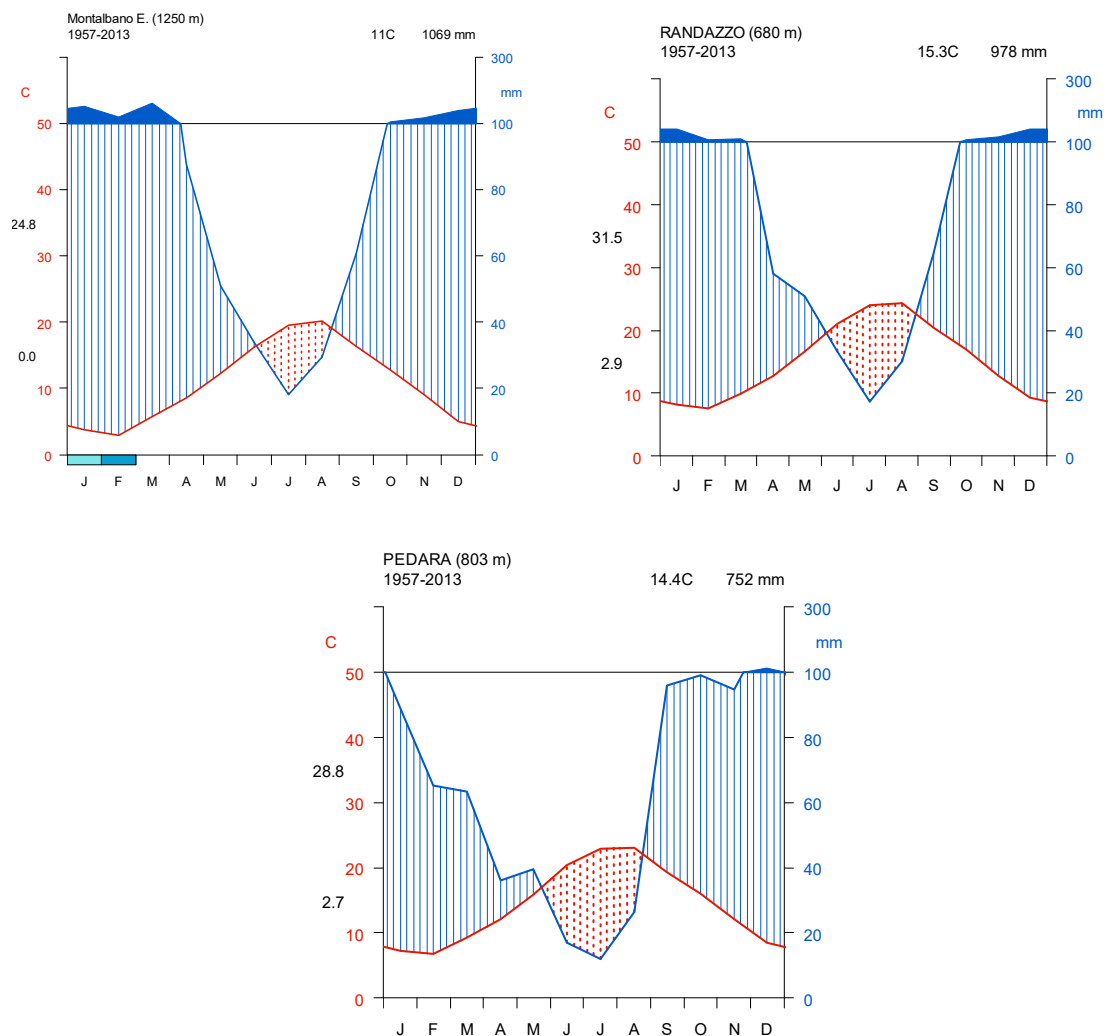


Figura 4 – Climogrammi realizzati secondo secondo Walter e Lieth (1960) relativi ai siti di studio. La linea continua in rosso e la linea continua blu indicano rispettivamente le serie temporali di temperatura e precipitazioni. L'area punteggiata al centro indica il periodo di aridità estivo. I rettangoli blu sull'asse x mostrano i mesi nei quali è probabile il verificarsi di gelate mentre le aree blu poste oltre la soglia superiore (oltre i 100 mm) rappresentano il periodo in cui è stato presente un surplus idrico.

Bioclimaticamente, tutti i siti rientrano nella fascia montana descritta da Piovesan et al. (2005a) (Fig. 19)

2.4 Il campionamento e la costruzione delle curve dendrocronologiche

I campioni utilizzati per le analisi dendrocronologiche sono rappresentati da carote estratte trasversalmente alla linea di massima pendenza con la trivella di Pressler ad un'altezza del fusto di 1.30 m (nella parte centrale del fusto, evitando le parti difettose) fino ad arrivare al centro della pianta. Ogni carota è stata alloggiata in un supporto di legno in modo tale che le fibre fossero perpendicolari al piano di lettura. Le carote sono state scarificate in senso trasversale utilizzando un bisturi e gli anelli evidenziati utilizzando acqua e gesso. Le cronologie sono state sviluppate utilizzando le procedure dendrocronologiche standard (Stokes & Smiley 1968). Gli accrescimenti anulari sono stati misurati con l'approssimazione di 0,01 millimetri mediante uno stereo microscopio con il sistema CCTRMD (*Computer Controlled Tree-ring Measurement Device*) di Aniol (1987) interfacciato ad un computer, attraverso il software CATRAS (Aniol 1983). Da ciascun campione è stata sviluppata una **serie dendrocronologica singola** o **cronologia elementare** rappresentativa di ogni albero campionato (Appendici). 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-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 dal software CATRAS e nello specifico dal coefficiente t di Student relativo al confronto fra due o più cronologie e l'indice di coincidenza G .

Il coefficiente t di Student è espresso secondo la seguente formula:

$$t = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

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.

Il coefficiente G (o *Gleichläufigkeit* dalla letteratura tedesca) è espresso dalla formula:

$$G_{(x,y)} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |G_{ix} + G_{iy}|$$

dove G_i deriva dalla misura dell'incremento di crescita nelle due piante messe a confronto considerando, ad esempio per la serie x , la formula $\Delta_{ix} = (x_{i+1} - x_i)$, per cui si ha che:

per $\Delta_i > 0$, $G_i = 1/2$

per $\Delta_i = 0$, $G_i = 0$,

per $\Delta_i < 0$, $G_i = -1/2$.

In pratica viene confrontata la concordanza percentuale nel segno, positivo o negativo, dell'incremento annuale. Quando due cronologie a confronto hanno un andamento parallelo per molti anni, si può assumere che i fattori che influenzano la crescita sono stati simili in entrambi i casi.

Un'ulteriore verifica della sincronizzazione si è fatta attraverso l'analisi statistica realizzata per mezzo del software COFECHA (Holmes 1983). Un ulteriore confronto fra le diverse stazioni campionate è stato realizzato comparando i valori medi con il campo di variazione dei parametri statistici che sono in grado di descrivere in maniera sintetica le caratteristiche della crescita radiale in ogni popolamento. Questi sono il:

- MW = valore medio di ampiezza anulare;
- SD = deviazione standard;
- A_1 = coefficiente di autocorrelazione di primo ordine. Questo ci esprime la correlazione tra l'anello dell'anno n e quello dell'anno $n - 1$ e misura l'inerzia di accrescimento della pianta dovuta alla dipendenza dell'accrescimento attuale da quello dell'anno precedente;
- MS = sensitività media definita come la variazione percentuale di crescita tra due anelli consecutivi che indica la capacità della pianta a reagire a stimoli climatici di breve periodo con immediate variazioni incrementali.

2.5 L'Analisi auxologica

Per poter stimare al meglio la produttività dei popolamenti si è calcolato l'incremento di area basimetrica (BAI, *Basal Area Increment* nella terminologia anglosassone). Questo rappresenta la superficie della corona circolare apposta annualmente nel fusto in sezione trasversale. Tale indicatore rappresenta quindi il migliore indicatore della produttività, in quanto non indica solamente lo sviluppo in senso radiale, ma su tutta la circonferenza della pianta. Il calcolo del BAI è stato fatto attraverso l'uso di uno specifico pacchetto denominato "dplR" (Bunn 2008) in ambiente R (R Development Core Team 2009). Preliminarmente, al fine di correggere eventuali errori di cavallettamento derivanti dall'eccentricità dei fusti, le singole ampiezze anulari misurate sono state corrette con un coefficiente di correzione (CC). Quest'ultimo è stato ottenuto dal rapporto tra il diametro cavallettato (DBH) e il diametro calcolato attraverso la somma delle singole ampiezze anulari convertite in cm secondo la seguente formulazione:

$$CC = \frac{DBH}{RW_c}$$

dove:

DBH = Diameter Breast Height (o diametro misurato);

$RW_c = \sum_i^n rw * 0.002$

Le serie di ampiezza anulare (RW) sono state infine trasformate in serie di Incremento di Area Basimetrica (BAI) espresso in $\text{cm}^2 \text{ anno}^{-1}$.

Il BAI è stato calcolato sia sulle singole piante e quindi mediato per studiarne la variazione a livello di intero popolamento. Il BAI di ogni singola stazione è stato calcolato facendo la media dei singoli BAI anno per anno a partire dal momento in cui partecipavano alla media almeno un minimo di 10 individui (Appendici).

I valori medi di BAI di ciascuna carota legnosa, per ciascuna stazione, sono stati messi in relazione con i relativi diametri e le età calcolate (utilizzando solo quelle carote che raggiungevano il midollo) per verificare l'eventuale esistenza di correlazione. Inoltre, dalle serie di BAI dei singoli campioni analizzati è stato possibile ricostruire delle serie storiche di incremento diametrico. Cumulando le diverse serie di BAI si sono potute ricavare le curve dell'incremento medio e corrente per i diversi popolamenti.

2.6 Il processo di standardizzazione

Ogni cronologia elementare di crescita anulare (RW) e di BAI è stata dapprima standardizzata mediante interpolazione di una curva *spline* con periodo di 50 anni tramite il package “*detrendR*” (Campelo et al. 2012) allo scopo di rimuovere la variabilità di lungo periodo legata al trend biologico/crescita, dovuto all'età ed alle dimensioni della pianta. Questo metodo si adatta meglio di funzioni matematiche classiche (retta o esponenziale negativa), a rappresentare trend di crescita di piante tolleranti l'ombra (Piovesan et al. 2008b). Questo processo di standardizzazione trasforma ogni cronologia elementare in serie indicizzate (standardizzate) prive di trend di lungo periodo e con media uguale a 1. Le singole serie standardizzate vanno a formare una cronologia stazionale standardizzata (Appendici). La qualità del segnale racchiuso in questa cronologia viene valutata per mezzo della sua sensitività media (MS), che esprime la variabilità di alta frequenza posseduta in comune dalle serie. Un ulteriore indicatore, l'RBAR (Wigley et al. 1984; Briffa 1995) indica il livello di correlazione media esistente tra le serie di uno stesso sito d'indagine. La qualità della cronologia è stata valutata inoltre utilizzando il parametro dell'EPS (*Expressed Population Signal*) (Wigley et al. 1984). L'EPS fornisce una stima indicativa dell'affidabilità della cronologia quantificando la

variabilità comune in tutte le serie anulari di un particolare sito (Gentilesca & Todaro 2008). La soglia minima per considerare valide le cronologie è pari a 0.85.

Ad ogni cronologia standardizzata è stata rimossa per mezzo del package “detrendeR” (Campelo et al. 2012) l’autocorrelazione interna attraverso un modello autoregressivo di terzo ordine (cronologie residue).

2.7 Analisi multidimensionale

Per studiare il segnale climatico comune che condiziona la crescita all’interno di ciascun popolamento sono state utilizzate tecniche di statistica multivariata, la *Principal Component Analysis* (o PCA) (Jolliffe 1986) e la l’Analisi Gerarchica Agglomerativa (HCA dall’inglese *Hierarchical Cluster Analysis*), entrambe realizzate per mezzo del software PAST (Hammer et al. 2001). Lo scopo primario della PCA è la riduzione di un numero più o meno elevato di variabili (rappresentanti altrettante caratteristiche del fenomeno analizzato) in alcune variabili latenti (*feature reduction*). La variabilità propria di ogni componente è espressa da una serie temporale di valori detti punteggi (*scores*), ottenuta attraverso il calcolo matriciale. La correlazione che ogni cronologia stazionale possiede con la serie di punteggi di ogni PC viene detta “peso” (*loading*), e sintetizza il legame esistente con quel segnale climatico. L’analisi multivariata è stata effettuata sia sulla matrice delle 4 cronologie residue di RW dei nuovi siti rilevati, che su tutte le cronologie che formano la rete dendrocronologica del faggio (banca dati DendrologyLab), per il periodo comune 1957 – 2013. I punteggi delle componenti principali sono stati usati per rappresentare la crescita delle fluttuazioni nel tempo, al fine di poter indagare il loro rapporto con i dati climatici.

Il numero di componenti scelto nelle analisi dipende dal numero minimo capace di spiegare coerentemente i dati originali; in pratica, piuttosto che cercare delle regole statistiche per giudicare la confidenza degli assi estratti, si valuta di quanto aumenti la capacità descrittiva del modello prodotto dalla PCA aggiungendo progressivamente un asse (Jolliffe 1986).

Nell’analisi HCA le cronologie residue (senza autocorrelazione), attraverso l’uso di algoritmi basati su funzioni di distanza e similarità, sono stati rielaborati e riclassificati. La matrice di distanza è stata calcolata attraverso l’algoritmo della correlazione, utilizzando l’*r* di Pearson, mentre per la regola di fusione dei gruppi è stato adottato il metodo UPGMA (*Unweighted pair-group average*) ovvero i cluster sono stati uniti in base alla distanza media tra tutti i membri dei due gruppi, realizzando così una classificazione gerarchica. Ad ogni stadio, vengono pertanto fusi i gruppi che producono il minimo aumento della varianza totale entro i gruppi. Una partizione si considera tanto migliore quanto più le classi risultano

omogenee al loro interno e differenti l'una dall'altra. Il risultato della *cluster analysis* viene espresso da un dendrogramma di classificazione, che riporta in ascissa il numero d'ordine distintivo di ciascun rilievo ed in ordinata la scala di distanza. Nel dendrogramma si osservano gruppi di rilievi di diverso grado gerarchico, alcuni più grandi che comprendono altri più piccoli, a seconda del livello di distanza considerato.

I gruppi che si formano vengono così interpretati in base alla loro disposizione geografica e/o di quota. Questo processo ci permette di ottenere una rappresentazione fitoclimatica di tutte le foreste censite nella rete.

Con l'utilizzo di queste tecniche si possono confrontare l'insieme di teleconnessioni presenti tra i siti, ovvero le correlazioni esistenti fra cronologie della stessa specie che si trovano in luoghi geograficamente diversi.

2.8 Relazioni clima - crescita

Il processo di “calibrazione” (così conosciuto in dendroclimatologia e paleoclimatologia) (Bradley 2014), spiega il rapporto esistente fra accrescimento arboreo e fattori climatici. Per questo studio i dati climatici sono stati reperiti dal *dataset* dell'Istituto ISAC-CNR di Bologna.

L'elaborazione è stata sviluppata su diverse fasi.

Dapprima, gli *scores* della componente maggiormente rappresentativa ottenuti dalla PCA sono stati confrontati con i dati di climatici (temperature e precipitazioni) mediante il metodo delle funzioni di correlazione (FC).

Infatti, correlando i dati climatici con le cronologie stazionali, ad una risoluzione mensile, si cerca di identificare le condizioni che ne limitano la crescita (Fritts 1976).

Le funzioni di correlazione (Blasing et al. 1984) sono ampiamente utilizzate per calcolare i rapporti dendrocronologici con le variabili climatiche e consistono in stime di correlazione lineare di Pearson (Cropper 1984). I calcoli vengono effettuati secondo il metodo *bootstrap* di tipo *stationary* (Politis and Romano 1994) con la lunghezza dei blocchi scelta casualmente da una distribuzione geometrica di parametro p (anziché fissata uguale per tutti i blocchi). I risultati forniti dal programma consistono nei coefficienti di correlazione, significativi al 95%, dove l'intervallo di confidenza viene calcolato sulla base delle stime effettuate su 1000 sub-intervalli.

Le variabili climatiche mensili sono state organizzate in modo da coprire l'intervallo di tempo che intercorre tra il giugno dell'anno precedente a quello di formazione dell'anello e l'ottobre dell'anno in corso, per un totale di 17 mesi. Così facendo si può valutare l'effetto che

ha il clima delle stagioni precedenti sulla formazione dell'anello. Si evita di prendere in considerazione i mesi dell'autunno ed inverno in corso poiché in questo periodo la crescita legnosa è terminata (Di Filippo 2002). La finestra temporale presa in considerazione è quella che copre il periodo in comune alle serie (1957 – 2013).

Biondi (2000) ha introdotto il concetto funzioni di risposta e di correlazione mobili. Queste permettono di valutare le condizioni di equilibrio delle risposte dendroclimatiche. Questo argomento è diventato ampiamente dibattuto a causa del “fenomeno divergenza”, vale a dire l'instabilità temporale delle relazioni di clima- crescita dell'albero a partire dalla fine del ventesimo secolo (D'Arrigo et al. 2008), tant'è che l'analisi della stabilità temporale delle relazioni clima-crescita è sempre più integrata negli studi dendroclimatici ed ecologici (Schuster & Oberhuber 2013). Le funzioni di correlazione mobile sono state effettuate su finestre temporali di 40 anni di ampiezza con offset (o slittamento rispetto all'inizio della serie precedente) di 1 anno. Queste analisi sono state realizzate attraverso il pacchetto “treeclim” (Zang and Biondi 2015) della suite R (R Development Core Team 2009).

Anche le singole cronologie stazionali residue dei quattro popolamenti siciliani sono state sottoposte alle funzioni di correlazione allo scopo di poter mettere in luce i fattori climatici che influenzano la variabilità di crescita in ciascun sito (Appendici).

Per poter analizzare come la siccità influenza la crescita (a scala regionale) si è calcolato l'indice SPI (*Standardized Precipitation Index*) (Mckee et al. 1993). Una delle caratteristiche principali di questo indice, a differenza di indici analoghi è infatti, che la siccità può essere calcolata per rappresentare scale temporali specifiche (Touchan et al. 2005). Questo indica il valore di surplus o deficit pluviometrico ed è estesamente utilizzato a livello internazionale. Considera la variabile precipitazione e definisce gli stati siccitosi o umidi rapportando alla deviazione standard la differenza degli apporti pluviometrici rispetto alla precipitazione media di un determinato intervallo di tempo (ovvero il quantitativo di pioggia caduto viene valutato in base alla variabilità della precipitazione negli anni precedenti). Il *range* di valori oscilla (nella maggior parte dei casi) tra +2 e -2 (Tab. 2), anche se questi estremi possono essere superati.

Tabella 2 – Scala di classificazione dei valori di SPI (*Standardized Precipitation Index*) con le rispettive categorie corrispondenti

Valori di SPI	Categoria
da 2 ed oltre	Estremamente Umido
da 1.50 a 1.99	Severamente Umido
da 1.00 a 1.49	Moderatamente Umido
da -0.99 a 0.99	Normale
da -1.00 a -1.49	Moderatamente Siccitoso
da -1.50 a -1.99	Severamente Siccitoso
da -2 ed oltre	Estremamente Siccitoso

I valori positivi indicano situazioni di surplus pluviometrico mentre valori negativi individuano situazioni di siccità. Il periodo preso in considerazione per il calcolo dell'indice è stato di 12 mesi (può essere calcolato anche ad intervalli minori), poiché fornisce informazioni sulle disponibilità idriche a livello di bacino idrologico (portate fluviali e livelli di falda). Per i calcoli dell'indice si sono utilizzati i dati pluviometrici reperiti dal *dataset* dell'Istituto ISAC-CNR di Bologna. Per il calcolo dell'indice si è utilizzato il package “spi” (Josemir 2012) in ambiente R (R Development Core Team 2009).

I risultati delle matrici calcolate dall'indice sono state nuovamente calibrate attraverso funzioni di correlazione (con intervallo di tempo che decorre dal giugno dell'anno precedente fino ad ottobre dell'anno in corso) e funzioni di correlazione mobile (finestre di 40 anni di ampiezza con offset di 1 anno).

Per avere un quadro spaziale complessivo dell'andamento e dell'influenza del clima nella finestra temporale comune alle serie dendrocronologiche, sono stati interpolati gli *scores* della PC1 con i dati di precipitazioni disponibili dalla piattaforma NOAA-CIRES (*Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA* - <http://www.cdc.noaa.gov/Correlation/index.html>), per il periodo comune 1957-2013. Da questa analisi si sono ottenute delle carte sinottiche che riportano i livelli di correlazione tra i punteggi delle componenti principali ed i dati climatici, in una griglia che comprende l'intero bacino del Mediterraneo. Delle finestre mobili sono state applicate per rilevare incongruenze spazio-temporali nel rapporto crescita-clima al fine di poter valutare la variabilità spaziale dei rapporti ottenuti tra la crescita del faggio ed il clima nel periodo considerato.

2.9 *Analisi della variazione di crescita a scala decennale*

Per poter interpretare le variazioni di crescita a scala decennale, le cronologie di incremento di area basimetrica, sono state dapprima filtrate attraverso il software PAST (Hammer et al. 2001), che consente, mediante l'uso di una curva gaussiana, di mediare i valori di BAI per un dato numero di anelli successivi. Con tale procedimento è stato applicato un filtro di 11 anni per studiare le variazioni di produttività di media frequenza dei diversi popolamenti per ciascuno dei siti indagati.

Lo stesso filtraggio è stato operato sulle serie di valori di SPI, per capire quale sia stata l'influenza del periodo arido sulla crescita della produttività. Sono stati presi in considerazione due periodi differenti: le medie del valore dell'indice SPI dei mesi di estivi (Giugno – Luglio – Agosto) e quella dei mesi di Maggio e Giugno. Le analisi sono state condotte sempre per il

periodo comune a tutte le serie (1957-2013). La rete locale inoltre è stata confrontata sia con i parametri climatici classici sia con l'indice SPI.

Un ultimo confronto è stato realizzato con le serie medie di BAI medie della rete locale con l'intera rete nazionale.

3. **RISULTATI**

3.1 *Caratteristiche della rete dendroecologica*

Dal campionamento dei siti indagati sono stati estratti un numero totale di 106 campioni legnosi, di cui 97 sono risultati utili alla costruzione delle quattro cronologie stazionali (Fig. 5)

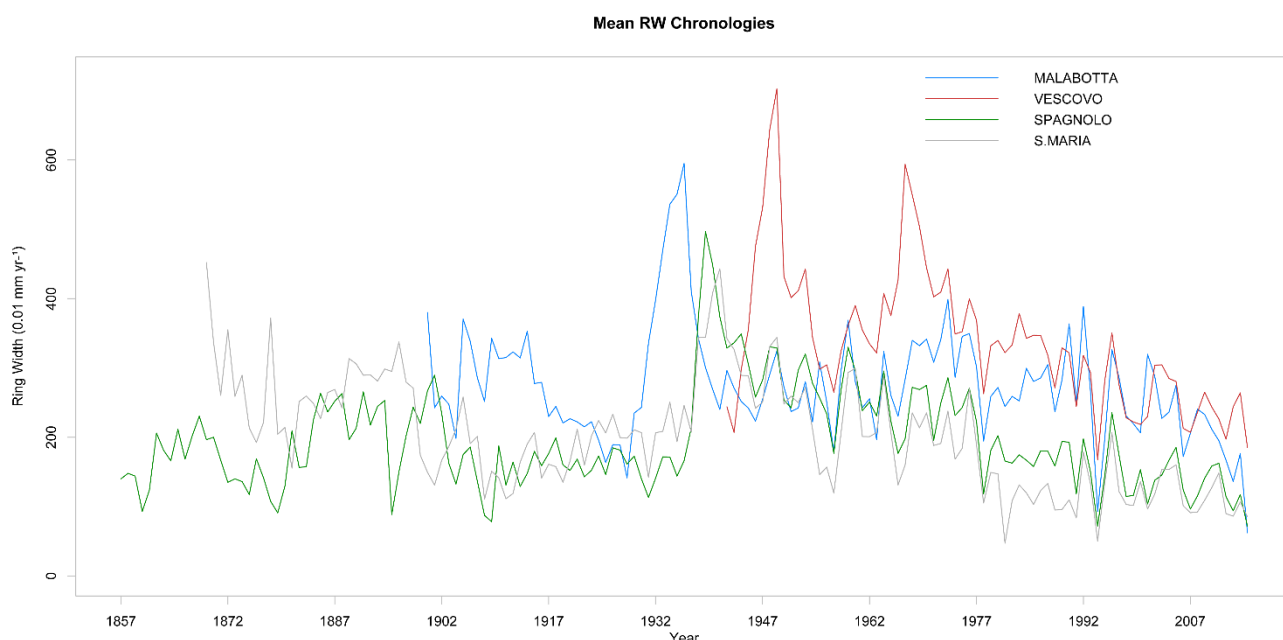


Figura 5 – Cronologie stazionali dei popolamenti di faggio dei siti siciliani che entrano a fare parte della rete dendrocronologia nazionale.

Le analisi dendrocronologiche fanno emergere che le cronologie con l'età maggiore sono quelle prelevate sull'Etna (SPA e SMA), seguite rispettivamente da MAL e VES che non riesce a raggiungere la soglia dei 100 anni di età. (Tab. 3). I parametri statistici mostrano nel complesso una omogeneità di accrescimento a coppia. Infatti i siti di SMA e SPA hanno un ritmo di crescita inferiore rispetto a VES e MAL che presentano una crescita identica. Il ritmo di crescita superiore per questi ultimi può essere spiegato dal fatto che VES è la cronologia più giovane e quindi risente ancora di una spinta propulsiva di crescita, mentre per MAL, con molta probabilità influiscono le buone condizioni di fertilità a livello stazionale.

Tabella 3 – Principali parametri statistici dendrocronologici utilizzati nell'analisi dei siti. (Piante): piante campionate; (Campioni): campioni utilizzati; (CM): correlazione con la cronologia master; (rbar): correlazione media tra le serie; (MW): ampiezza anulare media; (SD) deviazione standard; (MS): sensitività media; (A₁): autocorrelazione di primo ordine; (Corr MS – A₁) Livello di correlazione tra A₁ e MS; (EPS): segnale espresso dalla popolazione.

ID	Piante	Campioni	CM	rbar	MW (mm anno ⁻²)
SMA	26	25	.658	.652	1.86
SPA	25	24	.519	.447	2.05
VES	25	23	.479	.376	3.21
MAL	25	19	.540	.244	2.80

SD (mm anno ⁻²)	MS	A ₁	Corr MS – A ₁	N. anni (max)	EPS>0.85
1.122	.339	.741	.025	144	1908-2015
1.123	.314	.698	- .025	152	1914-2015
1.398	.235	.679	- .217	73	1957-2015
1.408	.299	.661	- .406	115	1914-2013

Il coefficiente di autocorrelazione di primo ordine (A₁) è strettamente legato al valore di MW poiché registra al suo interno la recettività delle piante (o inerzia di accrescimento) nei confronti delle variazioni climatiche. Il valore maggiore viene riportato da SMA, il minimo a MAL. SPA e VES riportano valori pressoché simili. Il valore più alto di sensitività media (MS), rappresentativo della capacità della pianta di reagire a stimoli climatici di breve periodo, si riscontra sempre a SMA mentre il sito con il valore più basso (0.299) è MAL.

