



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO
DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE E FORESTALI (DAFNE)**

Corso di Dottorato di Ricerca in

SCIENZE E TECNOLOGIE PER LA GESTIONE FORESTALE E AMBIENTALE - XXVIII Ciclo.

DENDROECOLOGIA DEL PINO DOMESTICO (*PINUS PINEA* L.) NEL SUD ITALIA

(s.s.d. AGR/05)

Tesi di dottorato di:

Dott. Francesco Solano

Firma

Coordinatore del corso

Prof. Bartolomeo Schirone

Firma

Tutore

Dott. Alfredo Di Filippo

Firma

Co-tutore

Prof. Gianluca Piovesan

Firma.....

28/06/2016

A mio padre, Sebastiano

INDICE GENERALE

1.ABBREVIAZIONI USATE NEL TESTO	4
2.RIASSUNTO	5
3.ABSTRACT	6
4.INTRODUZIONE	7
5.MATERIALI E METODI	11
5.1. Siti di studio	11
5.2. Il campionamento	11
5.2.1. La pineta di Nicosia (NIC)	14
5.2.2. La pineta di Candelara (CAN)	14
5.2.3. La pineta di Badiazza (BAZ)	15
5.2.4. La pineta di Colamaio (CLM)	15
5.2.5. La pineta di Cropani (CRO)	16
5.2.6. La pineta di Ziriò (ZIR)	17
5.3. La costruzione delle serie individuali e l'interdatazione	18
5.4. I parametri statistici dendrocronologici	19
5.5. Analisi auxologica	20
5.6. La standardizzazione	21
5.7. Analisi multivariata	22
5.8. Analisi dendroclimatica	23
5.8. Analisi della variazione di crescita a scala decennale	24
6.RISULTATI	25
6.1. Caratteristiche della rete dendroecologica	25
6.2. Analisi multivariata e relazioni clima-crescita	28
6.3. Analisi del BAI, produttività e storia auxologica	40
6.4. Variazioni di produttività a scala decennale	43
7.DISCUSSIONI	54
8.CONCLUSIONI	59
9.BIBLIOGRAFIA	61
10.RINGRAZIAMENTI	67
11.ALLEGATI	79

1. ABBREVIAZIONI USATE NEL TESTO

A₁ = Coefficiente di autocorrelazione di primo ordine

BAI = Incremento di Area Basimetrica

BAZ = Badiazza (ME)

CAN = Candelara (ME)

CLM = Colamaio (VV)

CF = Funzione di correlazione

CM = Correlazione con la cronologia di riferimento

CRO = Cropani (CZ)

EPS = Segnale espresso di popolazione

EW = Legno primaverile

IADF = Fluttuazioni di densità intra-annuale

LW = Legno estivo

MCF = Funzione di correlazione con finestre mobili

MS = Sensitività media

MW = Ampiezza anulare media

NIC = Nicosia (EN)

PC1 = Prima componente principale

PC2 = Seconda componente principale

PCA = Analisi delle componenti principali

RBAR = Correlazione media tra le serie

RW = Ampiezza anulare

SD = Deviazione standard

SPI = Indice Standardizzato di Precipitazione

2. RIASSUNTO

Scopo di questa ricerca è stato quello di costituire una rete dendroecologica delle pinete di pino domestico (*Pinus pinea* L.) nel sud Italia, in Calabria e in Sicilia in particolare. Il metodo dendroecologico, unitamente all'analisi multivariata, si è dimostrato un valido strumento per la caratterizzazione dei rapporti crescita-clima di queste pinete, riuscendo a cogliere fedelmente la variabilità del clima e l'effetto che essa ha sulla crescita di questa specie. In particolare questo metodo ha messo a fuoco direttamente i fattori climatici che guidano la crescita, ponendoli al centro delle distinzioni fra popolamenti indagati. Il segnale climatico ottenuto, mostra come la crescita delle pinete sia direttamente influenzata dalle precipitazioni suddivise in tre distinti periodi della stagione vegetativa: quello invernale, quello estivo e quello autunnale e l'influenza che queste hanno in particolare nella produzione del legno primaverile e di legno tardivo. Un altro risultato ottenuto mostra come negli ultimi decenni sia aumentata la produttività delle pinete siciliane e calabresi studiate, nella quale però possono influire le condizioni stazionali e della fase dinamica di tali rimboschimenti. Rispetto a quanto riportato per diversi popolamenti dell'Italia centrale (faggete/cerrete), in cui la produttività declina a partire dagli anni 80-90, le pinete studiate sono interessate, seppur con oscillazioni, da un aumento di produttività fino agli anni recenti. In particolare, l'aumento delle precipitazioni invernali sostengono una maggior produzione di legno primaverile, mentre il legno tardivo è in generale calo dovuto alla diminuzione delle precipitazioni dei mesi di settembre-ottobre. Le Differenze fra siti sono legate più al mesoclima locale (oceanicità, piovosità, piogge occulte, ristagno idrico) che alla quota.