Anche per il valore di rbar (correlazione esistente tra le serie dello stesso sito) il trend non cambia con il valore più alto riportato nella stazione di SMA che va progressivamente diminuendo nei siti di SPA, VES e MAL.

Le relazioni diametro (DBH) con l'età (AGE) riportate in figura 6, mostrano che solo in due casi (SMA e MAL) esiste una correlazione positiva (seppur il valore di r^2 non sia altissimo). Nei siti SPA e VES invece non è presente la linea di regressione, poiché la correlazione era prossima allo zero, quindi annoverabile come assente.

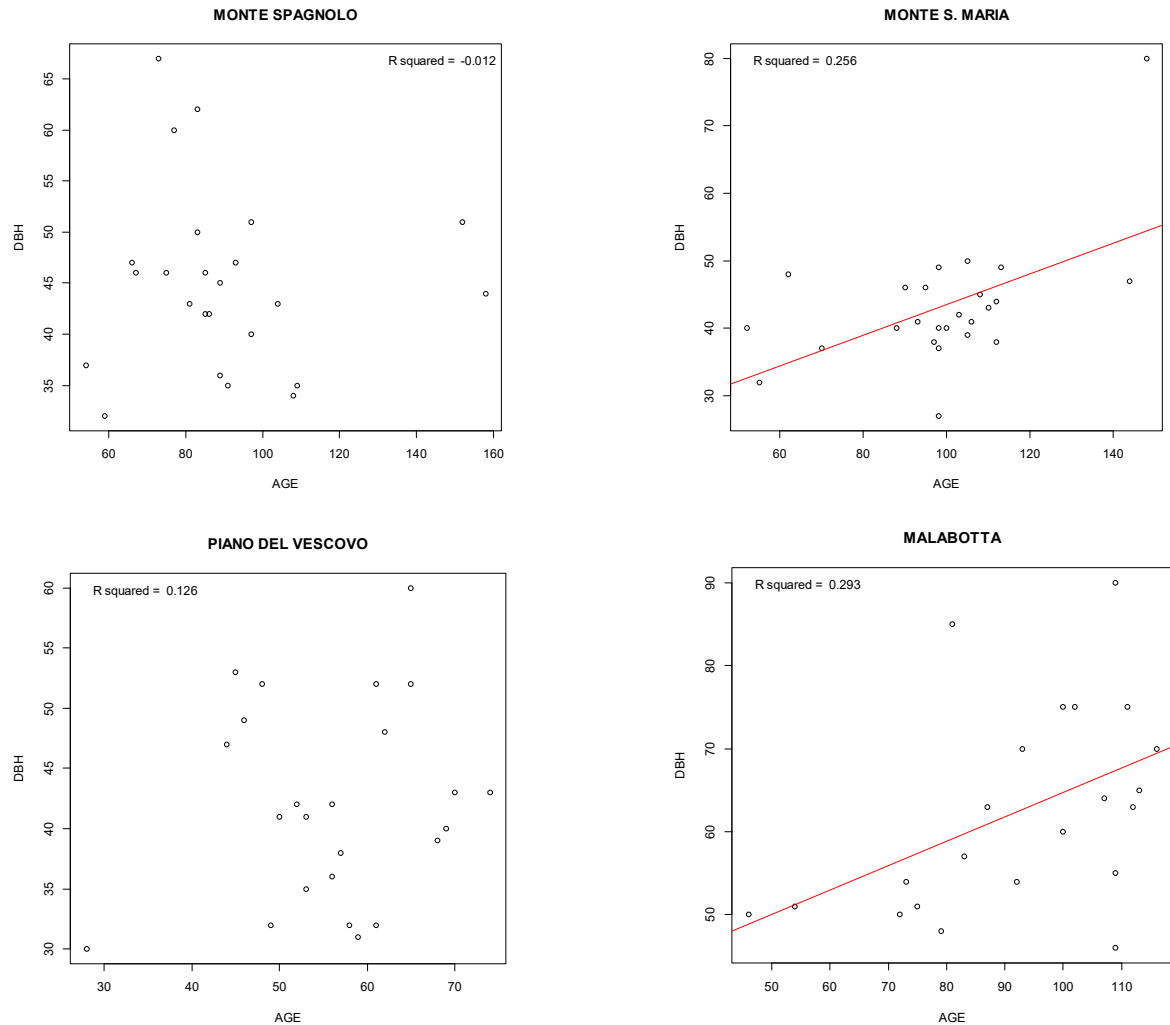


Figura 6 – Grafici di correlazione tra il DBH misurato e l'età per i quattro siti.

Dall'Analisi delle Componenti Principali (PCA) realizzata sulle cronologie residue dei siti siciliani nel periodo comune 1957-2013, si è visto che la prima componente spiega la presenza di un fattore comune che influenza le principali modalità di crescita della rete locale (Tab. 4). Infatti il valore di varianza spiegata dalla prima componente è pari a 76.1% più che sufficiente per descrivere le principali modalità di crescita presenti all'interno della rete. Questo è ben evidenziato nello *scatter plot* dei punteggi (Fig.7), che tra l'altro lungo la seconda componente distingue bene il segnale dei popolamenti che si trovano sul versante Nord dell'Etna (SPA e SMA), rispetto al sito con esposizione a Sud (VES). Questo conferma il fatto che popolamenti posti topograficamente e geograficamente in maniera diversa l'uno dall'altro, hanno un fattore comune che ne guida la crescita. Il segnale climatico comune, nella rete dei siti campionati, riporta un massimo valore di correlazione nei valori dei *loadings* a SMA (0.94) mentre il valore minore è espresso da VES (0.71) caratterizzato da una esposizione meridionale. A SPA e MAL i valori sono rispettivamente 0.93 e 0.83. (Fig. 8).

Tabella 4 - Statistiche dell'analisi delle componenti principali (PCA) estratte dalla matrice del periodo comune 1957 - 2013 per la cronologia residua di RW

PC	Eigenvalue	% variance	Eig 2.5%	Eig 97.5%
1	3.04755	76.189	5.2884	85.236
2	0.45799	11.45	5.8665	82.026
3	0.34691	8.6728	4.313	78.33
4	0.14754	3.6886	1.7618	6.1679

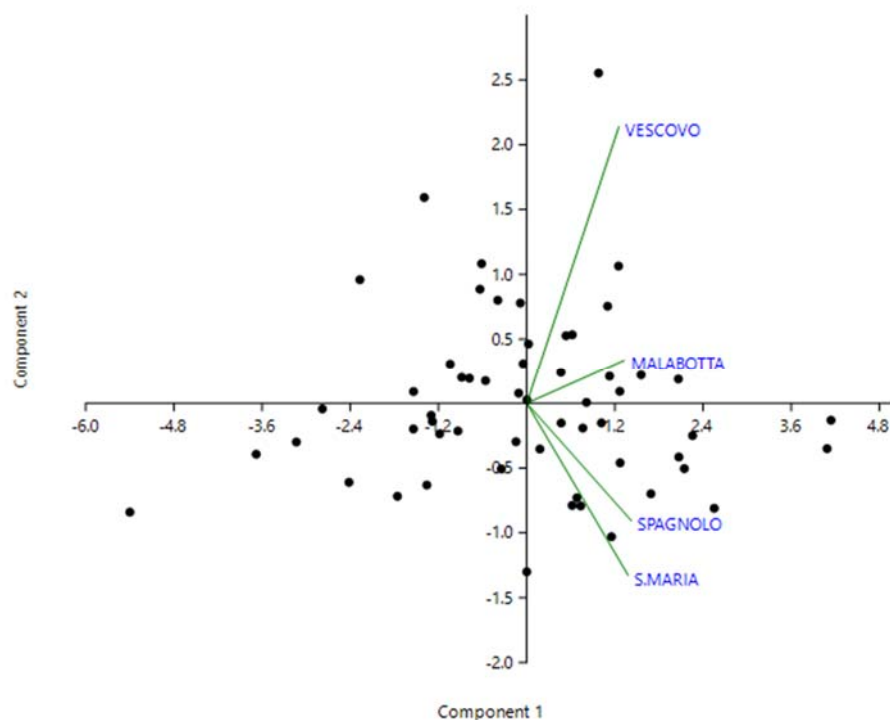


Figura 7 - Scatter plot dei pesi dell'analisi delle componenti principali (PCA) per la matrice del periodo comune 1957-2013

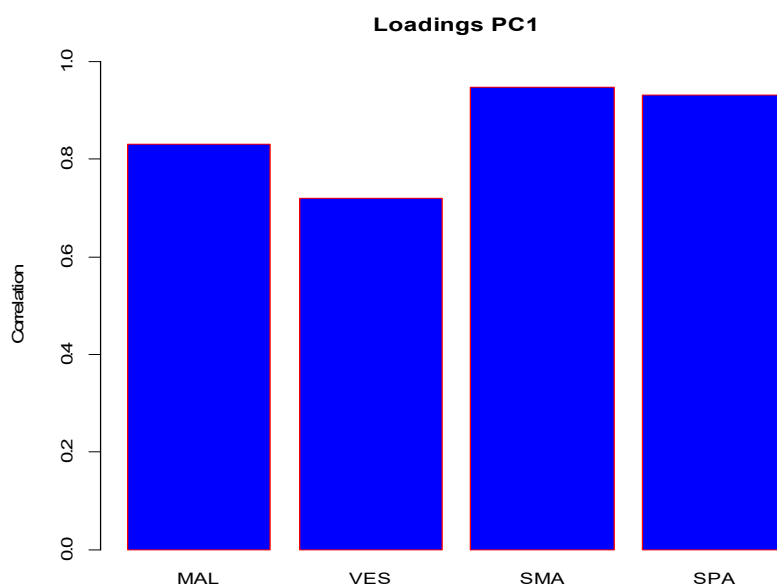


Figura 8 - Loadings plot dei valori di correlazione della PC

L'analisi delle funzioni di correlazione con metodo *bootstrap* ha messo in luce come i fattori climatici influenzino la variabilità di crescita del faggio in Sicilia. Nello specifico, la PC1 è correlata positivamente alle precipitazioni del luglio e dicembre dell'anno precedente (con coefficienti significativi con $p < 0.05$) e giugno ed agosto dell'anno in cui si ha la formazione dell'anello. Le temperature del novembre dell'anno precedente la formazione dell'anello e quelle del giugno ed agosto dell'anno in cui si forma l'anello sono correlate negativamente. Annate con basse precipitazioni ed alte temperature, soprattutto nel periodo estivo rappresentano un fattore limitante importante per la crescita del faggio in Sicilia (Fig. 9).

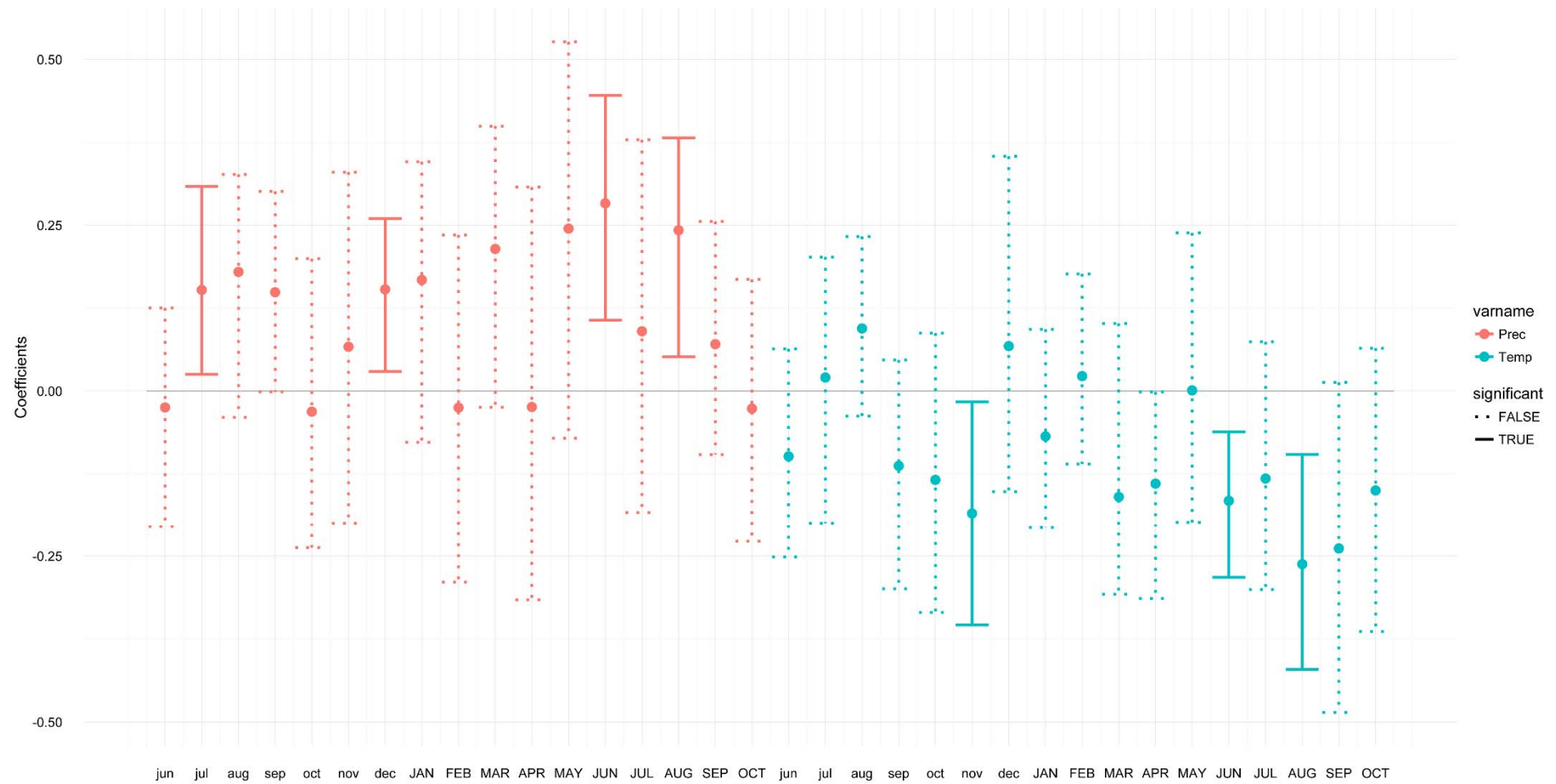


Figura 9 - Funzioni di correlazione bootstrap tra la PC1 e precipitazioni (Prec) e le temperature medie (Temp) per il periodo 1957-2013. Le barre con margine evidenziato indicano i mesi in cui i coefficienti sono significativi ($p < 0.05$). Le lettere minuscole rappresentano i mesi dell'anno precedenti la formazione dell'anello.

Le funzioni di correlazione su finestre mobili (40 anni) mostrano che il regime di precipitazioni del mese di agosto dell'anno in cui si ha la formazione dell'anello, è sempre correlato mantenendosi stabile su tutto il periodo temporale comune analizzato (1957 – 2013). Un risultato interessante che emerge è invece, la presenza, dalla finestra di maggio del 1967-2006, di un segnale di precipitazioni maggiormente correlato a quello presente in comune nella serie (Fig. 10).

Le temperature risultano inversamente correlate a partire dal mese di marzo del 1967-2006. Il mese di novembre dell'anno precedente la formazione dell'anello invece, risulta correlato (ma in modo instabile) nel periodo iniziale della finestra temporale analizzata, stabilizzando il segnale negativo a partire dal 1967-2006 (in coincidenza con l'inizio della correlazione positiva delle precipitazioni) (Fig. 11).

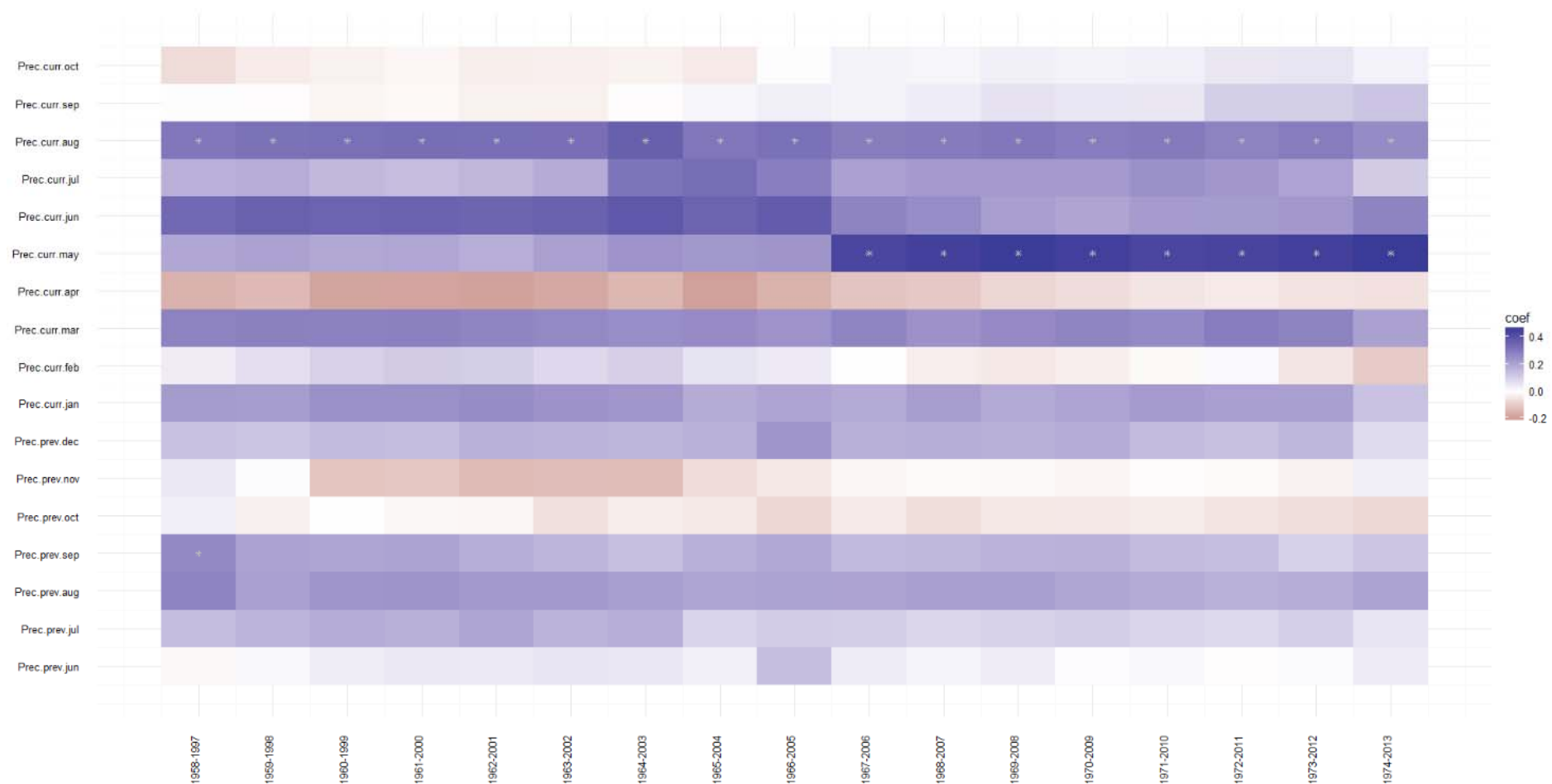


Figura 10 - Funzioni di correlazione mobile effettuate su finestre temporali di 40 anni di ampiezza con offset di 1 anno su un periodo temporale comune (1957-2013) con Precipitazioni. Il simbolo * indica quando i coefficienti di correlazione sono significativi ($p < 0.005$).

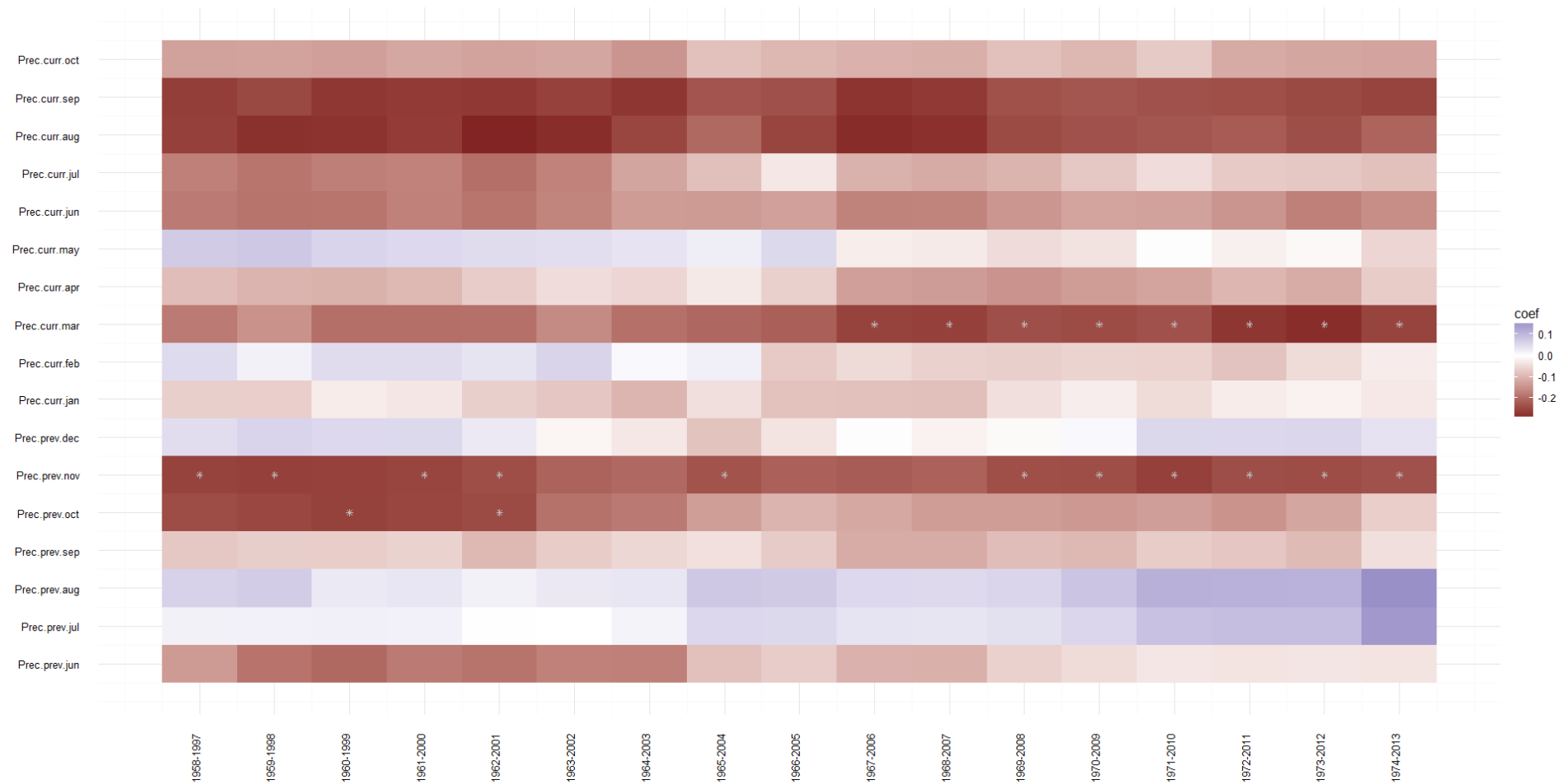


Figura 11 - Funzioni di correlazione mobile effettuate su finestre temporali di 40 anni di ampiezza con offset di 1 anno su un periodo temporale comune (1957-2013) con le Temperature medie. Il simbolo * indica quando i coefficienti di correlazione sono significativi ($p < 0.005$).

Dall'analisi dell'indice SPI (*Standardized Precipitation Index*) si nota che nell'intervallo di tempo analizzato (1957-2013) il *range* di valori oscilla tra l'1 (in alcuni anni si raggiungono picchi del 2) dei mesi autunno – invernali ed i valori di -1/-2 (ed oltre) dei mesi che vanno da giugno ad agosto. Poiché i valori negativi individuano situazioni di siccità, è facilmente individuabile un inaridimento del clima che si è accentuato particolarmente nell'ultimo quindicennio in corrispondenza dell'estate (Fig. 12, Fig. 26).

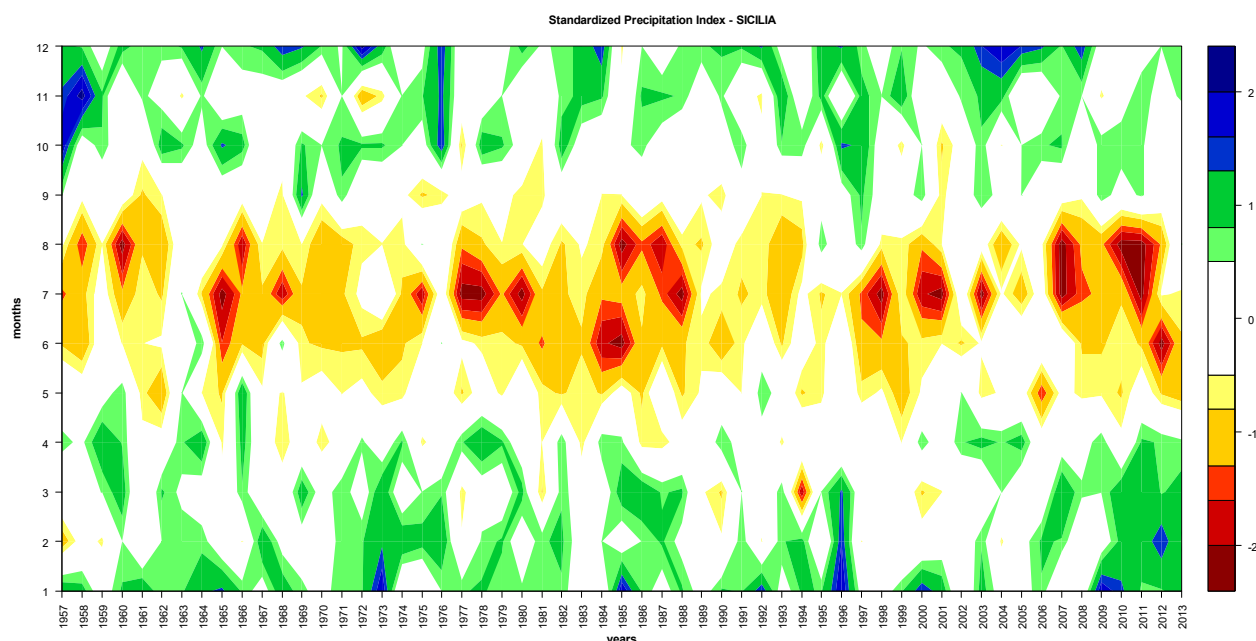


Figura 12 – Grafico di rappresentazione dell'indice SPI (*Standardized Precipitazioni Index*) nel periodo comune (1957-2013). I valori indicati nella scala colorata di riferimento corrispondono ad un determinato stato climatico.

La calibrazione con metodo *bootstrap* realizzata tra i risultati mediati dell'indice SPI e le precipitazioni hanno confermato l'importanza della presenza di un buon regime pluviometrico nel mese di maggio dell'anno in cui si ha la formazione dell'anello (Fig. 13). Anche con le funzioni di correlazione su finestre mobili (40 anni) le precipitazioni del mese di agosto dell'anno in cui si si forma l'anello sono ben correlate per buona parte del periodo analizzato. Da notare la caduta di correlazione nel periodo arido attuale mentre si conferma anche in questa analisi la presenza di un segnale di precipitazioni maggiormente significativo che parte dal mese di maggio del 1967 (Fig. 14).

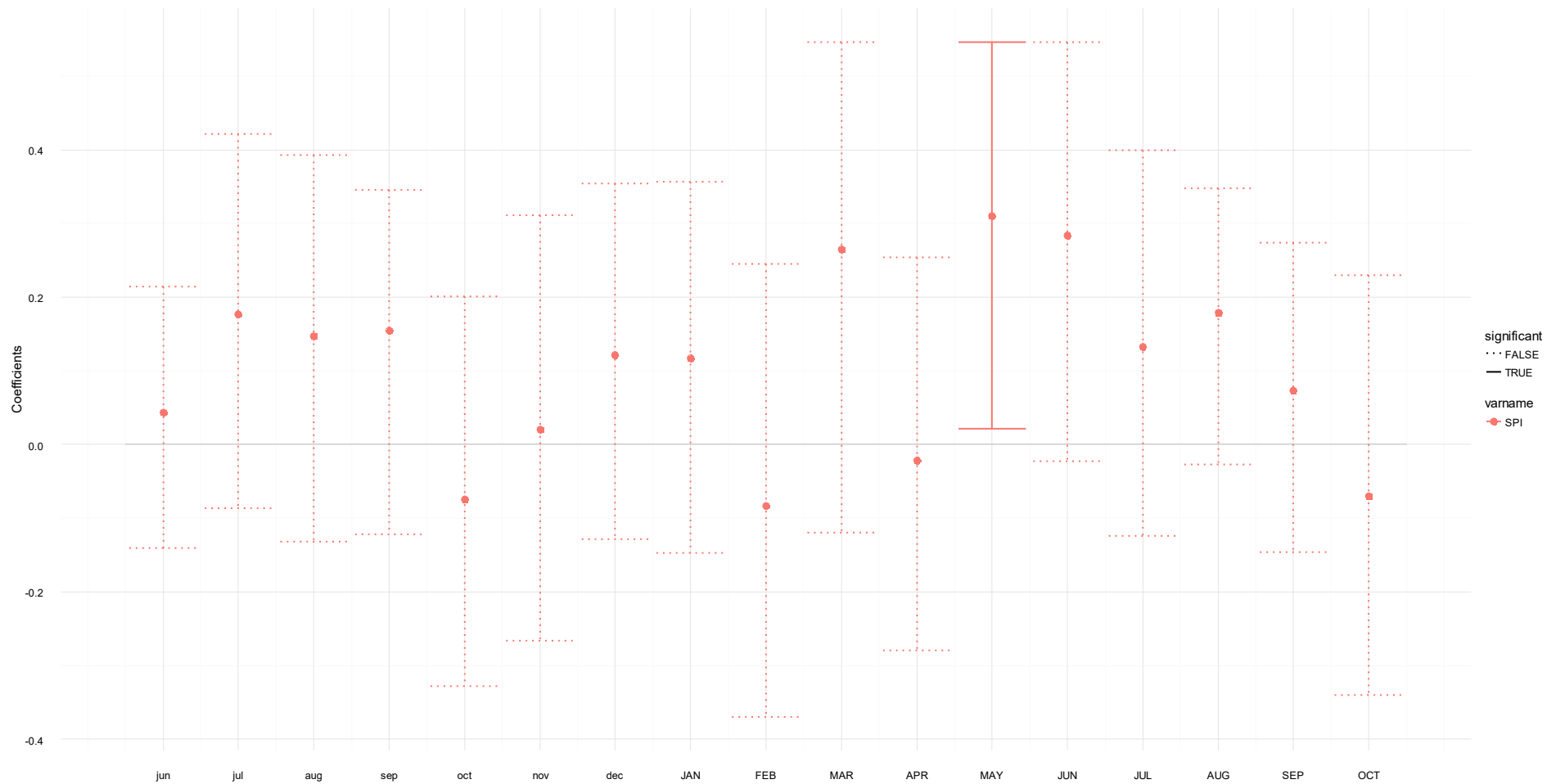


Figura 13 - Funzioni di correlazione bootstrap tra i valori medi di SPI e le precipitazioni (Prec) per il periodo 1957-2013. Le barre con margine evidenziato indicano i mesi in cui i coefficienti sono significativi ($p < 0.05$). Le lettere minuscole rappresentano i mesi dell'anno precedenti la formazione dell'anello.

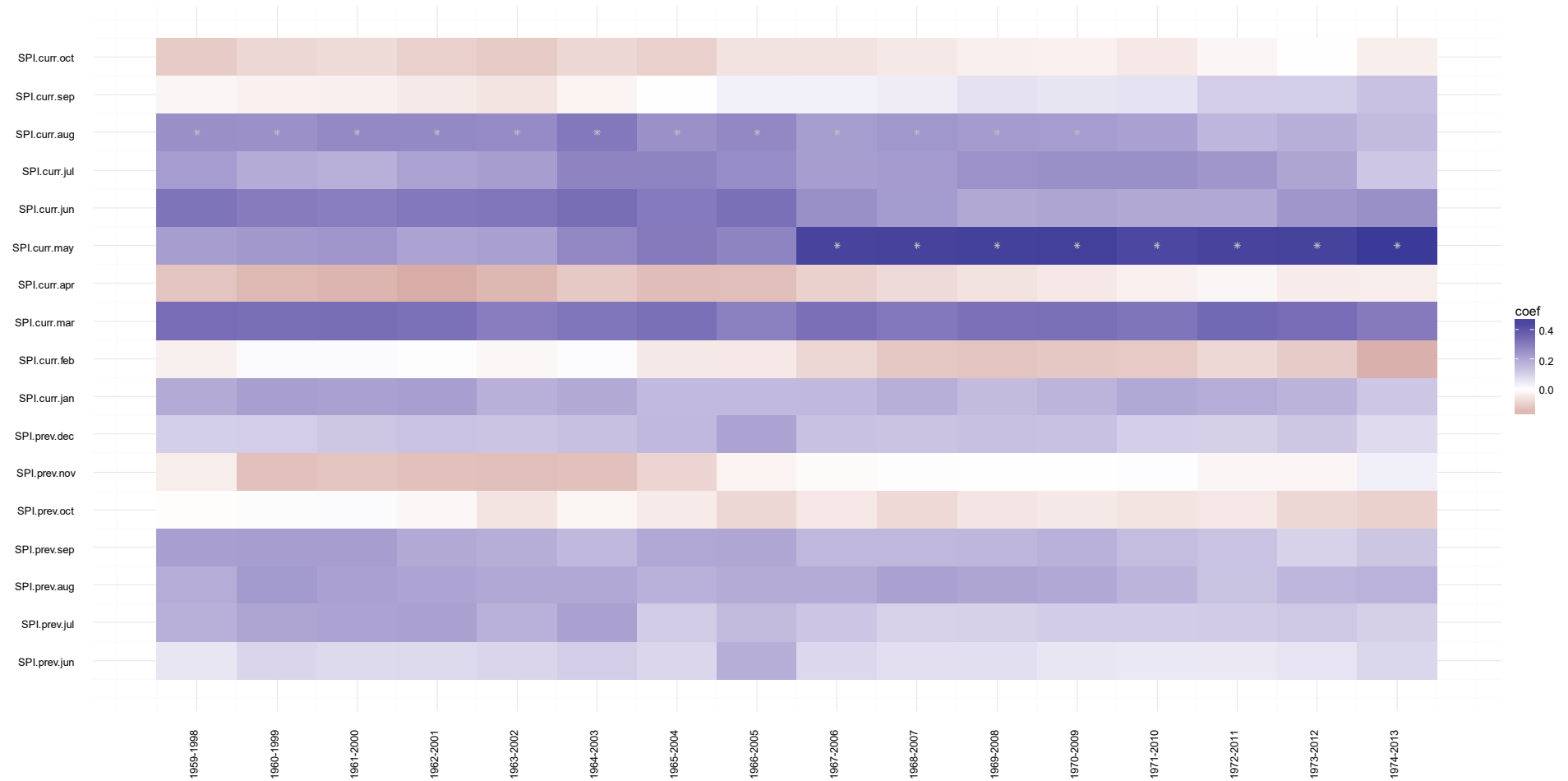


Figura 14 - Funzioni di correlazione mobile effettuate su finestre temporali di 40 anni di ampiezza con offset di 1 anno su un periodo temporale comune (1957-2013) con le Precipitazioni. Il simbolo * indica quando i coefficienti di correlazione sono significativi ($p < 0.005$)

Le analisi ottenute dalle carte sinottiche nell'intera finestra temporale esplorata (1957-2013) tra i livelli di correlazione dei punteggi delle componenti principali della rete locale analizzata ed i dati di precipitazioni per l'intero bacino del Mediterraneo, mostrano una coerenza spaziale della correlazione con il mese di agosto che va oltre il Nord del Mediterraneo

Infatti i valori riportati oscillano tra 0.2 e 0.4 (Fig. 15).

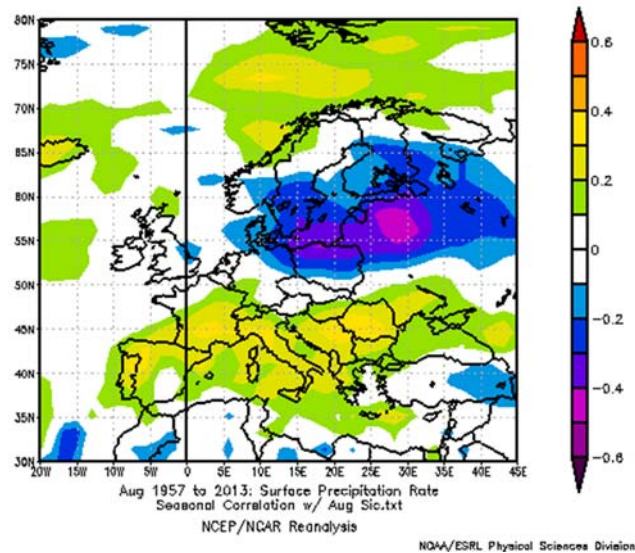


Figura 15 – Mappa sinottica di correlazione tra scores di PC1 e precipitazioni del mese di Agosto nella finestra temporale 1957-2013 – “Image provided by the NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>”

Dalle finestre mobili riferite al periodo 1957 – 1976 e 1977 – 2013, correlate con il mese di maggio, si nota bene come nel primo periodo il regime pluviometrico non sia correlato alla crescita del faggio ma che invece diventa fondamentale, nella finestra temporale successiva, correlandosi in maniera positiva (valori compresi tra 0.2 e 0.4) proprio nella cella climatica in cui rientra la Sicilia (Fig. 16).

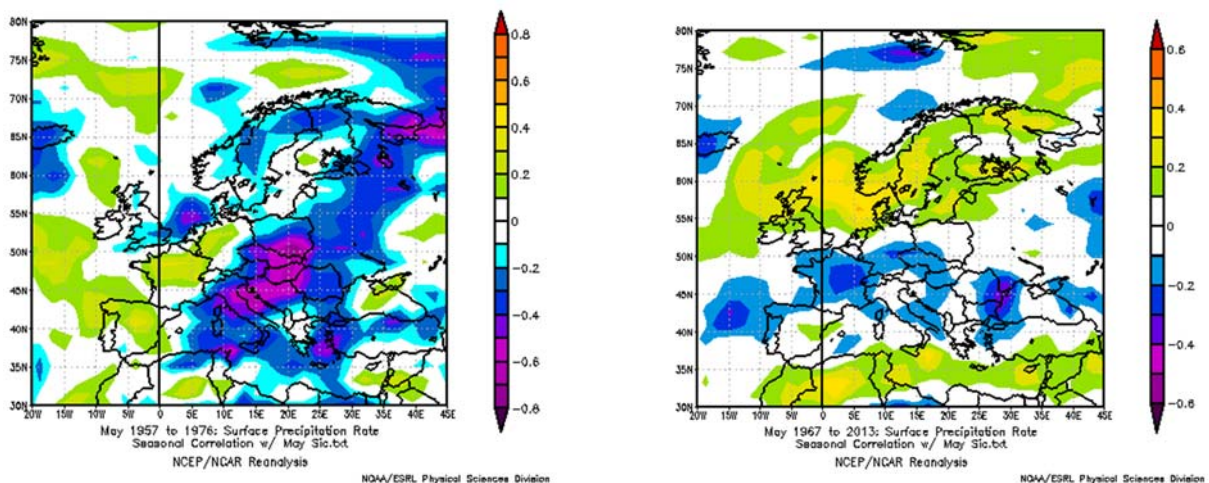


Figura 16 - Mappe sinottiche di correlazione tra scores di PC1 e precipitazioni del mese di Maggio nelle finestre temporali 1957-1976 (SX) e 1967 – 2013 (DX) - “Image provided by the NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>”

Analizzando il periodo estivo compreso tra i mesi di giugno ed agosto delle due finestre temporali considerate (1957 – 1976; 1977 - 2013) (Fig. 17), si evince che, nella prima l’ecologia della faggeta è di tipo mediterraneo. Il faggio risponde bene infatti (correlazioni intorno al valore 0.6) lungo tutta la penisola italiana al periodo di aridità estivo. Nel secondo periodo invece, le precipitazioni risultano ancora correlate ma hanno diminuito la loro importanza attestandosi intorno a valori compresi tra 0.2 e 0.3.

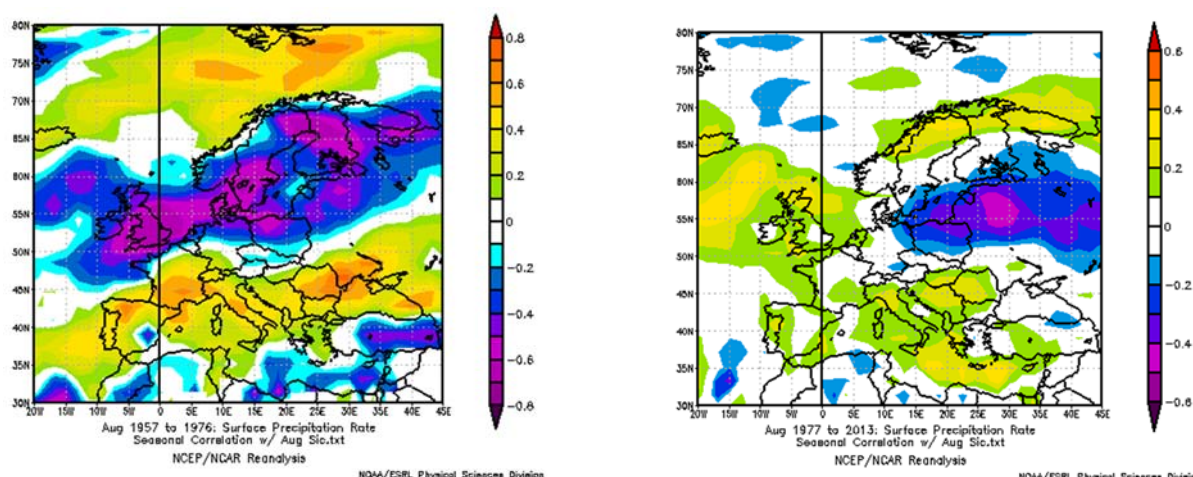


Figura 17 - Mappe sinottiche di correlazione tra scores di PC1 e precipitazioni del periodo di aridità estiva (Agosto) nelle finestre temporali 1957-1976 (SX) e 1967 – 2013 (DX) - “Image provided by the NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>”

Dall’Analisi delle Componenti Principali (PCA) realizzata sulle cronologie residue dell’intera rete nazionale nel periodo comune 1958-2000, un grado di percentuale della varianza spiegata pari al 38%, conferma la prima componente come importante nel definire la presenza di un fattore comune nell’ecologia delle faggete mediterranee (Tab. 5).

Tabella 5 – Statistiche dell’analisi delle componenti principali (PCA) estratte dalla matrice del periodo comune 1958 – 2000 per le cronologie residue di RW dell’intera rete dendroecologica del faggio

PC	Eigenvalue	% variance	Eig 2.5%	Eig 97.5%
1	17.487	38.015	29.771	46.117
2	5.73327	12.464	9.939	16.386
3	4.07264	8.8536	6.2741	13.843

Il report dei *loadings* ottenuto dall’analisi della PCA, mostra che il valore più alto è riportato dal sito di Cinquefrondi (0.92) (Fig. 18). È possibile notare come le zone con un’ecologia alpina (gruppo 1 del cluster) si distinguano nettamente rispetto al resto dei siti che compongono la rete.

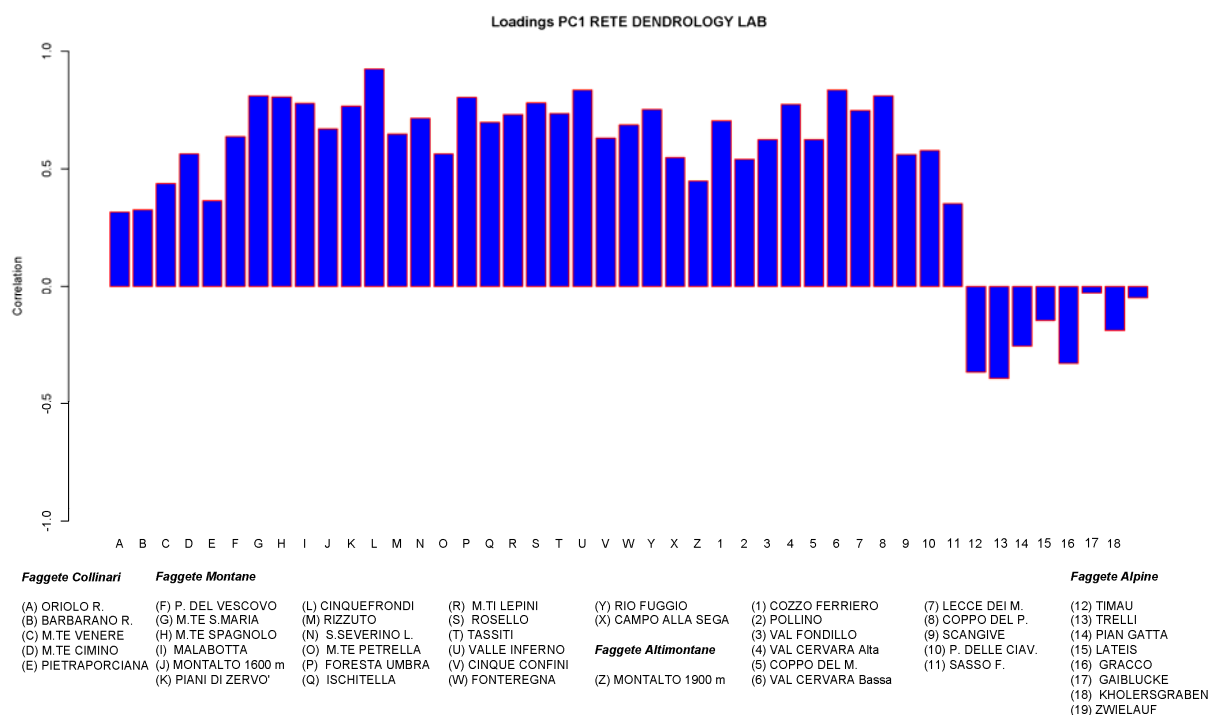


Figura 18 - Loadings plot dei valori di correlazione della PC nei siti della rete dendroecologica nazionale

Il risultato che si è ottenuto dalla *cluster analysis* (Fig. 19) mostra come la dendroecologia del faggio all'interno della rete sia identificata in quattro gruppi ben distinti. Un primo gruppo di faggete collinari, racchiuse nel cluster 2, un gruppo con una ecologia montana mediterranea (gruppo numero 3), un terzo gruppo di faggete altimontane mediterranee (gruppo 4) ed infine, con una loro ecologia specifica, le faggete alpine (gruppo numero 1).

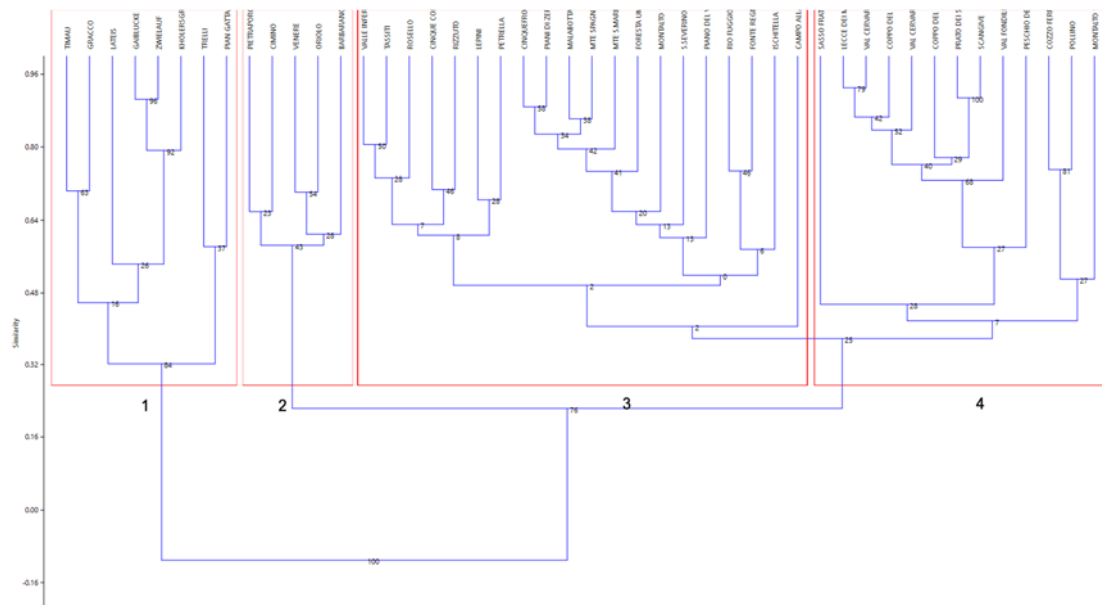


Figura 19 – Dendrogramma gerarchico delle cronologie residue che compongono la rete dendroecologica. Il periodo temporale è quello che intercorre tra il 1958 ed il 2000.

Dall'interazione degli scores della PC1 dell'intera rete dendroecologica nazionale del faggio, nel periodo comune 1958 – 2000, con il regime di precipitazioni del periodo di estivo (giugno – luglio – agosto), la carta sinottica in figura 20, mostra come l'ecologia mediterranea abbia inizio dalle Alpi marittime con un grado di correlazione >0.5 , per poi propagarsi lungo tutto l'Appennino italiano fino ad arrivare nelle zone meridionali ed in Sicilia.

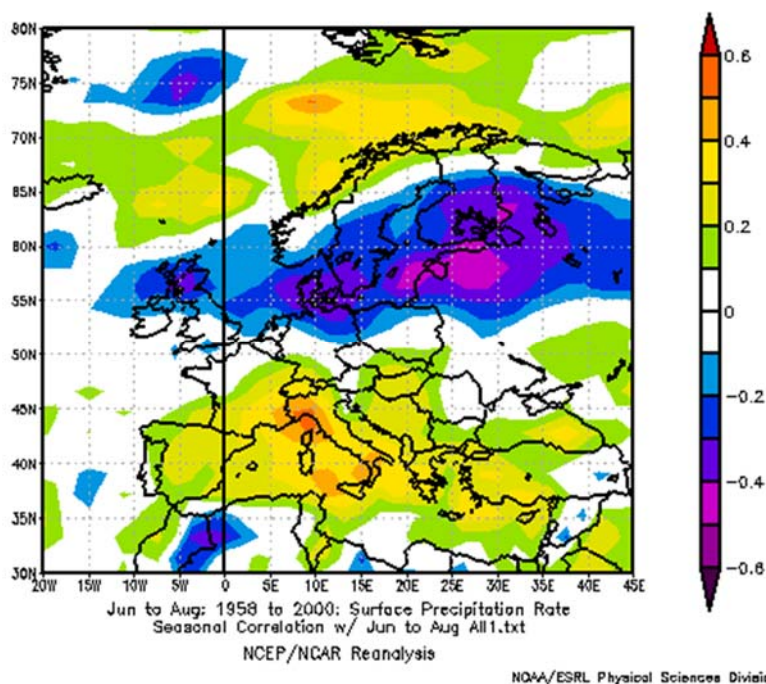


Figura 20 - Mappe sinottiche di correlazione tra scores di PC1 della rete dendroecologica nazionale ed il regime di precipitazioni del periodo di aridità estiva (Giugno – Luglio - Agosto) nelle finestre temporale 1958-2000 - "Image provided by the NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>"

Le variazioni di produttività nei popolamenti della rete siciliana ottenuti sono mostrati in tabella 6.

Tabella 6 – Caratteristiche di produttività nei popolamenti indagati

Codice	Piante	Campioni	BAI (cm ² anno ⁻¹)	N. anni (max)	Periodo
SMA	26	25	(3) 16 (45)	144	1871-2015
SPA	25	24	(1) 18 (42)	152	1864-2015
VES	25	23	(1) 21 (41)	73	1942-2015
MAL	25	19	(0.2) 16 (37)	115	1900-2015

Da questa si vede che il sito con il maggior incremento di area basimetrica è quello di VES.

Gli altri siti hanno una produttività media molto simile tra loro. I valori minimi e massimi assoluti invece sono quelli di Malabotta (MAL).

I risultati delle cronologie stazionali di BAI (Fig. 21) mostrano che, nei siti SMA e SPA sia avvenuto un vero e proprio crollo della produttività a partire dai primi anni del '900 del secolo scorso fino all'inizio degli anni '20. Difatti la produttività passa da circa 35 cm² anno⁻¹ ad un livello che si attesta poco sopra i 10 cm² anno⁻¹.

Nell'anno 1978 tutti e quattro i siti indistintamente, subiscono un crollo di incremento di area basimetrica che si ripete intorno al 1994. Un aspetto interessante da notare è che l'andamento della crescita negli anni immediatamente prima e immediatamente dopo questa data, in tutti i siti, sia praticamente identico.