In futuro sarà sicuramente di primaria importanza espandere la Rete Dendroecologica intensificando i campionamenti nelle aree ancora non studiate in modo da fornire una migliore continuità ed omogeneità di campionamento. Il sud del Mediterraneo, infatti, meriterà ulteriori approfondimenti, inoltre, sarà interessante estendere le considerazioni prodotte per il pino domestico anche ad altre specie arboree, a scala regionale ed interregionale in modo da produrre un'analisi maggiormente rappresentativa. In questo scenario si potrà valutare l'effetto dei cambiamenti climatici in atto sulla produttività delle foreste in base ad una conoscenza dettagliata del rapporto clima-accrescimento. L'informazione geografica legata alla produttività potrà essere di aiuto nella pianificazione gestionale delle risorse forestali, fornendo indicazioni utili ad una rimodulazione degli interventi selvicolturali adottati fino ad oggi anche nell'ottica di un miglioramento e potenziamento della resilienza degli ecosistemi forestali al cambiamento climatico.

Parole chiave: *Pinus pinea* L., Mediterraneo, dendroecologia, legno primaverile, legno tardivo, analisi multivariata, SPI

3. ABSTRACT

The purpose of this research was to establish a tree-ring network of stone pine (*Pinus pinea* L.) forests in southern Italy, in Calabria and Sicily in particular. Dendroecological method, together with multivariate analysis, proved to be a valuable tool for the characterization of growth-climate relationships, capturing climate variability and the effect it has on the species growth. In particular, this method has focused directly on climate factor driving growth, placing it at the center of the distinctions between populations investigated. Climate signal, shows how pine forests is directly influenced by precipitation into three distinct periods of the growing season: the winter season, the summer and autumn season, and the influence that these have in particular in the early-wood and late-wood production. Our results shows that productivity of both Calabrian and Sicilian stone pine forests has increased in recent decades, in which however the site conditions evolutionary dynamics influenced these pine reforestations. As opposed to what is reported for several central Italian populations (beech / turkey oak), where productivity declines from 80-90's, the studied pine forests are affected, although with fluctuations, by an increase in productivity until recent years . In particular, the increase in winter precipitation claim a majority early wood production, while the late wood is in general decline due to lower rainfall in September-October. Differences between sites are linked more to the local mesoclimate (oceanity, rainfall, fog, water logging) than altitude.

In the future it will be of primary importance to expand the Tree-Ring Network intensifying sampling areas in order to provide better continuity and sample homogeneity. The south of the Mediterranean area will deserve further study and it will also be interesting to extend these considerations to other tree species, at regional and national scale, so as to produce a more representative analysis. In this scenario we will evaluate the effect of climate changes on forests productivity on the basis of a detailed understanding of the climate-growth relationship. Geographical information, linked to productivity, will be an helpful tool in the forest resources management, providing useful guidance to a reorganization of forestry action adopted to date, in order to improve the forest ecosystems resilience to climate change.

Keywords: *Pinus pinea* L., Mediterranean, dendroecology, early-wood, late wood, multivariate analysis, SPI

4. INTRODUZIONE

Scopo di questa ricerca è stato quello di costituire una rete dendroecologica delle pinete di pino domestico (*Pinus pinea* L.) nel sud Italia, in Calabria e in Sicilia in particolare.