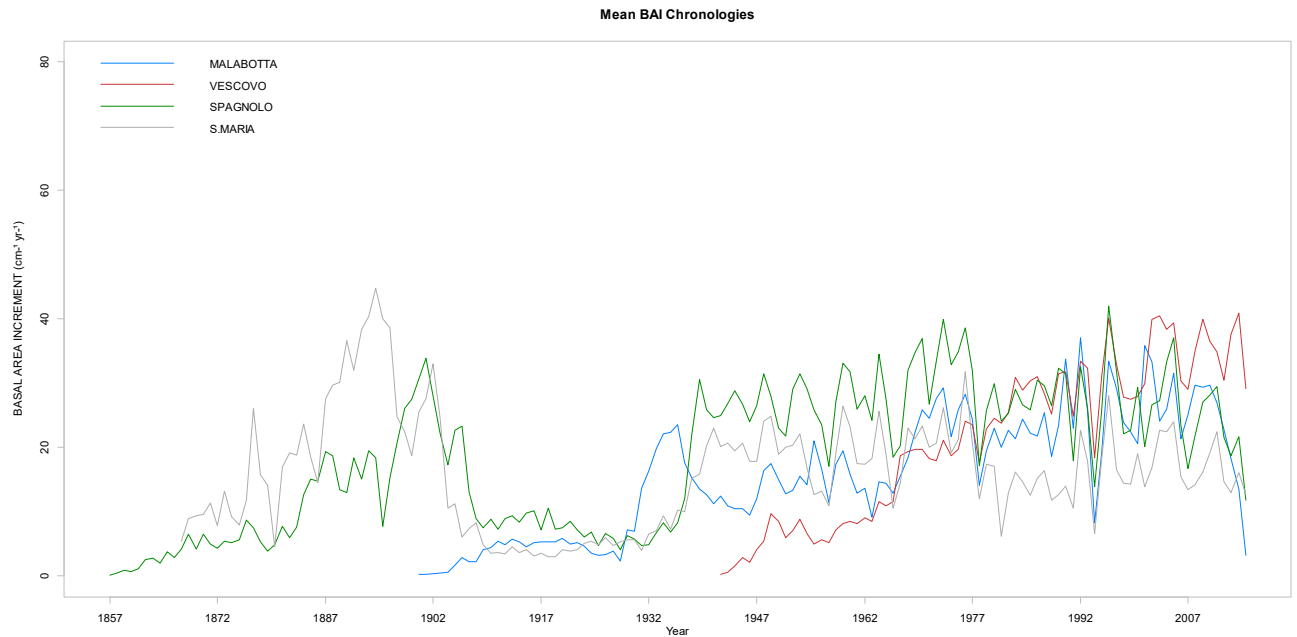


Figura 21 - Cronologie grezze di Incremento di Area Basimetrica (BAI) dei popolamenti di faggio componenti la rete dendroecologica di Sicilia.

Il BAI messo in relazione con i parametri di diametro (DBH) ed età (AGE), realizzato per tutti i siti (Figura 22), mostra che a MAL ($r^2 = 0.641$), VES ($r^2 = 0.754$) e SPA ($r^2 = 0.4$) è presente la relazione con il diametro (DBH). Lo stesso parametro non presenta invece una correlazione con l'età (AGE) in tutti i popolamenti analizzati. Questo dato porta ad affermare che valori di BAI maggiori non indicano di conseguenza e piante di età maggiore.

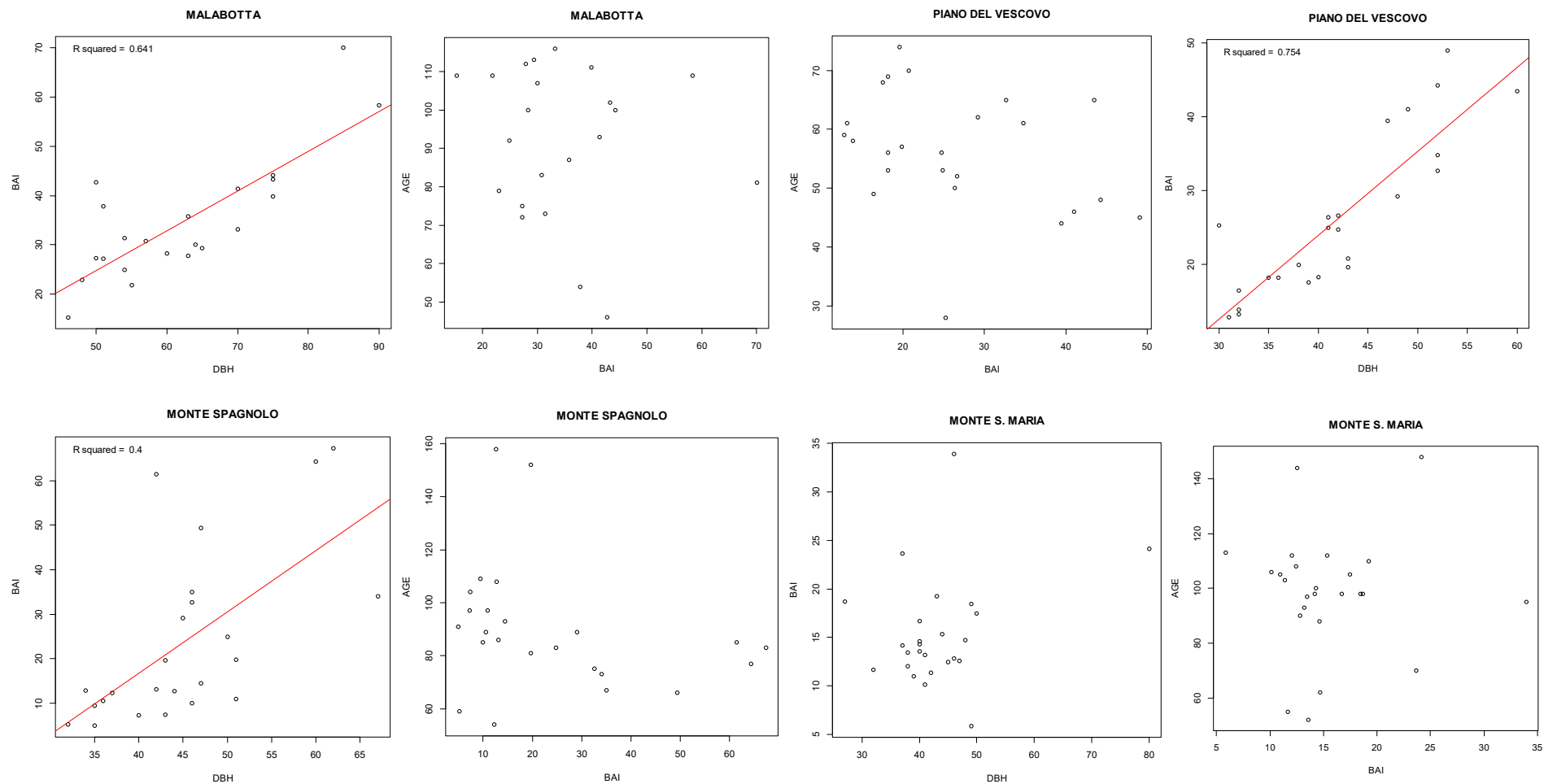


Figura 22 - Relazioni diametro DBH – BAI (Medio) e BAI (Medio)– AGE dei quattro popolamenti di faggio componenti la rete dendroecologica di Sicilia.

L'andamento dei trend di incremento di BAI (Inc. Corr.) e dell'incremento medio (Inc. Med.) dei popolamenti indagati (Figg. 23 - 24), mostrano che a MAL l'incremento corrente ha culminato intorno ai 90 anni di età e 30 cm². Questo dato rappresenta il livello di produttività maggiore rispetto al resto degli altri siti investigati, a conferma che a MAL i livelli di fertilità stazionali siano differenti, mentre l'incremento medio sembra abbia raggiunto il suo culmine nel momento in cui sono stati condotti i campionamenti. La ricostruzione degli incrementi diametrici sotto corteccia dimostrano una certa eterogeneità nella crescita delle piante che testimoniano un discreto livello di naturalità di questo bosco quello.

Il sito di VES, il più giovane tra tutti quelli indagati, mostra una forte propulsione dell'incremento corrente, probabilmente dovuta alla forza di spinta che le piante hanno avuto come risposta ad una utilizzazione avvenuta in quelle zone circa 50/60 anni fa. Infatti l'incremento corrente culmina a 30 cm² intorno a 60 anni preceduta da una lieve flessione a 50 anni. L'incremento medio invece, sembra trovarsi al momento in una fase stazionaria. Le curve che rappresentano la storia degli diametrici mostrano, in questo caso poca variabilità e quindi una crescita simile del diametro delle piante.

I siti di SPA e SMA, infine, mostrano un andamento di incremento di aria basimetrica (Inc. Corr.) simile. Infatti entrambi raggiungono un picco che si attesta intorno ai 20 cm² ed un andamento più o meno analogo fino ai 90 anni di età. Da quel momento in poi i due siti seguono due trend diversi. Infatti SPA si mantiene su livelli di crescita stazionari. SMA invece ha un trend sinusoidale crescente negli ultimi tempi, arrivando a raggiungere anche i 25 cm².

Le storie di crescita diametrica per questi due siti indicano che a SPA, a medesimo valore cronologico esiste un intervallo dimensionale maggiore rispetto a quello esistente a SMA.

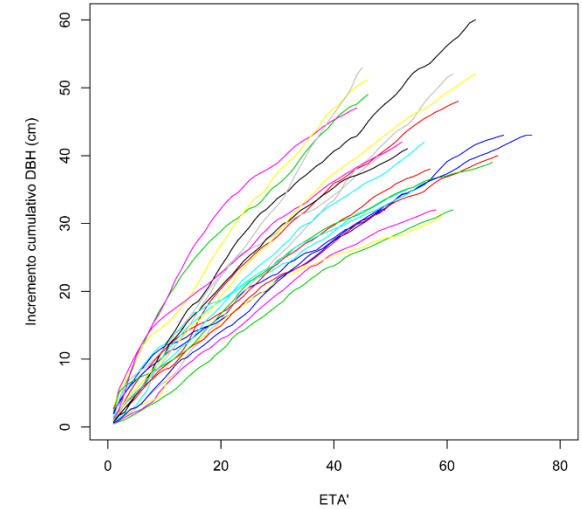
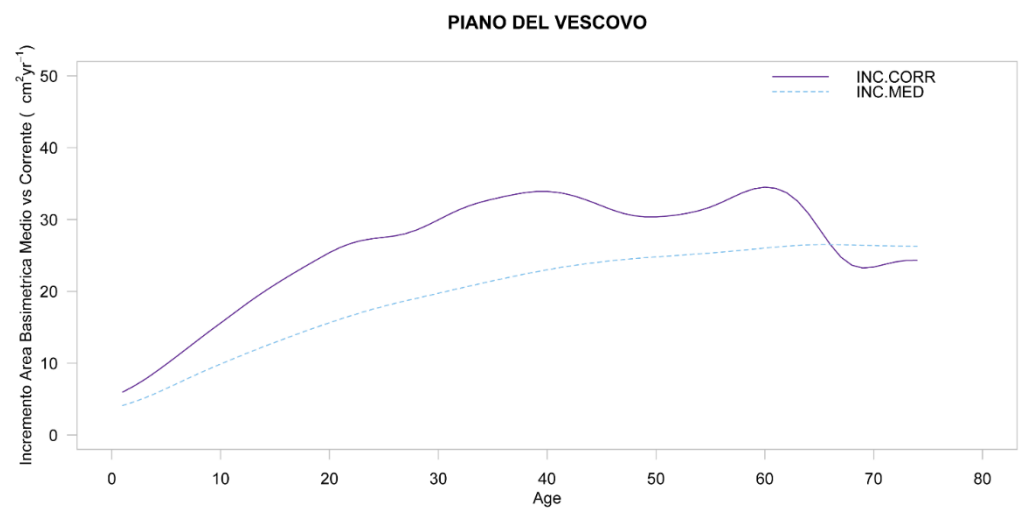
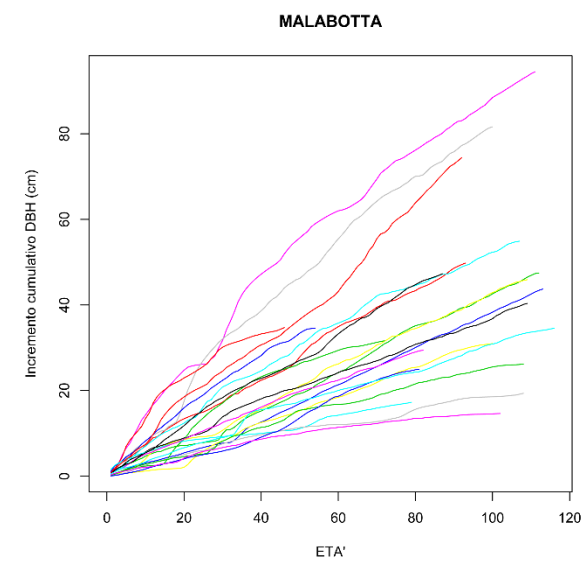
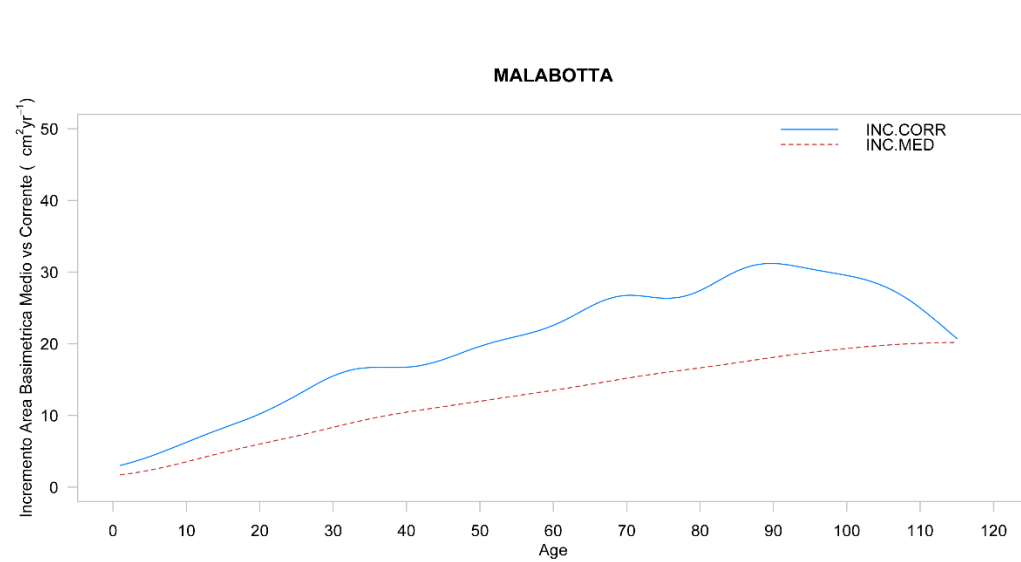


Figura 23 – Il grafico di sx riporta le curve dell'incremento corrente di area basimetrica (Inc.Corr) e dell'incremento medio (Inc.Med) dei siti di MAL e VES. A dx vengono riportate le storie auxologiche dei medesimi popolamenti. Le linee continue rappresentano l'incremento diametrico cumulato sotto corteccia.

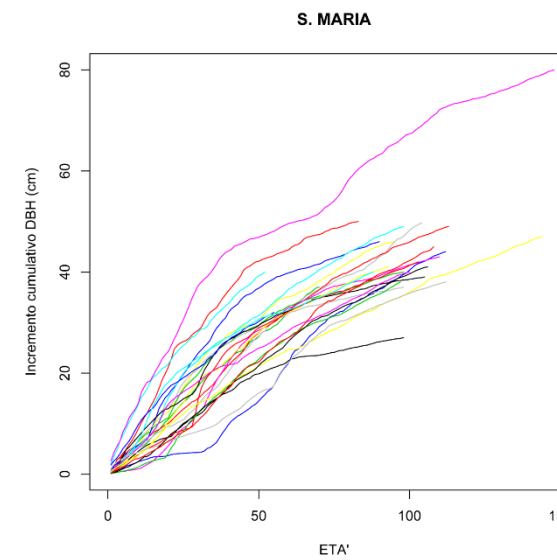
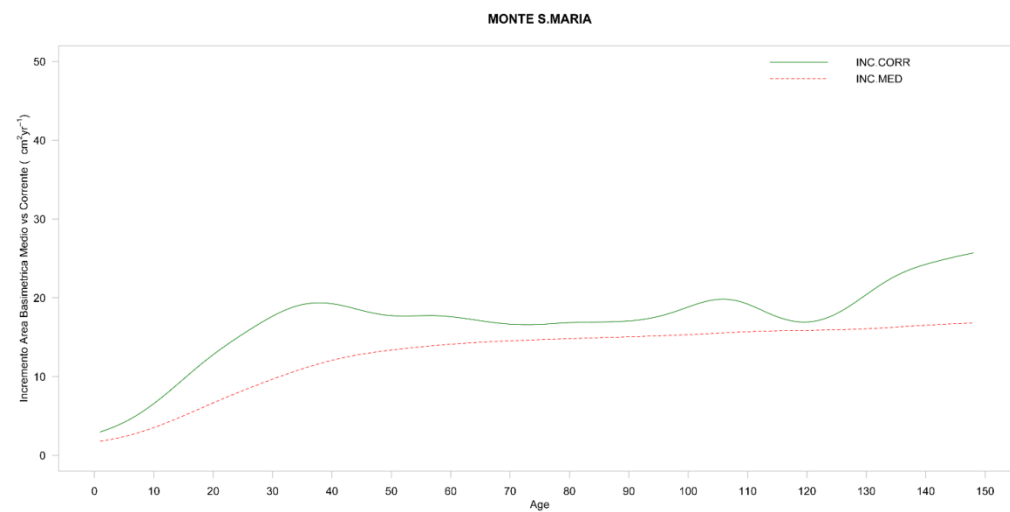
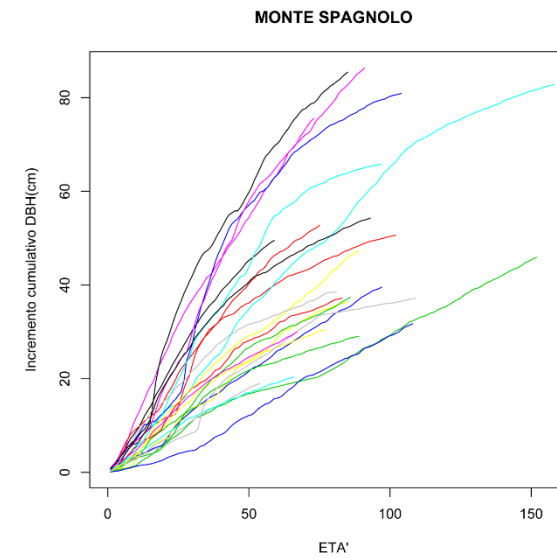
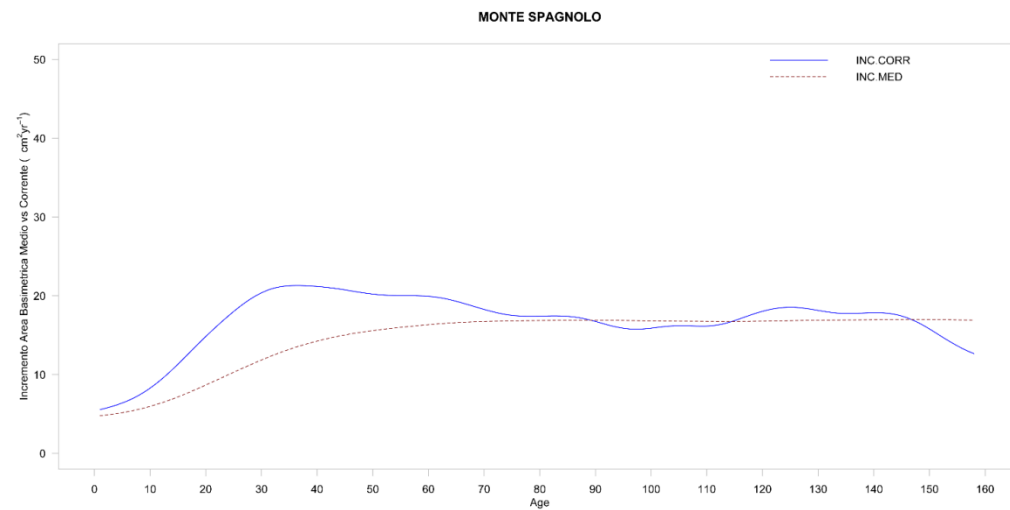


Figura 24 - Figura 22 – Il grafico di sx riporta le curve dell'incremento corrente di area basimetrica (Inc.Corr) e dell'incremento medio (Inc.Med) dei siti di SPA e SMA. A dx vengono riportate le storie auxologiche dei medesimi popolamenti. Le linee continue rappresentano l'incremento diametrico cumulado sotto corteccia.

La standardizzazione e la rimozione dell'autocorrelazione ha permesso di amplificare il segnale climatico presente nelle serie di crescita (Fig. 25). In un periodo comune che copre gli ultimi 70 anni dei quattro popolamenti, si nota che le curve sono tra loro ben sincronizzate in più tratti (1963-66 – 77 -79 - 91-95). È interessante focalizzare l'attenzione nei picchi minimi di produttività, comuni a tutte le cronologie negli anni 1978 e 1994, a conferma che siano stati fattori climatici a limitare la crescita delle piante. Un vistoso calo di produttività seguito da una forte ripresa l'anno successivo, si può anche notare negli anni 1981 – 1982 a SMA. Questo fenomeno con molta probabilità può essere spiegato in coincidenza di un'attività parossistica dell'Etna, che in quell'anno ha interessato il versante NW del vulcano e di cui le colate laviche hanno lambito la “dagala” del Monte S.Maria così come descritto in Branca & Del Carlo (2005).

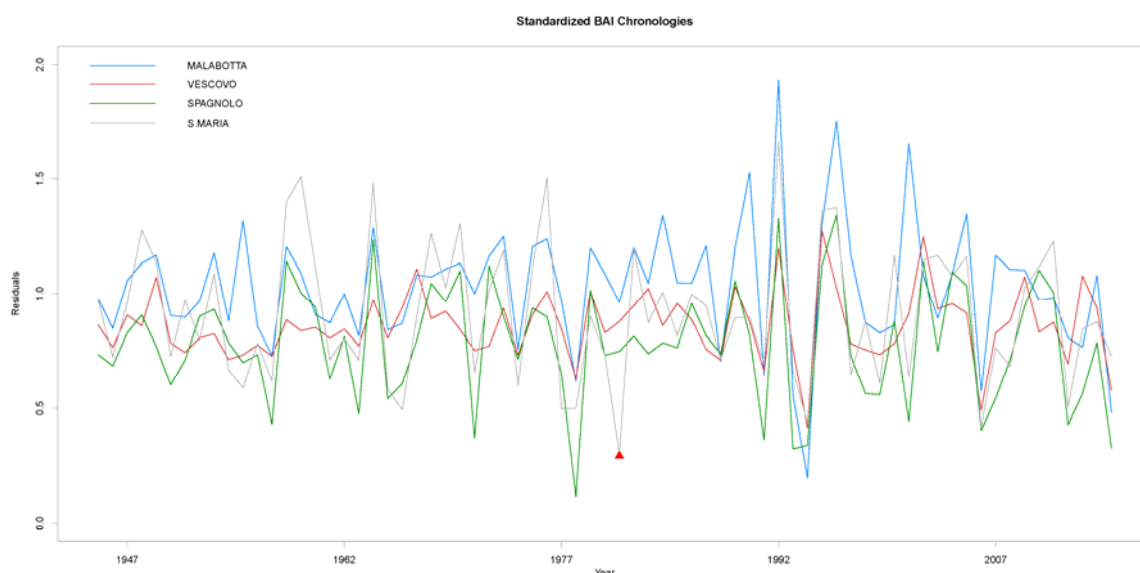


Figura 25 - Cronologie standardizzate di incremento di area basimetrica (BAI) dei popolamenti indagati. Il triangolo in rosso indica l'anno in cui è avvenuta l'eruzione che ha interessato quella zona.

L'interpretazione delle le variazioni di crescita di media frequenza (11 anni) nella finestra temporale comune 1957-2013, mostrano nei tre siti in cui le cronologie sono più ampie, una certa sincronia stagionale nell'andamento del BAI (Fig. 26). Si può notare come le fluttuazioni avvengano a scala sotto decennale con un trend praticamente assente nei siti di SMA, SPA e MAL. In VES invece, in cui l'età media del popolamento è la più bassa della rete siciliana, si nota bene un trend auxologico positivo legato, fondamentalmente, alle passate utilizzazioni che hanno interessato il sito. Questi valori, confrontati con i valori medi dell'indice SPI nel periodo di aridità estiva, mostrano bene come le variazioni di crescita diametrica siano direttamente collegate a questo particolare periodo. Infatti, ai periodi in cui si sono verificati i

picchi minimi di produttività (1978 e 1994) corrispondeva un inaridimento del clima. Al contrario, un clima estivo più umido favorisce la crescita. Una forte attenzione va posta invece all'andamento dell'aridità nell'ultimo periodo temporale (2010 in avanti). Infatti la curva di SPI media dei mesi estivi (Giugno – Luglio – Agosto) mostra che le precipitazioni estive siano aumentate invertendo il loro trend, mentre lo stesso indice del solo mese di maggio, soprattutto nell'ultima decade, sia in costante discesa.

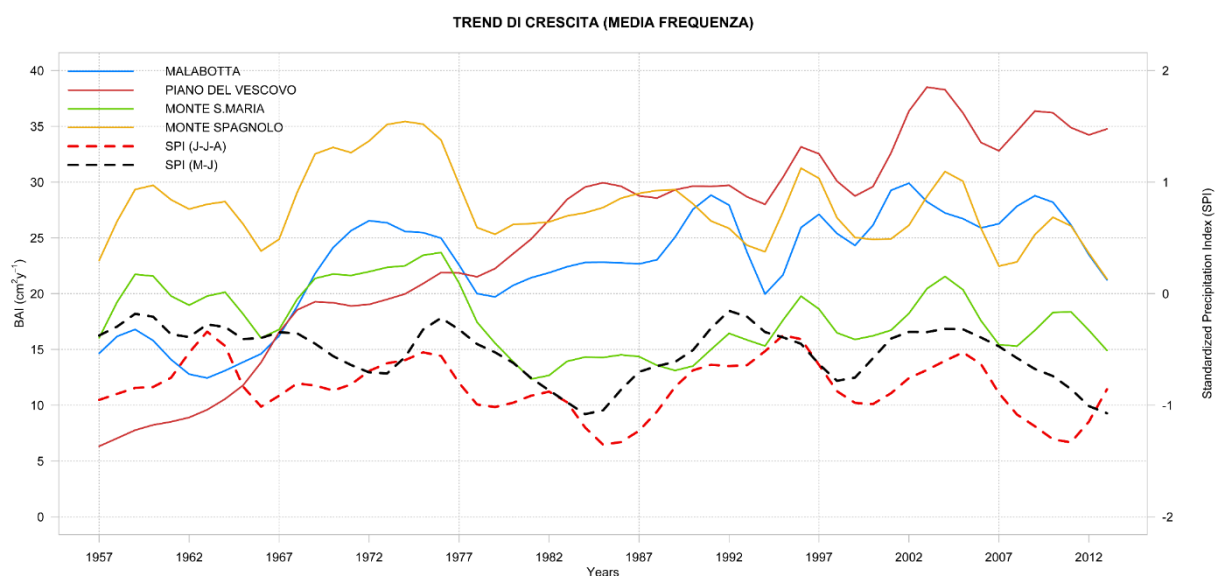
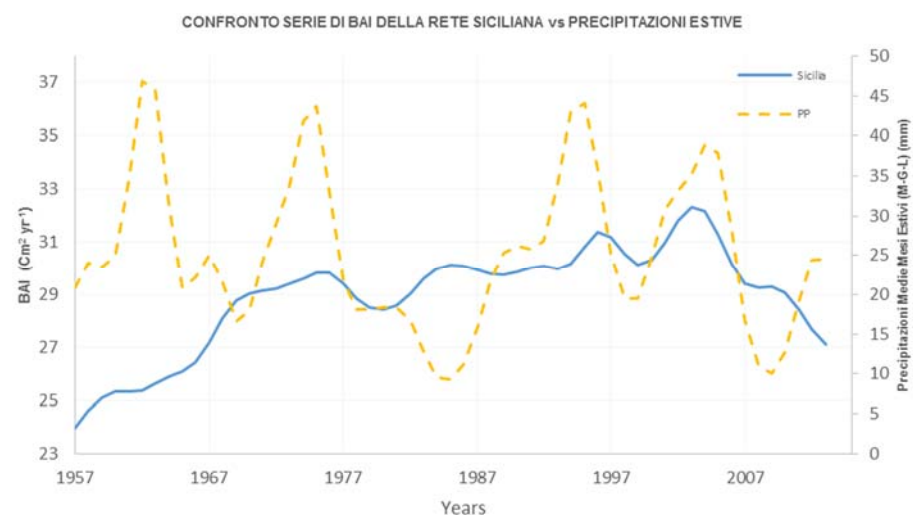
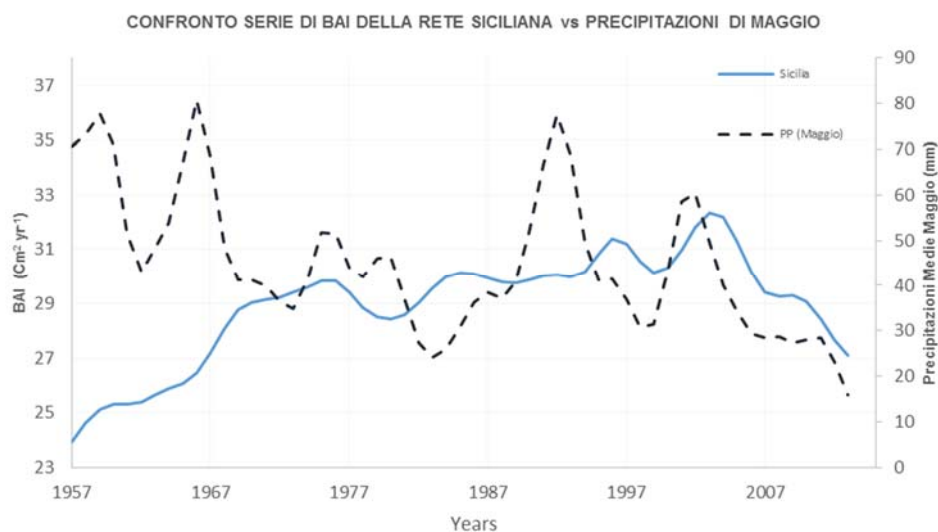


Figura 26 – Rappresentazione dei trend di crescita di BAI dei siti siciliani nel periodo comune 1957 – 2013 confrontate con l'andamento medio dell'indice SPI nel periodo di aridità estiva (Giugno – Luglio – Agosto) rappresentata dalla curva tratteggiata rossa e nel solo mese di maggio (curva tratteggiata nera).

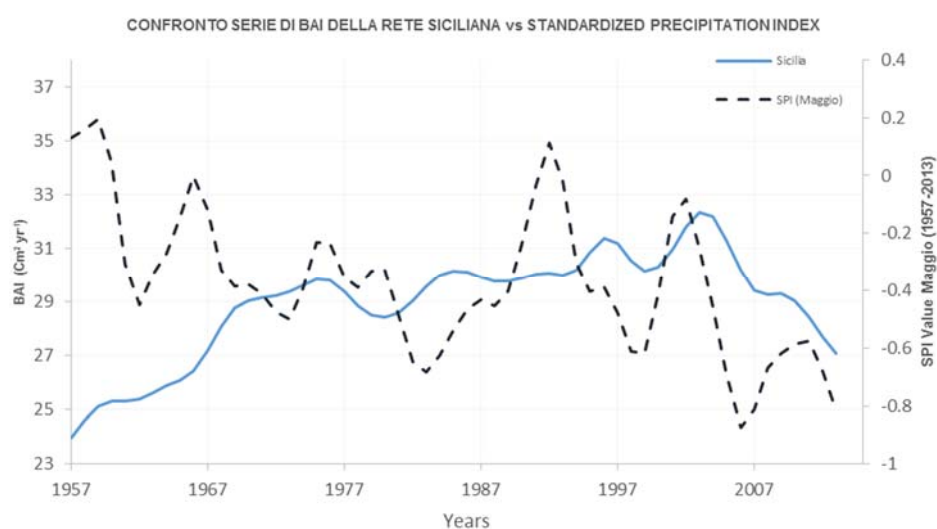
Il confronto della serie regionale con i parametri di precipitazione nel periodo di aridità estiva, conferma che, nonostante le precipitazioni siano aumentate le piante non abbiano risposto positivamente incrementando la loro crescita (Fig. 27). Questo dato è confermato dall'aumento della siccità nel periodo tardo primaverile, dimostrato dalla diminuzione delle precipitazioni nel mese di maggio negli ultimi anni e di conseguenza dall'aumento del livello di aridità confermato dallo SPI. Quindi negli ultimi anni a determinare i livelli di crescita nel faggio è il livello di aridità nel periodo concomitante tra la fine della primavera e l'inizio dell'estate e non più il livello di precipitazioni estive.



a



b



c

Figura 27 – Confronti dell'andamento del BAI della rete siciliana con (a) precipitazioni medie del periodo di aridità estivo (Giugno – Luglio – Agosto); (b) con il regime pluviometrico del solo mese di maggio e (c) con l'indice di aridità estiva (SPI).

Infine, dal confronto degli andamenti di BAI nell'intera rete (Fig. 28) si nota un trend di crescita abbastanza simile tra le faggete siciliane e le faggete montane. Rispetto a queste ultime però, le faggete siciliane hanno un tasso di crescita inferiore e, soprattutto dal 2003 in avanti hanno intrapreso un forte calo di produttività.

Nelle faggete altimontane invece il periodo di calo ha avuto inizio dal 2007 in avanti. Le faggete collinari invece hanno avuto un andamento ondulatorio ma nel complesso decrescente. Due cali importanti di produttività si sono verificati a partire dagli anni 1978 e 1998, con molta probabilità dovute al variare dei fattori climatici connessi con il *Global Warming*.

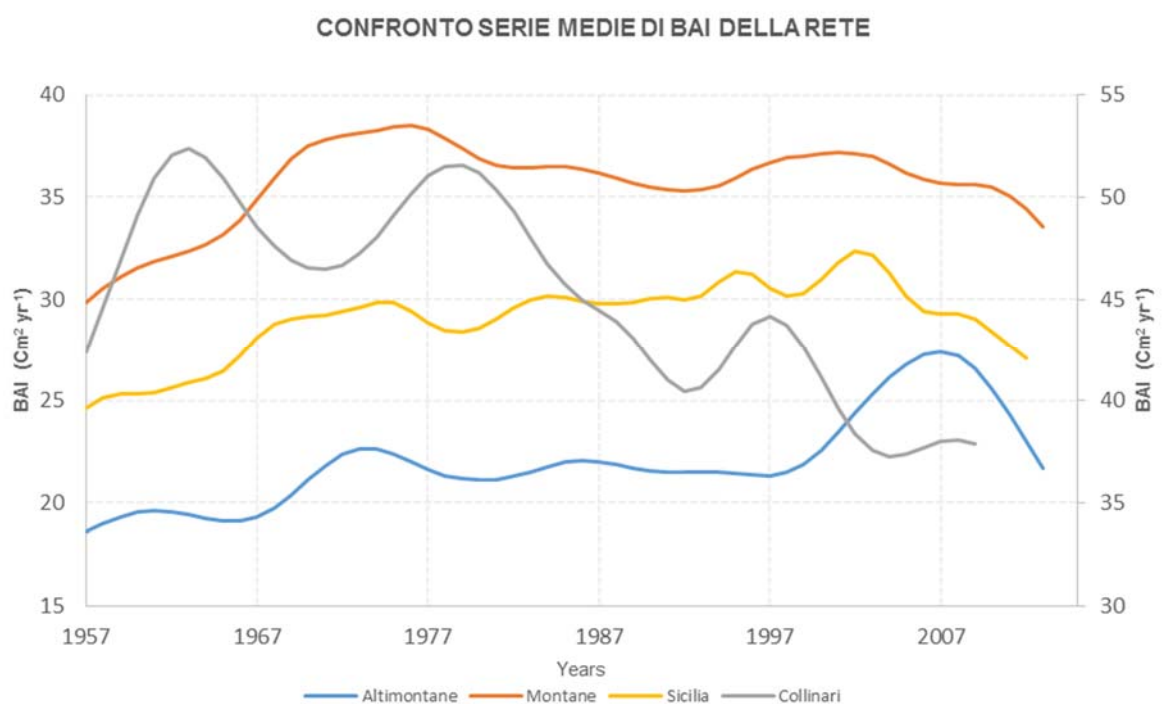


Figura 28 – Confronto dei trend di BAI nell'intera rete dendroecologica del faggio. Nell'asse secondario vengono riportati i valori per le serie collinari.

4. *DISCUSSIONE*

La ricerca effettuata ha fatto emergere che le faggete poste al limite dell'areale di diffusione della specie attualmente non racchiudono alberi di spiccata longevità. Infatti le piante più longeve che sono state trovate in questa campagna di rilievi sono quelle presenti nel sito etneo di SPA (152 anni). Il dato cronologico è simile a quello riportato in un precedente lavoro (Castorina et al. 2005) sul faggio dell'Etna, con età massime riscontrate di 157 anni a quote superiori rispetto ai siti indagati. Per il sito del bosco di Malabotta invece l'età massima riscontrata è di 115 anni, che rappresenta la prima informazione di questo genere, poiché non esistono, ad oggi, studi del genere effettuati in questo settore della Sicilia settentrionale. L'assenza di alberi particolarmente longevi è da ricondurre innanzitutto alla pressione antropica che negli ultimi secoli ha fortemente condizionato i boschi della Sicilia.

Confrontando questi dati con quelli della rete dendroecologica nazionale si trovano stazioni con cronologie ben più longeve, come per esempio i siti di Valle Cervara Bassa (1600 m s.l.m.) e Valle Cervara Alta (1800 m s.l.m.) con età rispettivamente di 435 e 503 anni (Piovesan et al. 2005; Schirone et al. 2005) e del Monte Terminillo (1550 m s.l.m.) (307 anni) (Di Filippo et al. 2003). Questi dati cronologici dimostrano che, a differenza di quanto si pensava, il faggio possa raggiungere e superare la soglia di 250 anni (Schweingruber 1993) e soprattutto che, ad alte quote vi sono maggiori possibilità di trovare piante longeve, poiché su di esse influiscono i ritmi di crescita ridotti, ma più costanti nel tempo ed un minor disturbo antropico poiché le aree si presentano meno accessibili (Di Filippo 2002; Martinez Del Castillo et al. 2016).

Per capire la capacità della pianta a reagire a stimoli climatici di breve periodo, con immediate variazioni incrementali, è stato utilizzato il parametro della sensitività media (MS), di cui il valore più basso è risultato quello di VES (0.235). Essendo questo sito quello posto al limite inferiore dell'areale di distribuzione, dovrebbe avere un valore di MS superiore, poiché quei popolamenti posti al limite del loro areale geografico (o altitudinale) dovrebbero risultare più sensibili (Di Filippo 2002) e maggiormente adatti per la conduzione di indagini dendroclimatiche e di ricostruzione del clima (Fritts 1976). Questo valore può essere spiegato con le condizioni strutturali di cui gode il popolamento. Trattandosi infatti del popolamento più giovane della rete e derivando da vecchi cedui abbandonati, probabilmente è ancora influenzato dalla spinta di crescita derivata dalla questa forma di governo che fa sì che le piante, soprattutto in una prima fase giovanile, non risentano particolarmente dei cambiamenti climatici. Confrontato comunque con gli altri valori riscontrati all'interno della rete, si pone in una

posizione centrale tra 0.31 del sito di Foresta Umbra e 0.14 di Monte Petrella (Piovesan et al. 2005).

Il valore del coefficiente di autocorrelazione di primo ordine (AR) più alto (0.741) si trovato a SPA. Questo risultato conferma di quanto già affermato da Biondi and Visani (1996) e Piovesan et al. (2005), ovvero che l'aumento di questo fattore si ottiene nel momento in cui è presente uno sviluppo strutturale del popolamento. Questo infatti rappresenta il sito della rete siciliana cronologicamente più lungo e quello che si trova nelle condizioni strutturali migliori rispetto al resto dei siti indagati, probabilmente dovuto ad un minor impatto (soprattutto di natura antropica) avvenuto in passato.

Dalle analisi delle funzioni di correlazione, si è notato che la crescita del faggio è condizionata dal regime pluviometrico mediterraneo. Ovvero le piogge aiutano la crescita della pianta se sono presenti in modo più abbondante nei mesi di luglio e dicembre dell'anno precedente ed a giugno e agosto dell'anno in cui si ha la formazione dell'anello di crescita. Mentre le alte temperature influiscono negativamente nel mese di novembre dell'anno prima che si formi l'anello e nei mesi di giugno ed agosto dell'anno di formazione. Queste stesse risposte climatiche, soprattutto quelle che prevedono la necessità di piogge nel mese di giugno in cui si ha la crescita, vengono ritrovate anche in altri siti europei (Tegel et al. 2014; Scharnweber et al. 2013; Van der Maaten 2012;). Anche in popolamenti che entrano a far parte della rete dendroecologica italiana (Monte Cimino e Valle Cervera) si trovano queste risposte positive (Piovesan et al. 2008).

Le funzioni di correlazioni su finestre mobili hanno dimostrato ancora una volta che i fattori climatici influenzano in modo non stabile la crescita del faggio nell'area mediterranea (Piovesan et al. 2005). Il periodo di siccità estiva è il fattore climatico chiave, in particolare nel centro – sud Italia (Piovesan et al. 2005), dimostrato dal fatto che, su tutta la finestra temporale analizzata, la presenza delle precipitazioni nel mese di agosto sia presente. Questo stesso segnale si ritrova in lavori simili effettuati nel faggio in Basilicata (Rita et al. 2014).

Diversi studi svolti in paesi europei specificano che la disponibilità di acqua durante le stagioni estive, sia negli anni precedenti la crescita che in quelli in cui si ha la formazione dell'anello, rappresenterà il principale fattore limitante la crescita radiale del faggio (Dittmar et al. 2003; Lebourgeois et al. 2005; Drobyshev et al. 2008; Friedrichs et al. 2009a (a); Friedrichs et al. 2009b; Scharnweber et al. 2013; Weber et al. 2013)

In pratica, analizzando la risposta ottenuta nella rete dendroecologica siciliana, si è notata una non stazionarietà della risposta della pianta a fine primavera inizio estate, con anticipazione nell'ultimo decennio dello stress idrico dal mese di giugno a quello di maggio.

Questa rappresenta una conferma a quelle ipotesi già fatte da altri autori in studi riguardanti le interazioni clima crescita del faggio (Biondi and Visani 1996; Piovesan and Schirone 2000; Piovesan et al. 2003; Piovesan et al. 2008) per cui in seguito al riscaldamento climatico vi è un'anticipazione fenologica che determina già a maggio la necessità di precipitazioni al fine di alleviare lo stress idrico.

L'utilizzo dell'indice SPI, utilizzato anche in altri lavori a livello europeo (Pasho et al. 2012), si è dimostrato utile alla comprensione di un trend crescente di inaridimento del clima che sta avvenendo nell'ultimo decennio. Si conferma che per le specie che si trovano in ambiente Mediterraneo, sono le precipitazioni il principale motore che guida la crescita (Pasho et al. 2012).

Le mappe sinottiche di correlazione tra i punteggi della PC1 e le precipitazioni nella finestra temporale 1957 – 2013 hanno mostrato l'esistenza di due macro regioni distinte con le Alpi che ben delineano il confine. Questo mostra la presenza di due bioclimi opposti. Ovvero esiste una correlazione inversa tra la regione bioclimatica italiana – Mediterranea e quella settentrionale – continentale. Questo trova ulteriore conferma da quanto descritto da Piovesan et al. (2005) e Pignatti, (1979) per studi che riguardano la vegetazione e di altri autori (Brunetti et al., 2004) per studi climatici.

Le analisi mostrate in figura 15 che prendevano in considerazione una finestra temporale iniziata nel 1967, fanno vedere l'attivazione di uno *shift* climatico, a conferma che il mese di maggio assume una notevole importanza nell'ecologia del faggio (Biondi & Visani 1996; Piovesan & Schirone 2000; Piovesan et al. 2003; Piovesan et al. 2008; Rita et al., 2014).

L'attivazione di questo *shift* dimostra una specificità nell'ecologia delle faggete siciliane. In questo periodo di tempo, quando sono presenti fenomeni di siccità in Sicilia non sono presenti in altre zone presenti nella rete. Questo particolare segnale è presente infatti solamente nelle faggete della rete siciliana poste al limite latitudinale dell'areale ed in altri lavori riguardanti le faggete presenti in centro Italia e che si trovano al limite altitudinale (Piovesan & Schirone, 2000; Piovesan et al., 2005).

Questo ha dimostrato che il mese di maggio rappresenta un mese cruciale per i processi fenologici della specie. La spiegazione di questo fenomeno può essere quella che, con il cambiamento del clima in atto, il faggio sta sviluppando un adattamento ecologico, anticipando i suoi processi di crescita al fine di poter contrastare i fenomeni siccitosi che sempre più si stanno accentuando.

Dall'analisi dei trend di produttività, invece si è notato che, dopo un periodo stazionario, il trend di crescita di aria basimetrica nel faggio ha imboccato un preoccupante declino,

sincronizzato alle crescenti condizioni di stress idrico. Queste forti riduzioni nella crescita, dovute a forti incrementi dello stress idrico, soprattutto in popolazioni che si trovano in situazioni limite (altitudinali e/o latitudinali) sono state ritrovate anche in altri lavori svolti sul faggio che si trova nelle regioni meridionali della Spagna (Vai et al, 2006) ed in Italia (Piovesan et al. 2008b). Tegel et al., (2014) riportano invece un dato in controtendenza, avendo registrato un aumento della crescita del faggio, in stazioni poste al limite di distribuzione sud-orientale alla penisola balcanica. Tutte queste analisi suggeriscono che la diminuzione della crescita osservata è causata da un generale riscaldamento delle temperature e che le precipitazioni non riescono appieno a sopperire, non riuscendo così a mitigare queste situazioni di forte carenza idrica. Per cui la crescita del faggio presente in tutte le zone poste al limite inferiore dell'areale di distribuzione è fortemente limitata dalla siccità (Biondi & Visani, 1996; Biondi, 1993; Dittmar et al., 2003; Lebourgeois et al., 2005; Piovesan et al., 2003).

Da non sottovalutare anche il fatto che, la maggior parte delle stazioni indagate si ritrovano a vegetare lungo le pendici di un vulcano ancora attivo. Quindi anche le attività di crescita, a parità di condizioni climatiche, possono essere influenzate dalle attività del vulcano. Alcuni studi in merito realizzati su *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch sul vulcano Lonquimay in Cile, mostrano una diminuzione media di larghezza degli anelli degli alberi a seguito di una eruzione avvenuta nel 1988-1990. Gli autori spiegano che molto probabilmente questa flessione nella crescita è stata causata dalle condizioni ecologiche che si sono modificate a causa delle piogge acide e della deposizione di cenere vulcanica (Tognetti et al. 2012).

Dalla *cluster analysis*, le faggete della rete siciliana messe a confronto con quelle già presenti nella rete nazionale rientrano in un gruppo di faggete montane coerentemente con quanto affermato da Piovesan et al., (2005). Gli autori riportano che le faggete poste latitudinalmente in zone centrali e meridionali della penisola italiana si distinguono nettamente dalle stazioni alpine del Nord Italia (Piovesan et al. 2005).

In questo quadro di cambiamento climatico però, soprattutto con l'anticipazione delle di tutti i processi fenologici (Wolf et al. 2016), si nota bene nelle faggete siciliane, una forte strategia di acclimatazione. Viene in questo senso confermato il ruolo di sentinella ecologica di questi ecosistemi che per primi stanno rispondendo ad un clima via via più caldo e quindi arido. Successivi monitoraggi nei prossimi anni saranno necessari per comprendere il limite di acclimatazione che potrebbe portare a diffusi fenomeni di deperimento come è avvenuto in Spagna (Jump et al. 2006). Allo stesso tempo il riscaldamento con il tempo potrebbe spingere il faggio a migrare verso climi più freschi e temperati e verso quote superiori. In questo senso

sarà molto interessante verificare la risposta del faggio in quota non solo in termini dendroecologici ma anche di possibile espansione della popolazione etnense.

5. CONCLUSIONI

In conclusione, si può affermare come lo studio dendroecologico ancora una volta si sia rivelato un ottimo strumento per descrivere il dinamismo di crescita di una specie forestale, quale il faggio, che si trova al limite dell'areale di distribuzione.

L'aspetto più interessante emerso studiando queste popolazioni, è stato quello di aver ritrovato nel gruppo delle faggete montane, in cui rientrano anche le stazioni della rete dendroecologica siciliana, un chiaro segnale di come queste popolazioni comincino a soffrire lo stress idrico già nel mese di maggio, in anticipo rispetto al resto delle faggete rientranti nel medesimo gruppo nella rete dendroecologica nazionale. Questo stesso segnale infatti, è stato già descritto in precedenza, ma per stazioni che si trovano in una fascia bioclimatica inferiore ovvero quella delle faggete collinari (Piovesan et al. 2003; Di Filippo et al. 2007; Piovesan et al. 2008b). La principale conseguenza è stata quindi un'acclimatazione della specie alle nuove condizioni bioecologiche fino ad arrivare al momento in cui, comincerà una lenta ma costante migrazione di queste formazioni forestali verso quote superiori in cerca di rifugio e di migliori condizioni ecologiche.

L'aver potuto ancor di più comprendere la strategia fenologica che la specie contrappone alle variazioni climatiche in questi ambienti, rappresenta un aspetto importante al fine di una buona programmazione di tutte le strategie per la gestione, mantenimento e conservazione della biodiversità. Fondamentalmente, capire meglio le dinamiche e le esigenze di cui il faggio necessita in queste situazioni "particolari", fornisce informazioni utili che possono richiamare l'attenzione al problema, molto complesso, del *global warming* e, quindi, cercare di porre in tempo i giusti rimedi.

Inoltre, il dato ricavato dall'analisi dendroecologica rappresenta un dato reale e puntuale di una determinata specie che si trova in un preciso momento storico. Un ulteriore sviluppo auspicabile in questo campo della ricerca, così come già sperimentato da Alessandrini et al., (2010), sarebbe quello di poter integrare i dati ricavati al suolo (con le tecniche dendrocronologiche) con indici derivati dall'utilizzo delle tecniche del *remote sensing* (es. NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*). Queste nuove tecniche potrebbero rappresentare il punto di svolta per capire meglio le dinamiche di crescita e di produttività in un clima che sta cambiando e le relative risposte della vegetazione. Anche il faggio del Monte Etna negli ultimi anni, nonostante la capacità di acclimatarsi, sta mostrando un decremento della produttività confermando quindi che nell'area mediterranea in diverse situazioni è in atto un processo di *browning* (Verbyla 2008; de Jong et al. 2012). Poiché recentemente è stato

riproposto il *greening* (Zhu et al. 2016) per le foreste mediterranee, futuri studi sono necessari per riconciliare i risultati dendroecologici con quelli di *remote sensing*.

6. BIBLIOGRAFIA

- Alessandrini A, Vessella F, Di Filippo A, et al (2010) Combined dendroecological and normalized difference vegetation index analysis to detect regions of provenance in forest species. *Scand J For Res* 25:121–125. doi: 10.1080/02827581.2010.485776
- Alessandrini A, Biondi F, Di Filippo A, et al (2011) Tree size distribution at increasing spatial scales converges to the rotated sigmoid curve in two old-growth beech stands of the Italian Apennines. *For Ecol Manage* 262:1950–1962. doi: 10.1016/j.foreco.2011.08.025
- Aniol RW (1987) A new device for Computer Assisted Measurement of Tree-Ring Widths. *Dendrochronologia* 5:135–141.
- Aniol RW (1983) Tree-ring analysis using CATRAS. *Dendrochronologia* 1:45–53.
- Biondi F (1993) Climatic signals in tree rings of *Fagus sylvatica* L. from the central Apennines, Italy. *Acta Oecologica* 14:57–71.
- Biondi F (1992) Developement of a tree-ring network for the italian peninsula. *Tree-ring Bull* 52:15–29.
- Biondi F (2000) Are Climate-Tree Growth Relationships Changing in North-Central Idaho, U.S.A.? *Arctic, Antarct Alp Res* 32:111. doi: 10.2307/1552442
- Biondi F, Visani S (1996) Recent developments in the analysis of an Italian tree-ring network with emphasis on European beech (*Fagus sylvatica* L.). In: Dean J, Meko D, Swetnam T (eds) *Tree rings, Environment and Humanity, Radiocarbon*. pp 713–725
- Blasing TJ, Solomon AM, Duvick DN (1984) Response Functions Revisited. *Tree-Ring Bull* 44:1–15.
- Bradley RS (2014) *Paleoclimatology*, 3rd ed. Academic Press
- Branca S, Del Carlo P (2005) Types of eruptions of Etna volcano AD 1670-2003: Implications for short-term eruptive behaviour. *Bull Volcanol* 67:732–742. doi: 10.1007/s00445-005-0412-z
- Briffa KR (1995) Interpreting High-Resolution Proxy Climate Data - The Example of Dendroclimatology. In: *Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques*, Eds. H. vo. Springer, Berlin, pp 77–94
- Brunetti M, Buffoni L, Mangianti F, et al (2004) Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. *Glob Planet Change* 40:141–149. doi: 10.1016/S0921-8181(03)00104-8
- Bunn AG (2008) A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26:115–124. doi: 10.1016/j.dendro.2008.01.002

- Campelo F, García-González I, Nabais C (2012) DetrendeR - A Graphical User Interface to process and visualize tree-ring data using R. *Dendrochronologia* 30:57–60. doi: 10.1016/j.dendro.2011.01.010
- Castorina R, Di A, Piovesan G (2005) Dendroecological analysis of beech (*Fagus sylvatica* L.) on Mount Etna Natural Park (Sicily, Italy). In: Eurodendro 2005 Abstract Book - 28 Settembre - 2 Ottobre 2005. Sette Città, VITERBO, p 44
- Chen K, Dorado-Liñán I, Akhmetzyanov L, et al (2015) Influence of climate drivers and the North Atlantic Oscillation on beech growth at marginal sites across the Mediterranean. *Clim Res* 66:229–242. doi: 10.3354/cr01345
- Cropper J (1984) Multicollinearity within selected western north American temperature and precipitation data sets. *Tree Ring Bull* 44:29–37.
- D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, Cherubini P (2008) On the “Divergence Problem” in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Glob Planet Change* 60:289–305. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.03.004
- De Jong R, Verbesselt J, Schaepman ME, de Bruin S (2012) Trend changes in global greening and browning: Contribution of short-term trends to longer-term change. *Glob Chang Biol* 18:642–655. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02578.x
- Di Filippo A (2002) Studio per una classificazione fitoclimatica delle faggete italiane su base dendroecologica. Università della Tuscia di Viterbo
- Di Filippo A, Biondi F, Ufar K, et al (2007) Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: Spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. *J Biogeogr* 34:1873–1892. doi: 10.1111/j.1365-2699.2007.01747.x
- Di Filippo A, Piovesan G, Schirone B (2003) La dendroecologia applicata alle foreste vetuste: il caso delle faggete italiane. In: Casagrandi R, Melià P (eds) Atti del XIII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia. Aracne - Roma, pp 49–54
- Dittmar C, Zech W, Elling W (2003) Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—a dendroecological study. *For Ecol Manage* 173:63–78. doi: 10.1016/S0378-1127(01)00816-7
- Drobyshev I, Niklasson M, Eggertsson O, et al (2008) Influence of annual weather on growth of pedunculate oak in southern Sweden. *Ann For Sci* 65:512–512. doi: 10.1051/forest:2008033
- Friedrichs DA, Bntgen U, Frank DC, et al (2009a) Complex climate controls on 20th century oak growth in Central-West Germany. *Tree Physiol* 29:39–51. doi: 10.1093/treephys/tpn003

- Friedrichs DA, Trouet V, Büntgen U, et al (2009b) Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees - Struct Funct* 23:729–739. doi: 10.1007/s00468-009-0315-2
- Fritts HC (1976) *Tree rings and climate*. Elsevier
- Fritts HC, Swetnam TW (1989) Dendroecology: A Tool for Evaluating Variations in Past and Present Forest Environments. *Adv Ecol Res* 19:111–188. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60158-0
- Gentilesca T, Todaro L (2008) Tree-ring growth and climate response of silver fir (*Abies alba* Mill.) in Basilicata (Southern Italy). *For - Riv di Selvic ed Ecol For* 5:47–56. doi: 10.3832/efor0505-0050047
- Grissino-Mayer HD (2001) Research Report Evaluating Crossdating Accuracy : a Manual and Tutorial for the Computer Program Cofecha. *Tree-Ring Res* 57:205–221.
- Guijarro JA (2011) Climatol: some tools for climatology: series homogenization, plus windrose and Walter & Lieth diagrams. R package version 2. 1.
- Gutiérrez E (1988) Dendroecological study of *Fagus sylvatica* L. in the Montseny mountains (Spain). *Acta Oecologica – Oecologia Plant* 9:301–309.
- Hammer Ø, Harper DAT, Ryan PD (2001) PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. v.2.17. *Palaeontol Electron* 4(1): 9pp. doi: 10.1016/j.bcp.2008.05.025
- Hoffman A (1960) *Il faggio in Sicilia*. Gianasso, Milano
- Holmes RL (1983) Computer-assisted quality control in tree- ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull* 43:69–78.
- Jalas J, Suominen J (1973) *Atlas Florae Europaeae*. Distribution of Vascular Plants in Europe. Gymnospermae Pinaceae to Ephedraceae. The Committee for Mapping the Flora of Europe & Societas Biologica Fennica Vanamo, Helsinki
- Jolliffe IT (1986) *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag - New York.
- Josemir N (2012) spi: Compute SPI index. R package version 1.1.
- Jump AS, Hunt JM, Peñuelas J (2006) Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Glob Chang Biol* 12:2163–2174. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01250.x
- Lebourgeois F, Bréda N, Ulrich E, Granier A (2005) Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees* 19:385–401.
- Lebourgeois F, Mérian P, Courdier F, et al (2012) Instability of climate signal in tree-ring width

- in Mediterranean mountains: A multi-species analysis. *Trees - Struct Funct* 26:715–729. doi: 10.1007/s00468-011-0638-7
- Mariani L, Failla O (2007) Le grandezze meteorologiche come variabili guida per gli ecosistemi agricoli e forestali.
- Martinez Del Castillo E, Longares LA, Gričar J, et al (2016) Living on the Edge: Contrasted Wood-Formation Dynamics in *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* under Mediterranean Conditions. *Front Plant Sci* 7:370. doi: 10.3389/fpls.2016.00370
- Maxime C, Hendrik D (2011) Effects of climate on diameter growth of co-occurring *Fagus sylvatica* and *Abies alba* along an altitudinal gradient. *Trees - Struct Funct* 25:265–276. doi: 10.1007/s00468-010-0503-0
- Mercurio R, Spampinato G (2008) Esperienze di monitoraggio nella Riserva Naturale Integrale nel Parco dell'Etna. (Monitoring in the Strict Natural Reserve of the Mount Etna Park (Sicily). Ediguida, Cava dei Tirreni (SA). pp. 116. ISBN 978-88-903556-0-8.
- Mckee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *AMS 8th Conf Appl Climatol* 179–184. doi: citeulike-article-id:10490403
- Pasho E, Camarero JJ, de Luis M, Vicente-Serrano SM (2012) Factors driving growth responses to drought in Mediterranean forests. *Eur J For Res* 131:1797–1807. doi: 10.1007/s10342-012-0633-6
- Penuelas J, Boada M (2003) A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Glob Chang Biol* 9:131–140. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00566.x
- Pignatti S (1999) I boschi d'Italia. UTET, Torino
- Pignatti S (1979) I piani di vegetazione in Italia. *G Bot Ital* 113:411–428.
- Piovesan G, Bernabei M, Di Filippo A, et al (2003) A long-term tree ring beech chronology from a high-elevation old-growth forest of Central Italy. *Dendrochronologia* 21:13–22. doi: 10.1078/1125-7865-00036
- Piovesan G, Biondi F, Bernabei M, et al (2005) Spatial and altitudinal bioclimatic zones of the Italian peninsula identified from a beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring network. *Acta Oecologica* 27:197–210. doi: 10.1016/j.actao.2005.01.001
- Piovesan G, Biondi F, Di Filippo A, et al (2008a) Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Glob Chang Biol* 14:1265–1281. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01570.x
- Piovesan G, Biondi F, Di Filippo A, et al (2008b) Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Glob Chang Biol* 14:1265–1281. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01570.x

- Piovesan G, Schirone B (2000) Winter North Atlantic oscillation effects on the tree rings of the Italian beech (*Fagus sylvatica* L.). 121–127.
- Poli Marchese E (1982) Zonation altitudinale del la végétation de l'Etna comparée avec d'autres hauts volcans. *Ecol Mediterr* VII:339–354.
- Poli Marchese E, Patti G (2000) Carte della Vegetazione dell'Etna.
- Poli E, Ferlito N, Lo Giudice R (1979) La vegetazione della Valle San Giacomo (Etna). *Atti Acc Gioenia Sc Nat Catania* 10:135–148.
- Politis DN, Romano J (1994) The stationary bootstrap. *J Am Stat Assoc* 89:1303–1313.
- R Development Core Team (2009) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria
- Resco De Dios V, Fischer C, Colinas C (2007) Climate change effects on mediterranean forests and preventive measures. *New For* 33:29–40. doi: 10.1007/s11056-006-9011-x
- Rita A, Gentilesca T, Ripullone F, et al (2014) Differential climate-growth relationships in *Abies alba* Mill. and *Fagus sylvatica* L. in Mediterranean mountain forests. *Dendrochronologia*. doi: 10.1016/j.dendro.2014.04.001
- Scharnweber T, Manthey M, Wilmking M (2013) Differential radial growth patterns between beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on periodically waterlogged soils. *Tree Physiol* 33:425–437. doi: 10.1093/treephys/tpt020
- Schirone B, Pedrotti F, Spadae F, et al (2005) La hetraie pluri-seculaire de la vallee Cervara (Pare national des Abruzzes, Italie). 152:519–528.
- Schuster R, Oberhuber W (2013) Drought sensitivity of three co-occurring conifers within a dry inner Alpine environment. *Trees - Struct Funct* 27:61–69. doi: 10.1007/s00468-012-0768-6
- Schweingruber FH (1993) *Trees and Wood in Dendrochronology*, Springer V. New York
- Scuderi S (1825) *Trattato dei boschi dell'Etna*. Atti Accademia Gioenia, vol. I, II, III, Catania
- Stokes MA, Smiley TL (1968) *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Arizona Press, Tucson
- Swetnam TW, Allen CD, Betancourt JL (1999) Applied Historical Ecology: Using the Past To Manage for the Future. *Ecol Appl* 9:1189–1206. doi: 10.1890/1051-0761(1999)009[1189:AHEUTP]2.0.CO;2
- Tegel W, Seim A, Hakelberg D, et al (2014) A recent growth increase of European beech (*Fagus sylvatica* L.) at its Mediterranean distribution limit contradicts drought stress. *Eur J For Res* 133:61–71. doi: 10.1007/s10342-013-0737-7
- Tognetti R, Lombardi F, Lasserre B, et al (2012) Tree-ring responses in *Araucaria araucana* to

- two major eruptions of Lonquimay Volcano (Chile). *Trees - Struct Funct* 26:1805–1819. doi: 10.1007/s00468-012-0749-9
- Touchan R, Funkhouser G, Hughes MK, Erkan N (2005) Standardized precipitation index reconstructed from Turkish tree-ring widths. *Clim Change* 72:339–353. doi: 10.1007/s10584-005-5358-9
- Van der Maaten E (2012) Climate sensitivity of radial growth in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at different aspects in southwestern Germany. *Trees-Structure Funct* 26:777–788. doi: 10.1007/s00468-011-0645-8
- Verbyla D (2008) The greening and browning of Alaska based on 1982-2003 satellite data. *Glob Ecol Biogeogr* 17:547–555. doi: 10.1111/j.1466-8238.2008.00396.x
- Walter H, Lieth H (1960) Klimadiagramm Weltatlas. Gustav Fischer
- Weber P, Bugmann H, Pluess AR, et al (2013) Drought response and changing mean sensitivity of European beech close to the dry distribution limit. *Trees - Struct Funct* 27:171–181. doi: 10.1007/s00468-012-0786-4
- Wigley TML, Briffa KR, Jones PD (1984) On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23:201–213.
- Wolf S, Keenan TF, Fisher JB, et al (2016) Warm spring reduced carbon cycle impact of the 2012 summer drought. *Proc Natl Acad Sci U S A*. doi: 10.1073/pnas.1519620113
- Zang C, Biondi F (2015) Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography (Cop)* 38:431–436. doi: 10.1111/ecog.01335
- Zhu Z, Piao S, Myneni RB, et al (2016) Greening of the Earth and its drivers.

RINGRAZIAMENTI

Prima di iniziare con i ringraziamenti desidero fare una premessa. Ai tempi in cui stavo per terminare gli studi superiori ero titubante se continuare o meno con l'università. Però, una volta convinto, mi ero promesso di arrivare alla laurea triennale, così, per poter mettere prima del mio nome il titolo di “Dott.”. Poi però, una volta presa la triennale, l'appetito mi ha travolto e quindi mi ritrovo a scrivere ancora una volta una pagina finale di ringraziamenti. Questa volta però non sulla tesi della laurea magistrale (quella è già andata) bensì sulla tesi di dottorato, un termine che quando ho iniziato a studiare non ne conoscevo nemmeno l'esistenza, figuriamoci poterne intraprendere un cammino e portarlo fino in fondo.

Detto ciò, comincio a ringraziare la persona senza il quale non credo avrei mai intrapreso questa strada, quella sempre pronta a dare il consiglio al momento giusto, anche a volte in maniera “criptata” e quasi indecifrabile, il Prof. Roberto Mercurio. Un altro grazie di cuore va' a colui che mi ha seguito in questo percorso e che fino agli anni dell'Università di Reggio Calabria era solo una citazione in bibliografia, il Prof. Gianluca Piovesan.

Ovviamente in questa carrellata di grazie non può mancare lui, il fido scudiero, compagno di tante battaglie e che tra qualche mese mi renderà testimone attivo di un passaggio epocale nella sua vita, il mio “caro amico” Francesco Solano.

Poi un ringraziamento va' a lui, l'uomo che ha perso giornate e giornate intere a spiegarmi le basi fondamentali della dendrocronologia, senza il quale nulla di quello che ho scritto nel testo sarebbe stato possibile, ovvero il grande “Miky Unbalivable” Michele Baliva e poi a tutti coloro con i quali ho condiviso questa “avventura” viterbese e di cui non cito nessuno in particolare poiché rischierei di dimenticare qualcuno. Un grazie lo dedico anche alle persone come il Dott. Peppe Modica dell'Università di Reggio Calabria, per la stima che ha dimostrato nei miei confronti pur conoscendo la mia afferenza all'Università della Tuscia. E poi un grande GRAZIE va' a tutti coloro mi sono stati vicini in momenti certamente non belli che in questi tre anni si sono, aimè presentati, a cominciare dalla mia “Pupa” Stefania passando per mia mamma Paola e per finire agli amici Sandro Sirna e Marcello Libro per la disponibilità dimostrata ogniqualvolta ce ne fosse stata la necessità.

Mi permetto di concludere questa “paginetta” con degli assiomi che ho imparato circolando nelle stanze e nei laboratori della Tuscia, vale a dire che ogni problema è “*Fondamentalmente...molto complesso*”, che ci sono ricerche di “*Alto profilo*” e che, quando ti non ti funziona internet e devi necessariamente controllare la posta elettronica “*è in atto un complotto*”!!!!

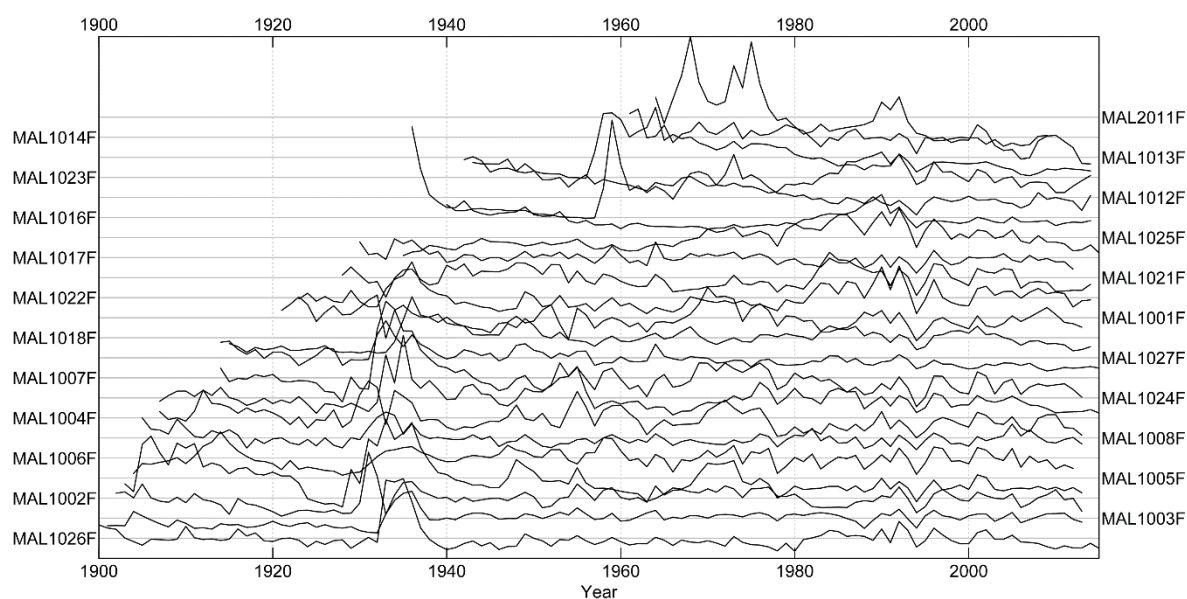
Grazie a tutti!!

Angelo

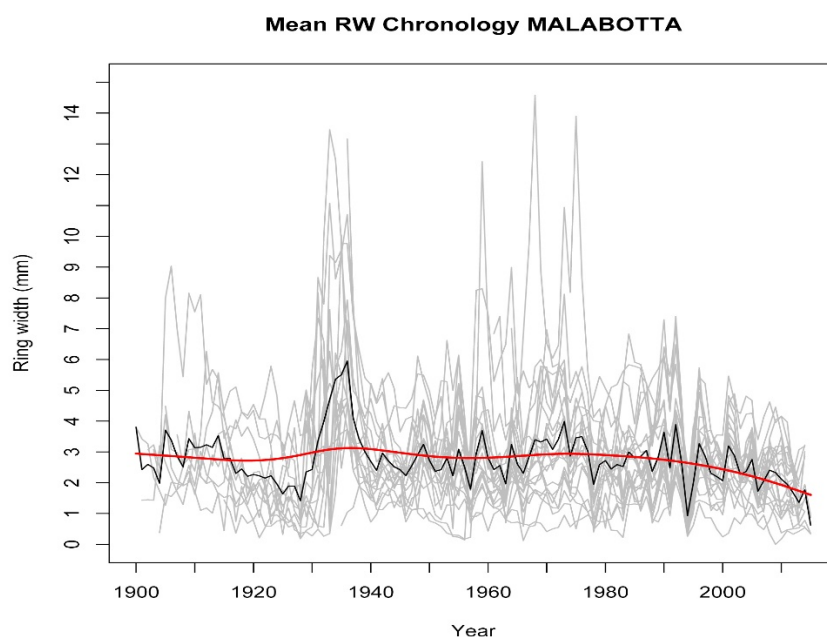
APPENDICI

Di seguito si riportano tutte le elaborazioni realizzate, che non hanno trovato spazio all'interno del testo principale ma che possono essere utili alla comprensione di specifici concetti citati nel testo. Si riportano tutte le elaborazioni relative ad ogni sito indagato.

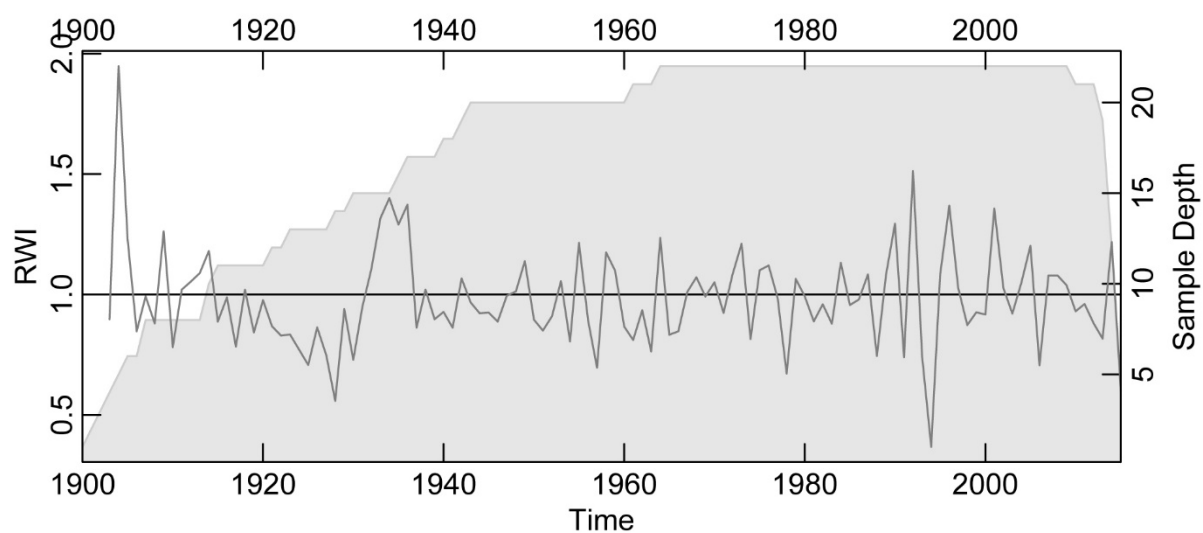
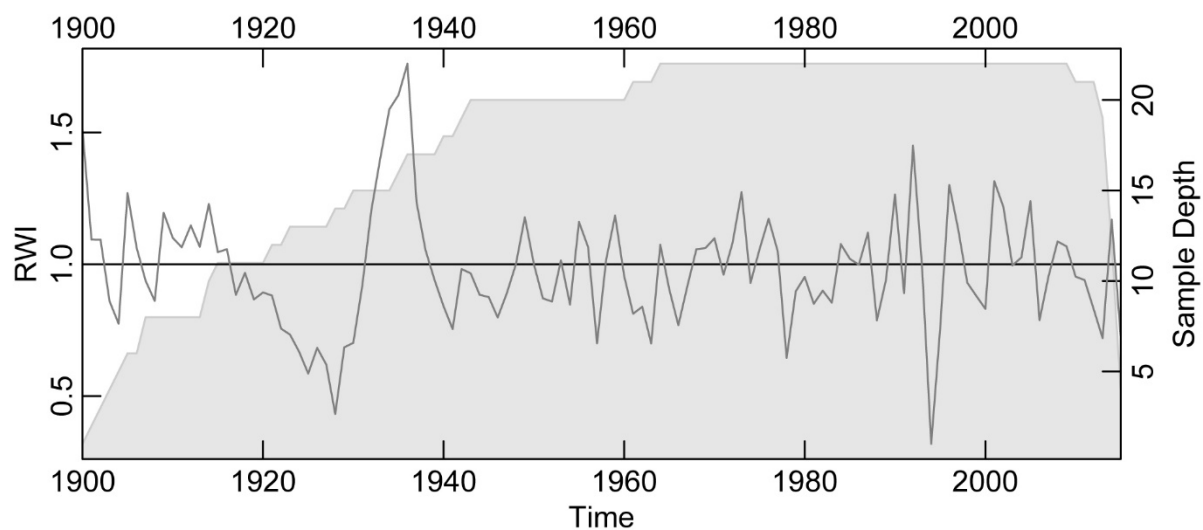
MALABOTTA



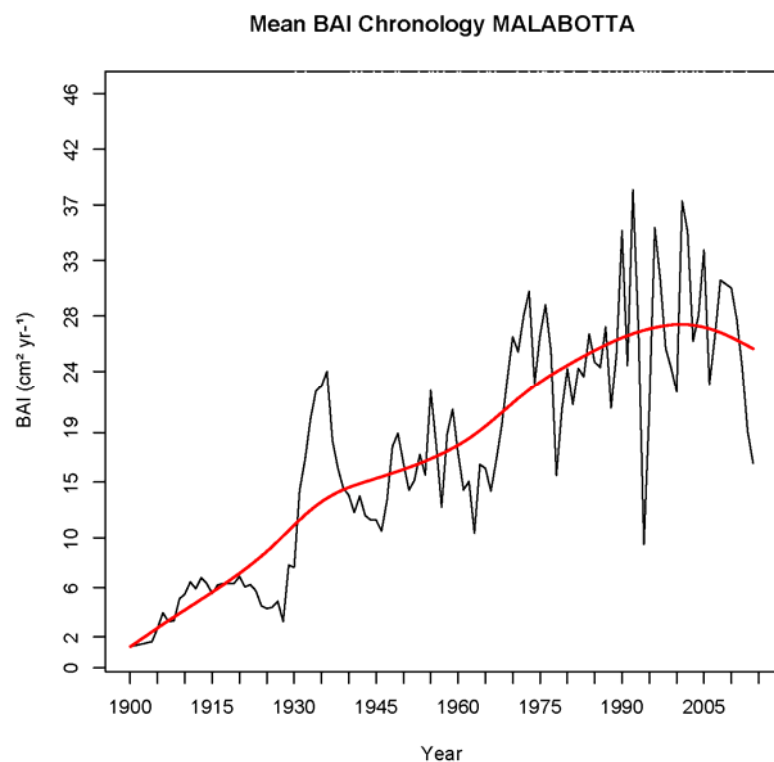
Appendice 1 – Spaghetti Plot delle serie dendrocronologiche del sito. I codici nell'asse presenti nell'asse Y identificandola singola pianta analizzata secondo il seguente criterio: Codice del sito(MAL), 10__ (ID della pianta), F (Specie analizzata)



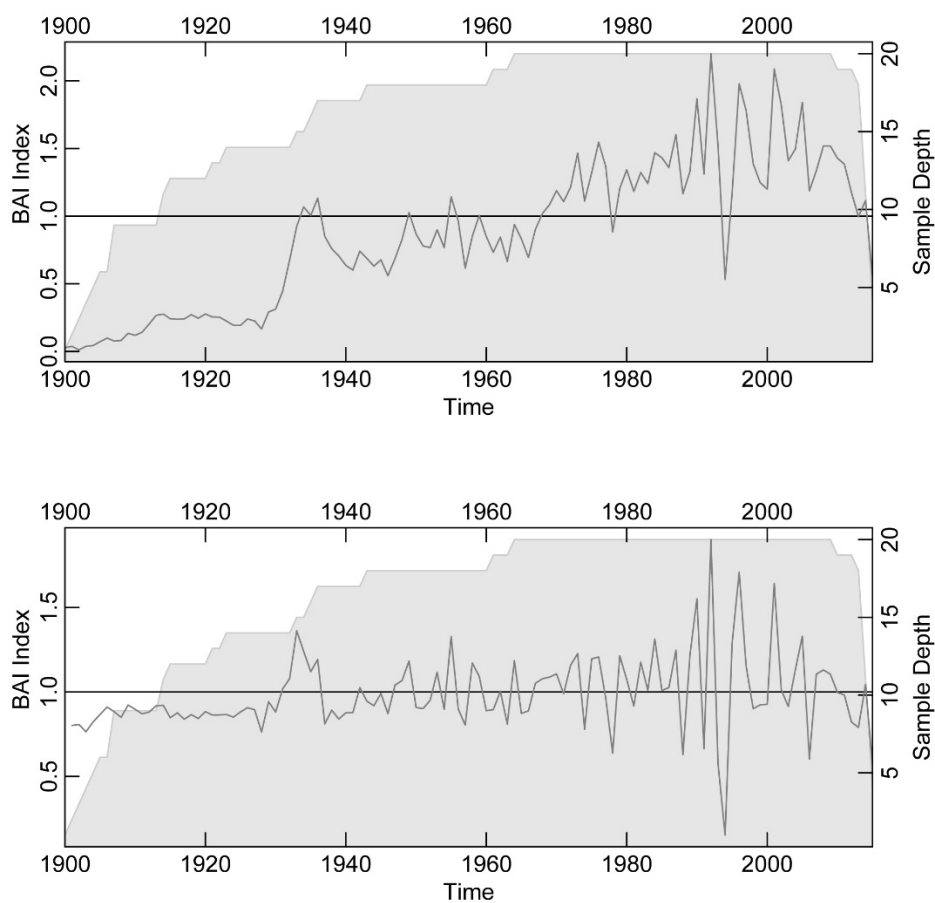
Appendice 2 - Cronologia media stagionale del sito. In grigio le singole cronologie, in nero viene riportata la cronologia stagionale, in rosso la spline che evidenzia il trend di medio-lungo periodo.



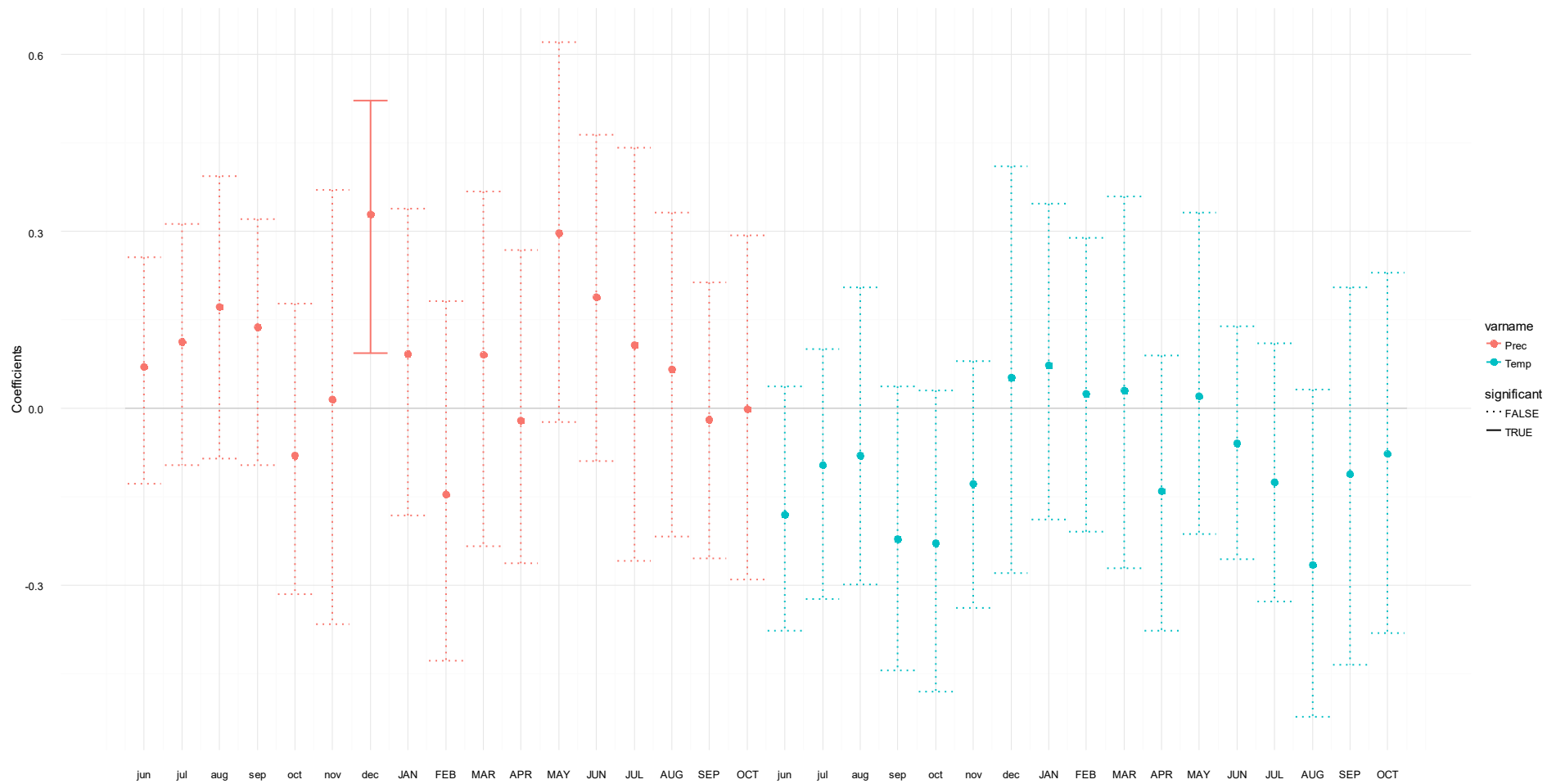
Appendice 3 - Cronologia standardizzata di RW (Ring Width) priva di trend di lungo periodo e con media uguale a 1 (Sopra). Cronologia residua a cui è stata rimossa l'autocorrelazione (Sotto). L'asse secondario riporta il numero di campioni.



Appendice 4 - Cronologia media stagionale di BAI (Basal Area Increment) del sito. In nero viene riportata la cronologia stagionale, in rosso la spline che evidenzia il trend di medio-lungo periodo

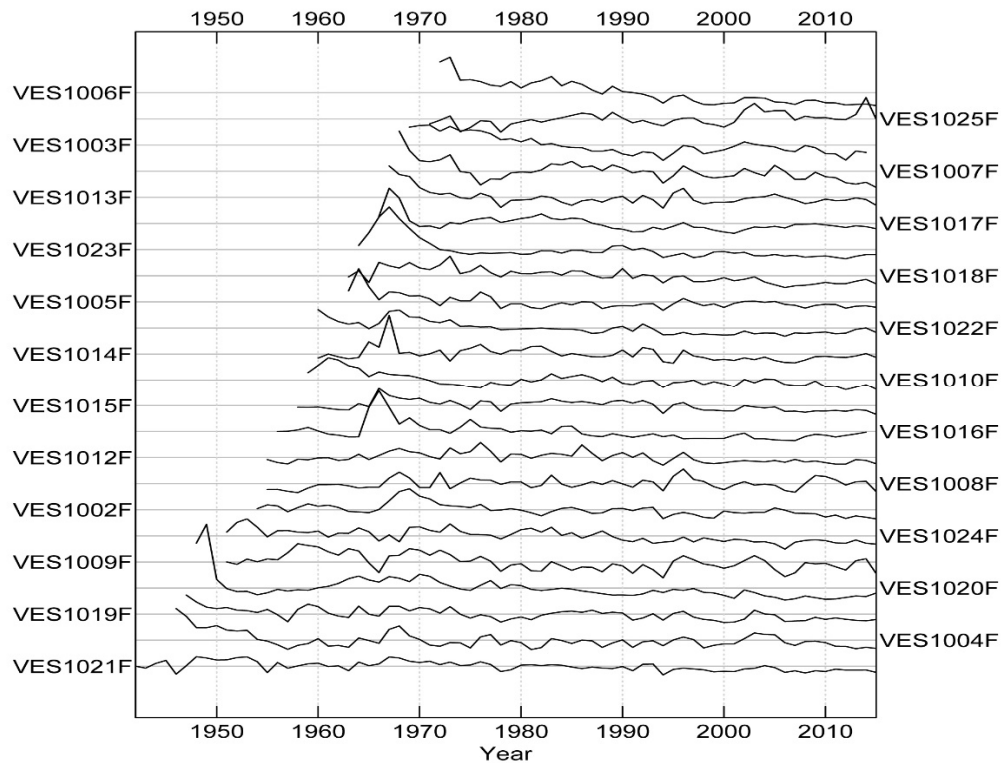


Appendice 5 - Cronologia standardizzata di BAI (Basal Area Increment) priva di trend di lungo periodo e con media uguale a 1 (Sopra). Cronologia residua a cui è stata rimossa l'autocorrelazione (Sotto). L'asse secondario riporta il numero di campioni.



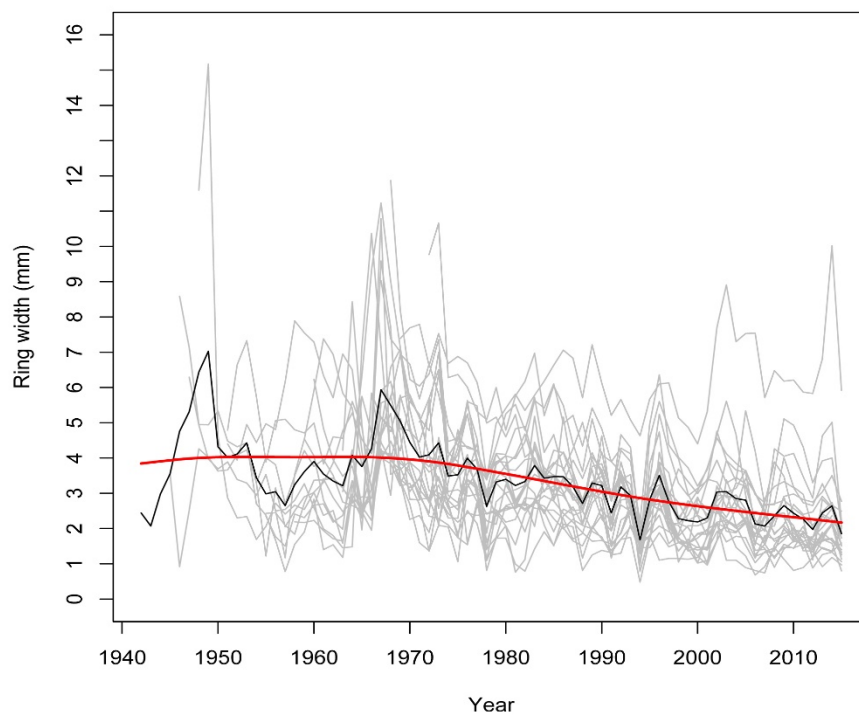
Appendice 6 - Funzioni di correlazione bootstrap tra la PC1 e precipitazioni (Prec) e le temperature medie (Temp) per il periodo 1957-2013. Le barre con margine evidenziato indicano i mesi in cui i coefficienti sono significativi ($p < 0.05$). Le lettere minuscole rappresentano i mesi dell'anno precedenti la formazione dell'anello

PIANO DEL VESCOVO

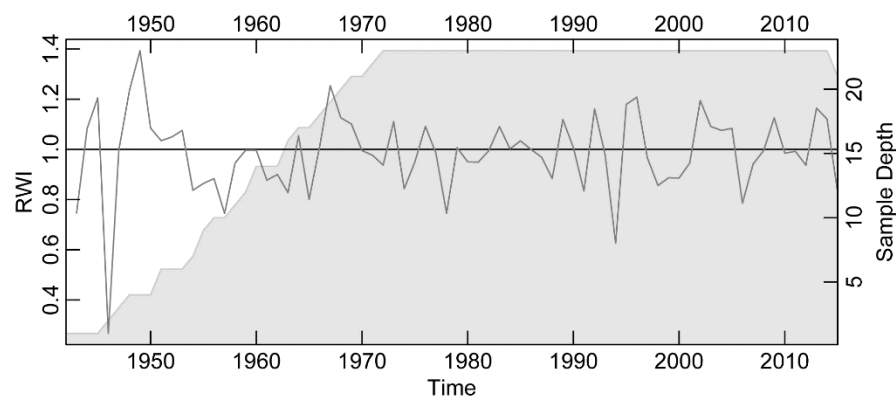
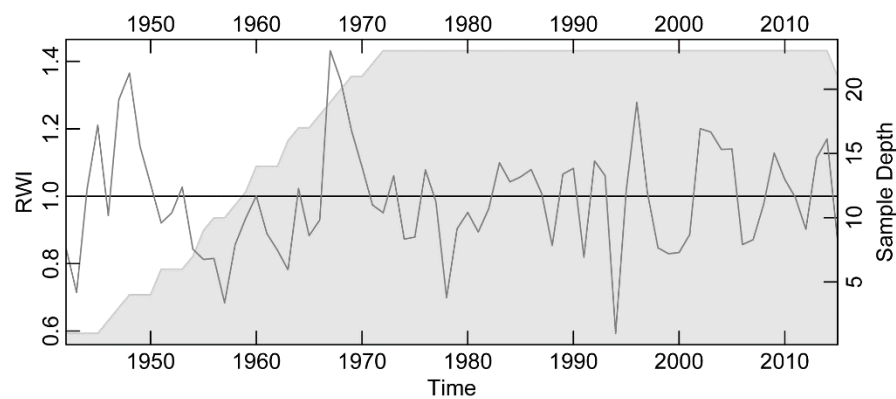


Appendice 7 - Spaghetti Plot delle serie dendrocronologiche del sito. I codici nell'asse presenti nell'asse Y identificandola singola pianta analizzata secondo il seguente criterio: Codice del sito(MAL), 10_ _ (ID della pianta), F (Specie analizzata)

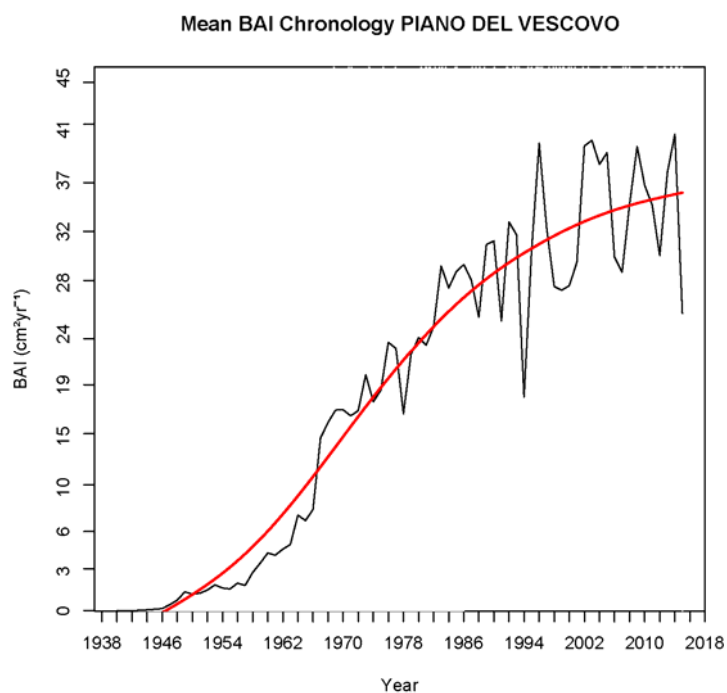
Mean RW Chronology PIANO DEL VESCOVO



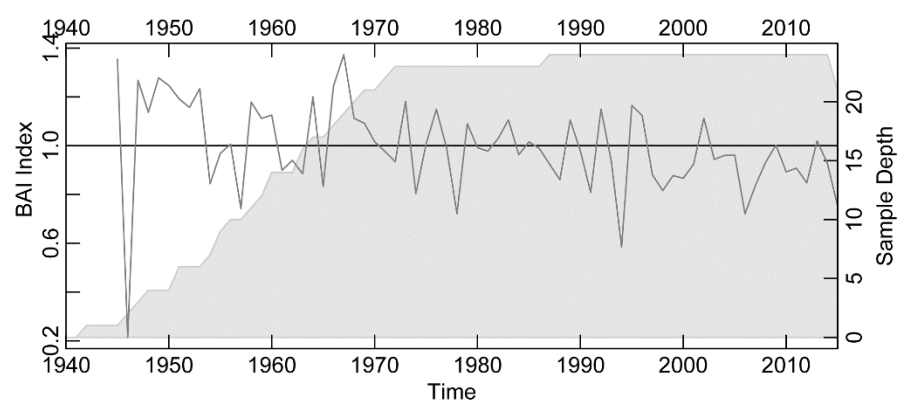
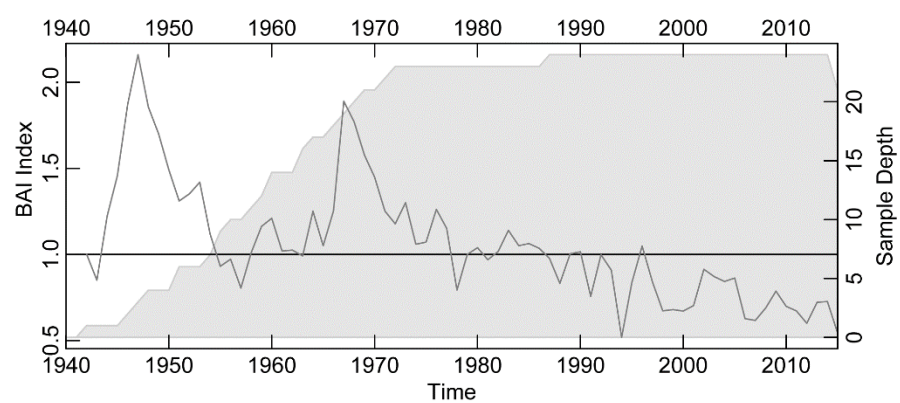
Appendice 8 - Cronologia media stagionale del sito. In grigio le singole cronologie, in nero viene riportata la cronologia stagionale, in rosso la spline che evidenzia il trend di medio-lungo periodo.



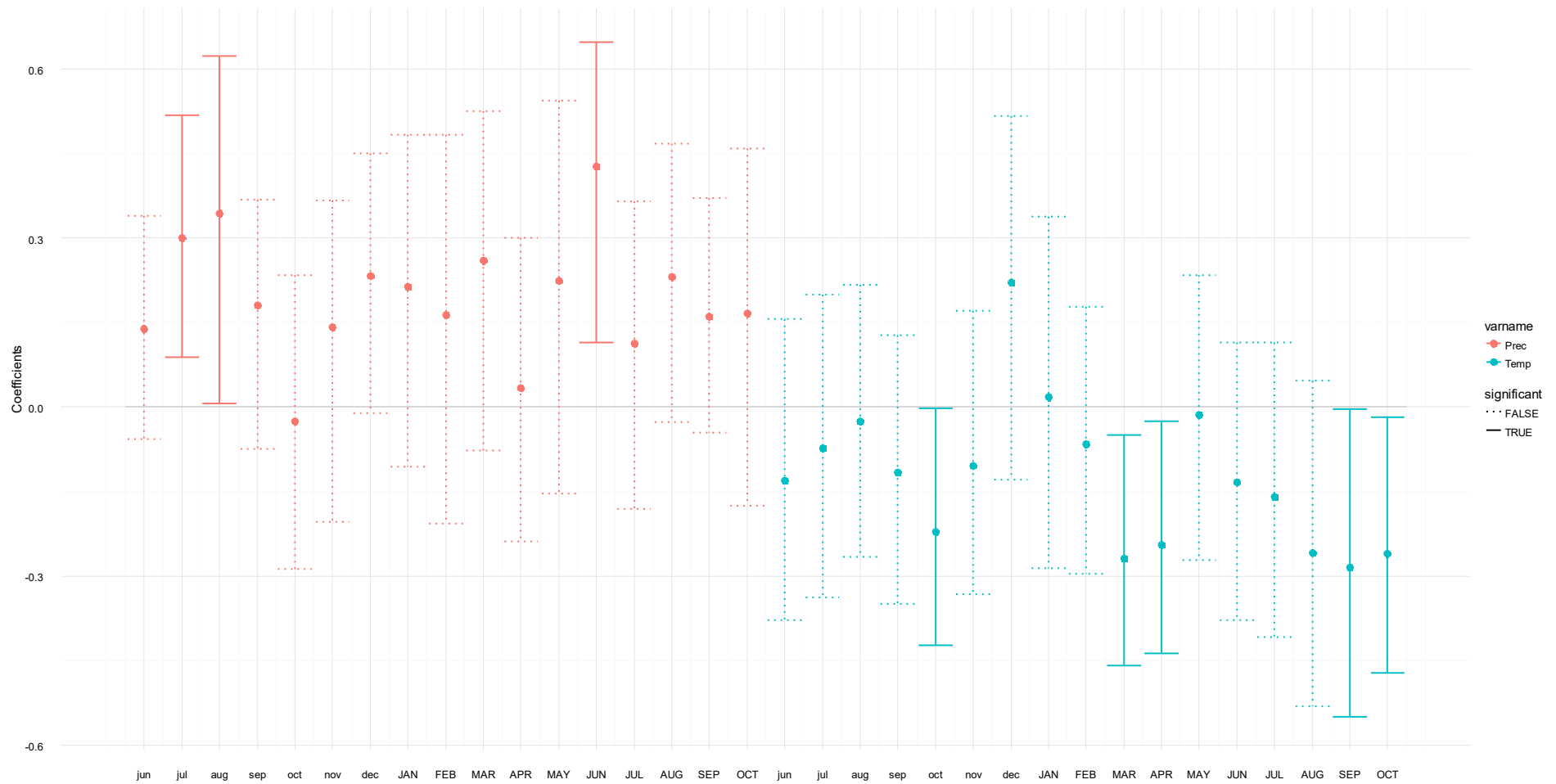
Appendice 9 - Cronologia standardizzata di RW (Ring Width) priva di trend di lungo periodo e con media uguale a 1 (Sopra). Cronologia residua a cui è stata rimossa l'autocorrelazione (Sotto). L'asse secondario riporta il numero di campioni.



Appendice 10 - Cronologia media stagionale di BAI (Basal Area Increment) del sito. In nero viene riportata la cronologia stagionale, in rosso la spline che evidenzia il trend di medio-lungo periodo

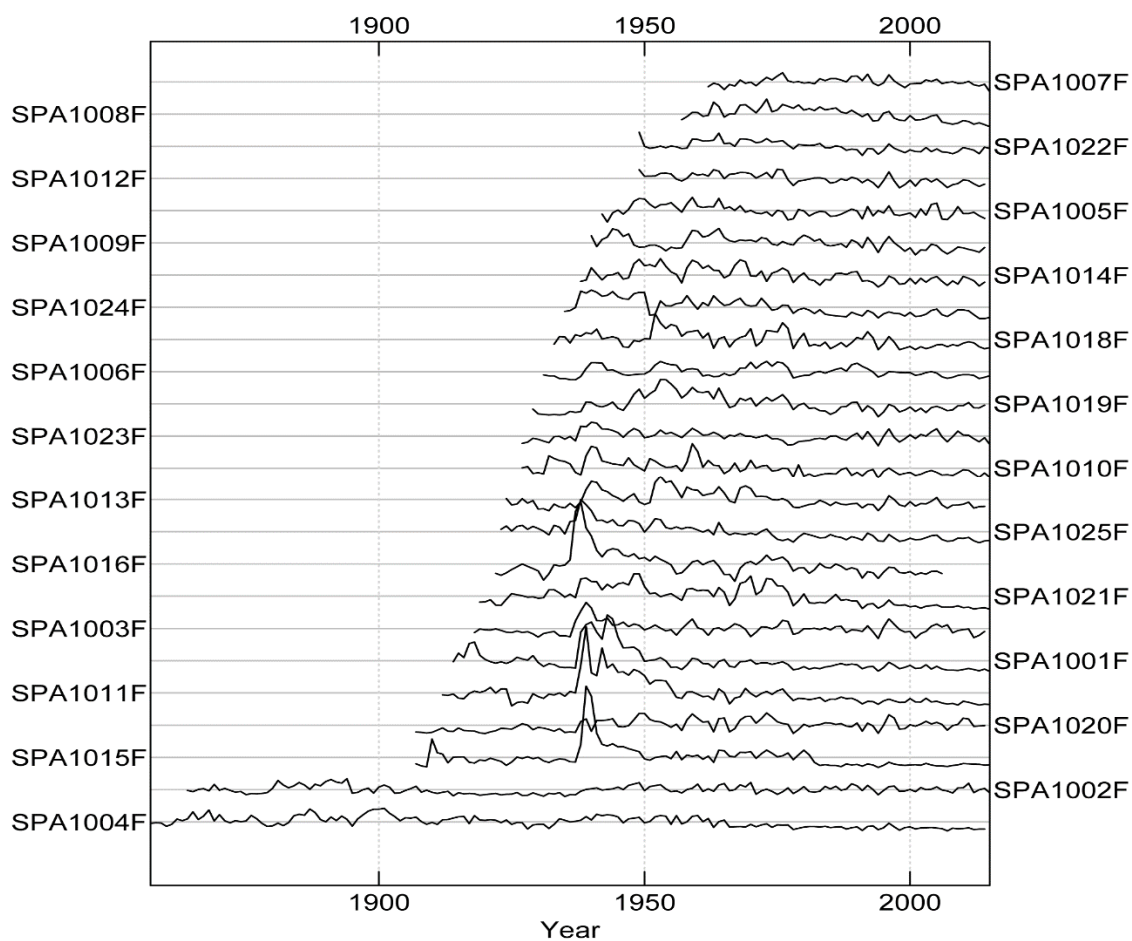


Appendice 11 - Cronologia standardizzata di BAI (Basal Area Increment) priva di trend di lungo periodo e con media uguale a 1 (Sopra). Cronologia residua a cui è stata rimossa l'autocorrelazione (Sotto). L'asse secondario riporta il numero di campioni.



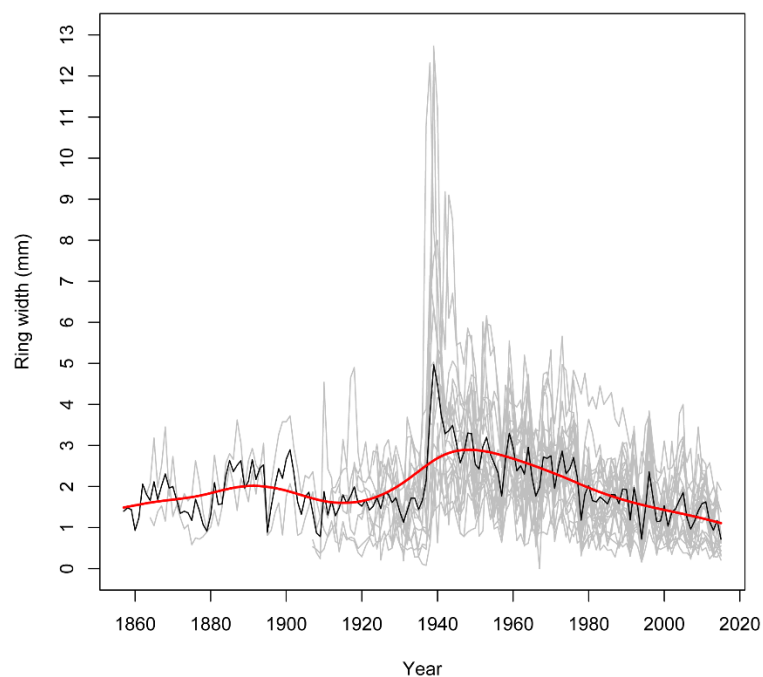
Appendice 12- Funzioni di correlazione bootstrap tra la PC1 e precipitazioni (Prec) e le temperature medie (Temp) per il periodo 1957-2013. Le barre con margine evidenziato indicano i mesi in cui i coefficienti sono significativi ($p < 0.05$). Le lettere minuscole rappresentano i mesi dell'anno precedenti la formazione dell'anello

MONTE SPAGNOLO

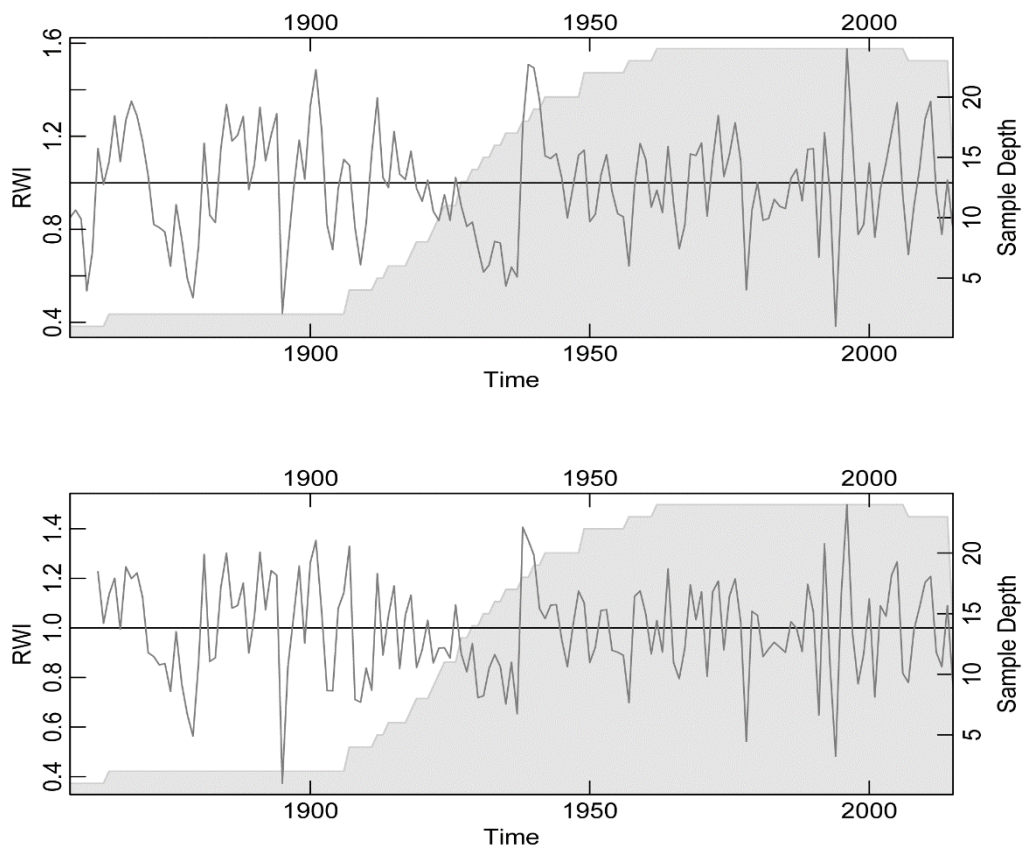


Appendice 13 - Spaghetti Plot delle serie dendrocronologiche del sito. I codici nell'asse presenti nell'asse Y identificandola singola pianta analizzata secondo il seguente criterio: Codice del sito(MAL), 10__ (ID della pianta), F (Specie analizzata)

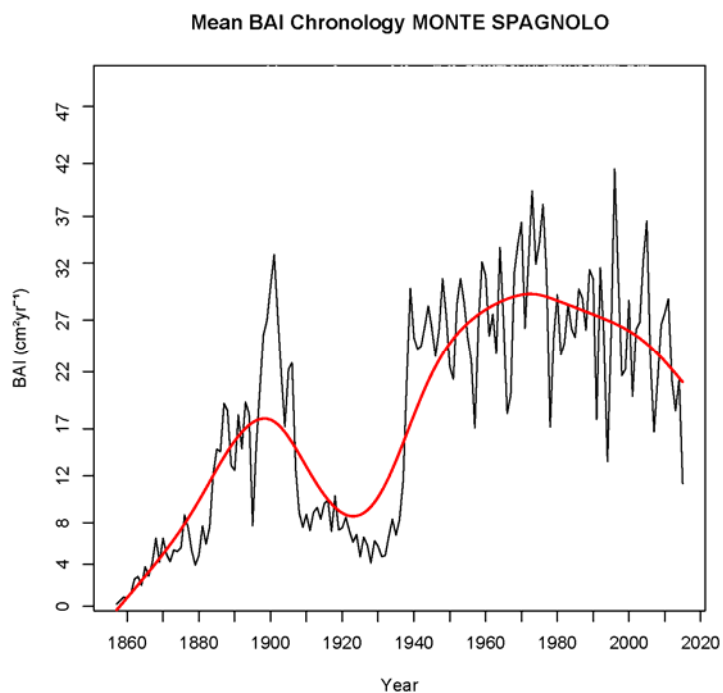
Mean RW Chronology MONTE SPAGNOLO



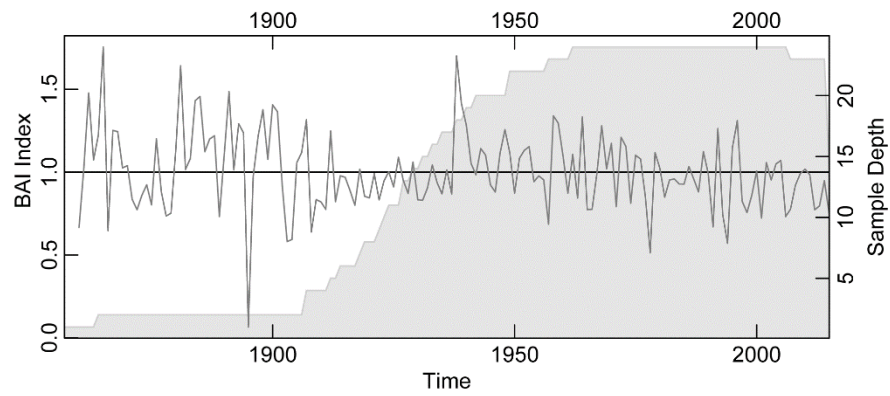
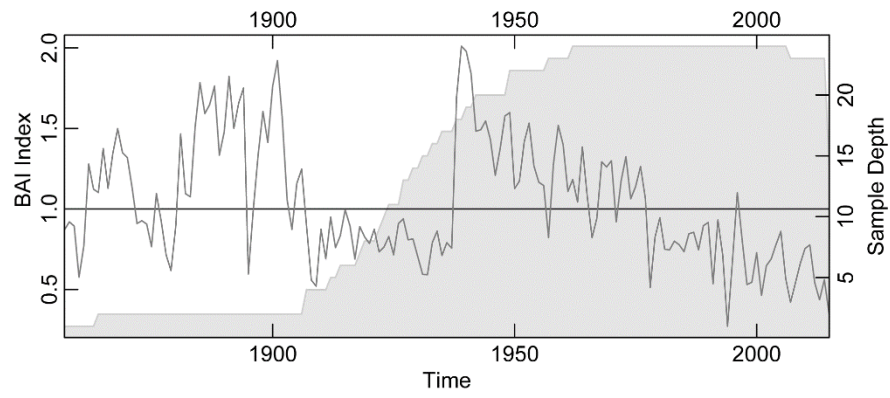
Appendice 14 - Cronologia media stazionale del sito. In grigio le singole cronologie, in nero viene riportata la cronologia stazionale, in rosso la spline che evidenzia il trend di medio-lungo periodo.



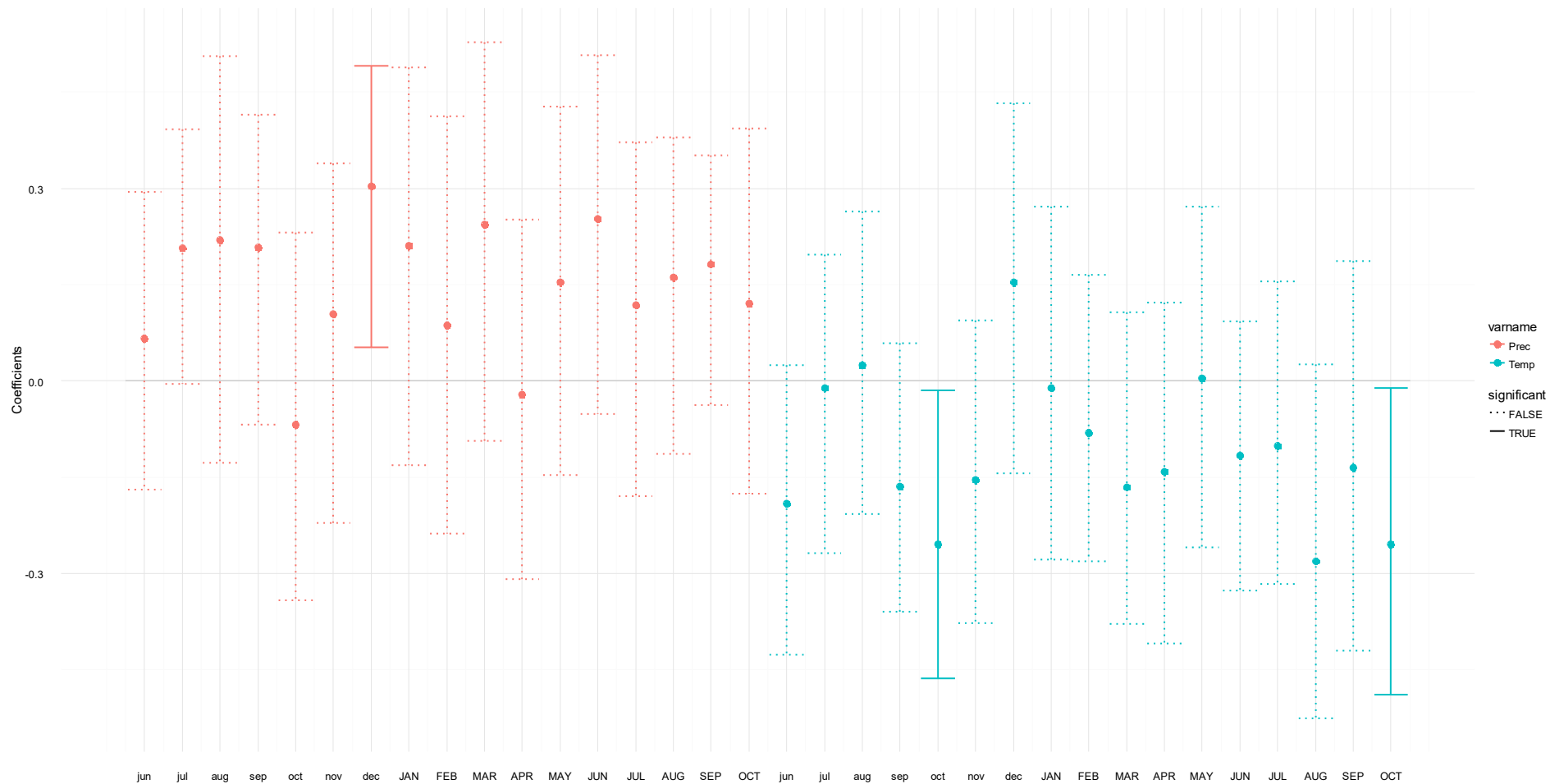
Appendice 15 - Cronologia standardizzata di RW (Ring Width) priva di trend di lungo periodo e con media uguale a 1 (Sopra). Cronologia residua a cui è stata rimossa l'autocorrelazione (Sotto). L'asse secondario riporta il numero di campioni.



Appendice 16 - Cronologia media stazionale di BAI (Basal Area Increment) del sito. In nero viene riportata la cronologia stazionale, in rosso la spline che evidenzia il trend di medio-lungo periodo

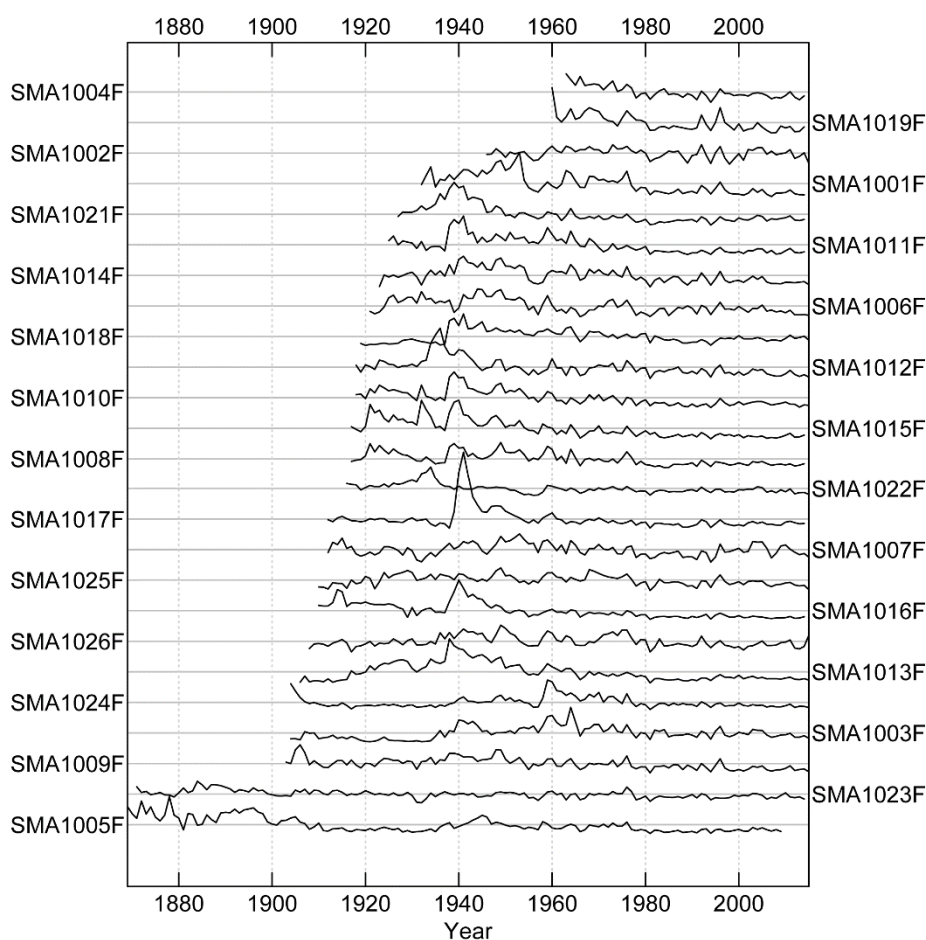


Appendice 17 - Cronologia standardizzata di BAI (Basal Area Increment) priva di trend di lungo periodo e con media uguale a 1 (Sopra). Cronologia residua a cui è stata rimossa l'autocorrelazione (Sotto). L'asse secondario riporta il numero di campioni.



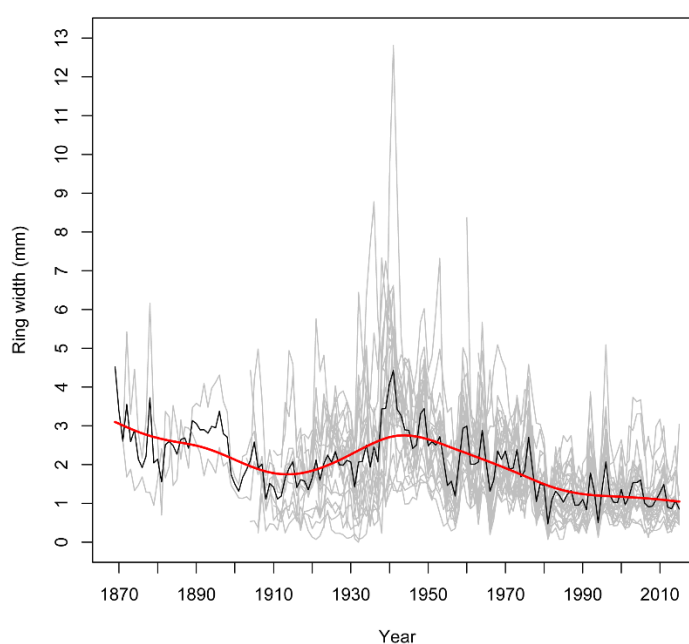
Appendice 18 - Funzioni di correlazione bootstrap tra la PC1 e precipitazioni (Prec) e le temperature medie (Temp) per il periodo 1957-2013. Le barre con margine evidenziato indicano i mesi in cui i coefficienti sono significativi ($p < 0.05$). Le lettere minuscole rappresentano i mesi dell'anno precedenti la formazione dell'anello

MONTE S.MARIA

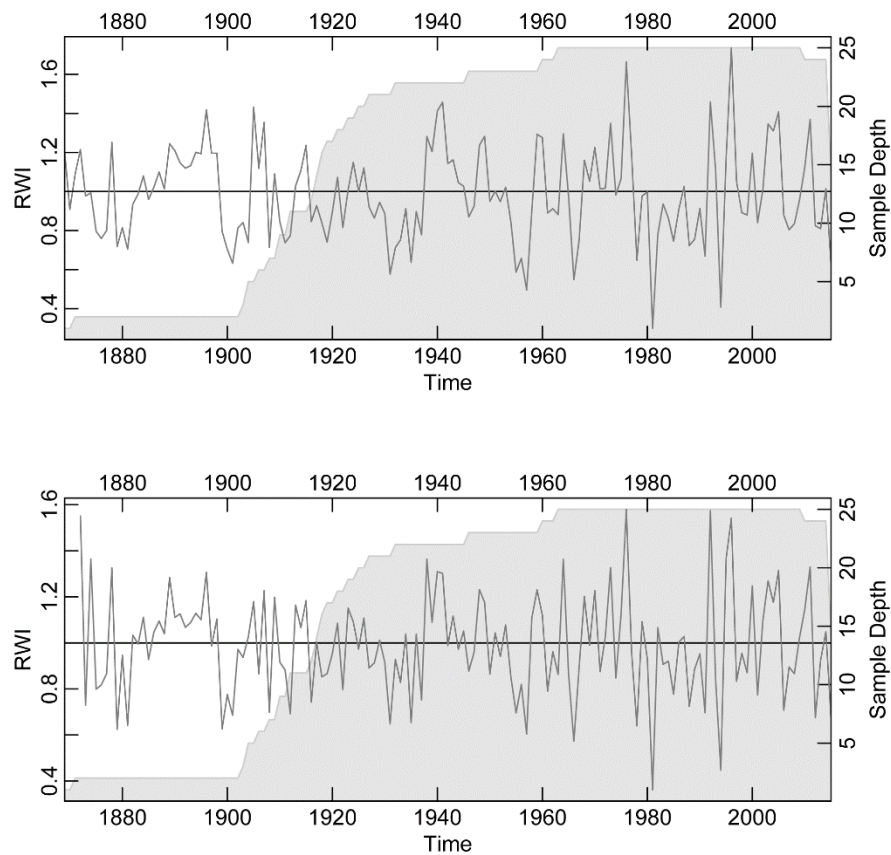


Appendice 19 - Spaghetti Plot delle serie dendrocronologiche del sito. I codici nell'asse presenti nell'asse Y identificandola singola pianta analizzata secondo il seguente criterio: Codice del sito(MAL), 10_ _ (ID della pianta), F (Specie analizzata)

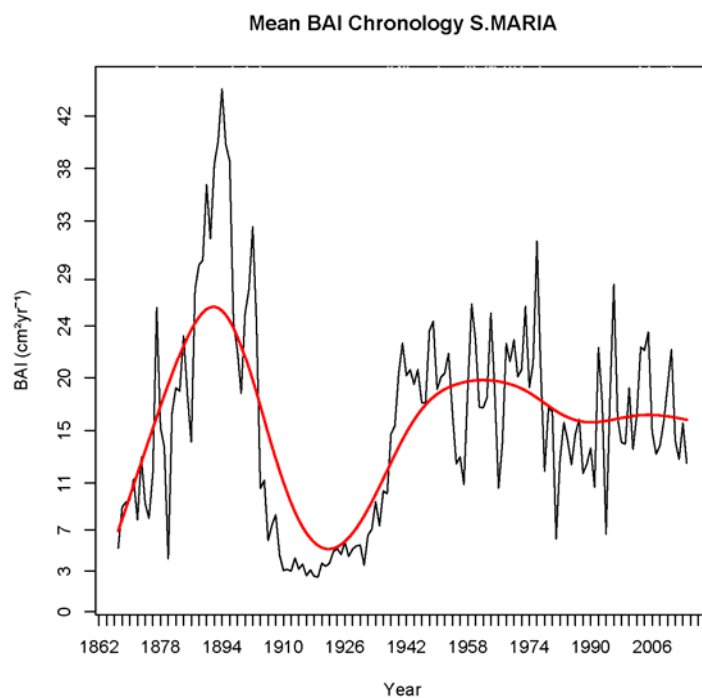
Mean Ring Width Chronology S. MARIA



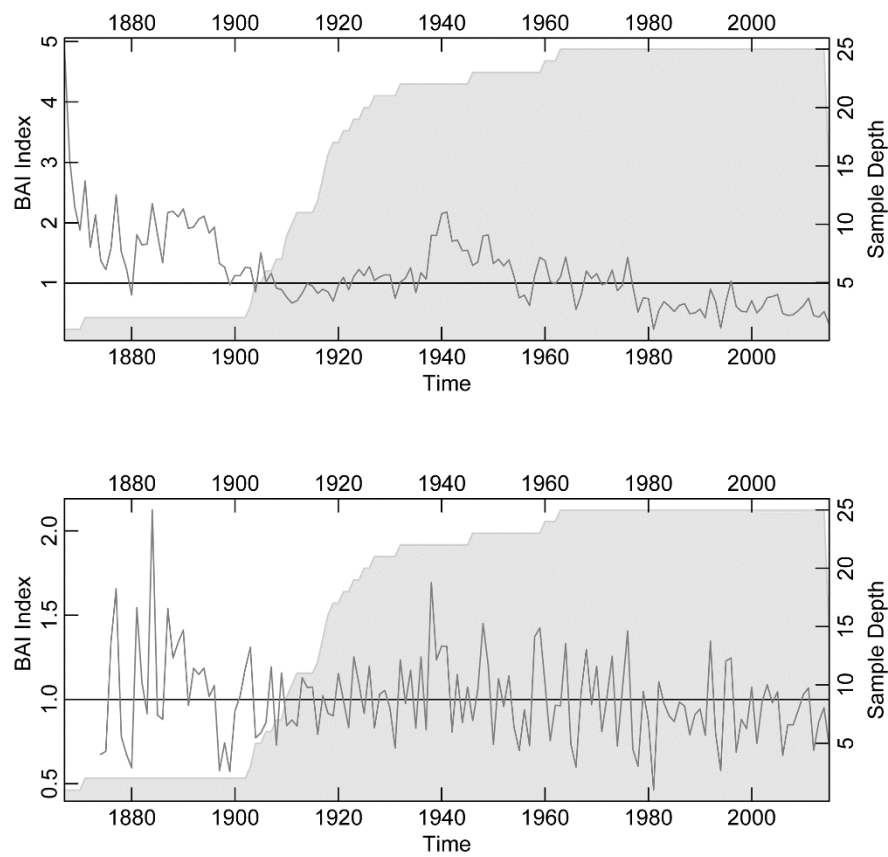
Appendice 20 - Cronologia media stagionale del sito. In grigio le singole cronologie, in nero viene riportata la cronologia stagionale, in rosso la spline che evidenzia il trend di medio-lungo periodo.



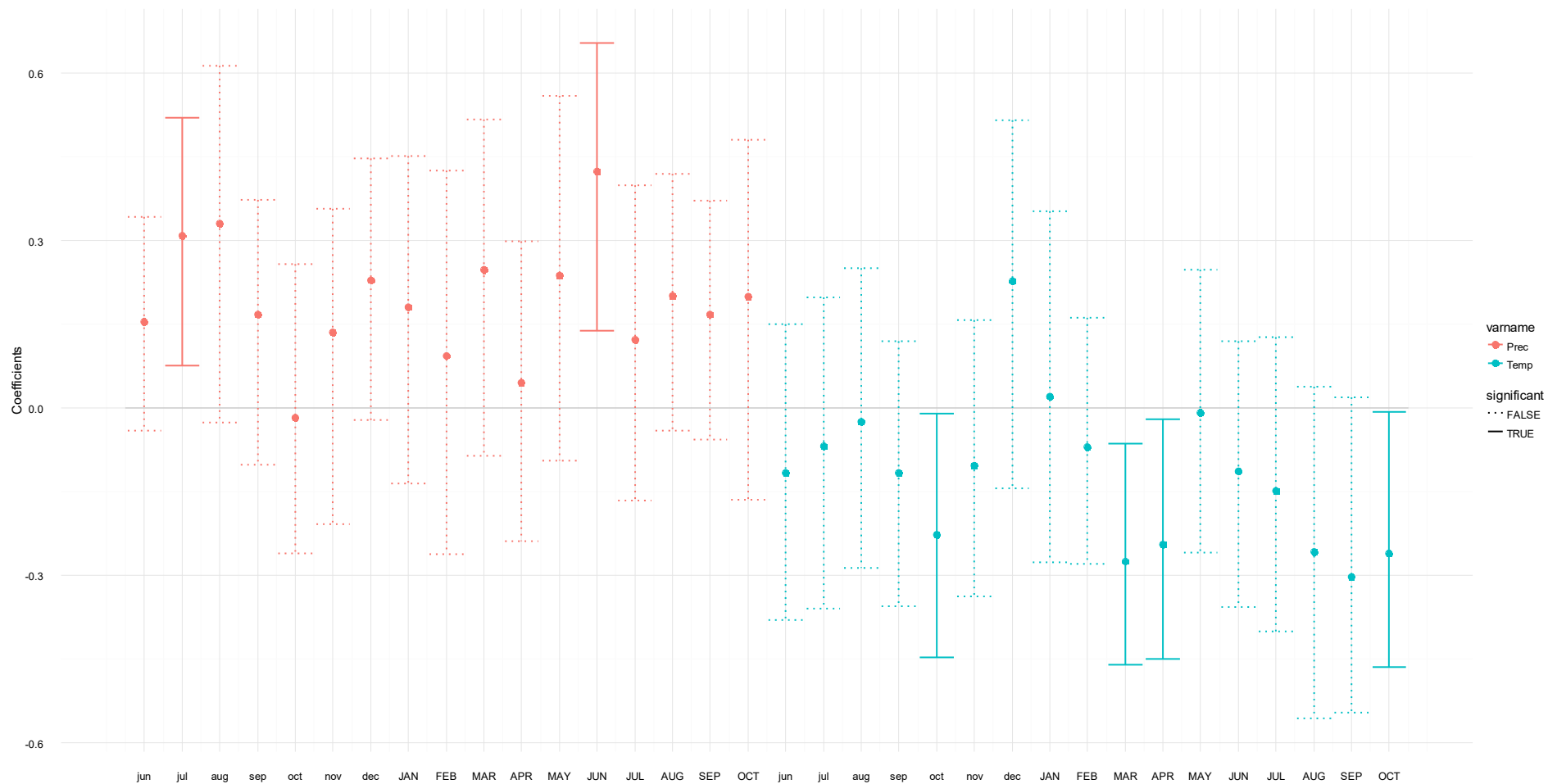
Appendice 21 - Cronologia standardizzata di RW (Ring Width) priva di trend di lungo periodo e con media uguale a 1 (Sopra). Cronologia residua a cui è stata rimossa l'autocorrelazione (Sotto). L'asse secondario riporta il numero di campioni.



Appendice 22 - Cronologia media stagionale di BAI (Basal Area Increment) del sito. In nero viene riportata la cronologia stagionale, in rosso la spline che evidenzia il trend di medio-lungo periodo



Appendice 23 - Cronologia standardizzata di BAI (Basal Area Increment) priva di trend di lungo periodo e con media uguale a 1 (Sopra). Cronologia residua a cui è stata rimossa l'autocorrelazione (Sotto). L'asse secondario riporta il numero di campioni.



Appendice 24 - Funzioni di correlazione bootstrap tra la PC1 e precipitazioni (Prec) e le temperature medie (Temp) per il periodo 1957-2013. Le barre con margine evidenziato indicano i mesi in cui i coefficienti sono significativi ($p < 0.05$). Le lettere minuscole rappresentano i mesi dell'anno precedenti la formazione dell'anello