Il pino domestico (*Pinus pinea* L.) è un albero di medie dimensioni, sparso in tutto il bacino del Mediterraneo, soprattutto nelle zone costiere (Fady et al. 2008). Particolarmente abbondante nel sud Europa occidentale, occupa una vasta gamma di condizioni climatiche e di suolo, anche se mostra una bassa variazione genetica (Abad Viñas et al. 2016). L'areale di distribuzione naturale del pino domestico è incerto e difficile da stabilire a causa di una lunga storia di semina di questa specie. Infatti essa è stata ampiamente distribuita in Europa nel corso degli ultimi mille anni ed introdotta in tutta la regione del Mediterraneo per i suoi semi commestibili (Eckenwalder 2009; Aljos e Filer 2013). Le prime evidenze dell'uso umano di questa specie sono state recentemente trovate in Gibilterra e datate a 49200 anni B.P. (Finlayson et al. 2006). Attualmente, il pino domestico ha una distribuzione sparsa in tutto il bacino del Mediterraneo, dal Portogallo alla Siria, ed è più abbondante in Europa sud-occidentale (Penisola Iberica, Sud della Francia, Italia), dove si rinnova naturalmente. È presente anche lungo le coste del Mar Nero (Eckenwalder 2009; Aljos e Filer 2013; Farjon 2015). Si ritrova soprattutto nelle zone costiere, tranne che in Spagna e in Portogallo dove cresce naturalmente ad una certa distanza dal mare. Inoltre è stato introdotto con successo anche in Argentina, Stati Uniti e Sudafrica (Mirov e Iloff 1955; Shaughnessy 1980; Montero et al. 2008). Le poche popolazioni naturali in Italia crescono in condizioni climatiche "Mediterranee", caratterizzate cioè, da siccità estiva e da un'alta variabilità inter-annuale di precipitazioni e temperature (Walter e Lieth 1960), dove la siccità estiva è il fattore determinante nel limitare la crescita delle piante.

La regione Mediterranea è stata definita come un *hotspot* dei cambiamenti climatici, in cui "shift" climatici hanno già avuto luogo, come ad esempio aumenti di temperatura giornaliera e diminuzioni di precipitazioni mensili (Brunetti et al 2006; Giorgi 2006; Toreti e Desiato 2008). La futura variabilità del clima di superficie sarà in parte influenzata da un aumento della frequenza delle condizioni anticicloniche associate con una diminuzione sia della frequenza che dell'intensità dei cicloni mediterranei (Lionello et al. 2008; Giorgi e Lionello 2008; Pasho e Alla 2015). La crescente attenzione sia per il cambiamento climatico globale che per le sue conseguenze ecologiche, suggeriscono ulteriori motivi per analizzare l'influenza che ha avuto e che ha oggi il clima sul funzionamento degli ecosistemi mediterranei. La scelta di condurre le ricerche in regioni come Sicilia e Calabria, oltre perché caratterizzate da un notevole interesse geobotanico e bioclimatico che ha favorito numerosi endemismi e la presenza di diverse zone ritenute di rifugio post-glaciale, deriva dalla loro posizione nel Bacino del Mediterraneo, di come si collocano

all'interno dell'*hotspot* nel cambiamento del clima e dalla loro evoluzione nel tempo. Infatti come evidenziato in altri studi, il sud Italia ed in particolare l'appennino calabro-siculo, si caratterizza per un regime di precipitazioni molto particolare e diverso dal resto della penisola italiana (Brunetti et al. 2006); il che lo rende una zona dove gli impatti dei cambiamenti climatici previsti necessitano di particolari approfondimenti.

In questo particolare scenario si inserisce il presente studio dendroecologico. La misura delle ampiezze anulari e l'analisi delle serie dendrocronologiche diventano, non solo un importante strumento nello studio delle problematiche ecologiche e climatiche di un determinato soprassuolo forestale, ma anche strumento per studiare il clima presente e passato. In particolare in dendroclimatologia, l'albero è considerato come strumento capace di registrare le variazioni del clima attraverso la formazione di anelli più o meno grandi (Fritts 2001). Naturalmente non viene registrato tutto ciò che circonda l'albero, ma solo quell'insieme di fattori ecologici che vanno a condizionarne la vita interferendo con le sue attività fisiologiche. Poiché il clima costituisce uno dei fattori più importanti nell'influenzare la crescita degli alberi, l'estrazione del segnale climatico contenuto all'interno delle serie dendrocronologiche può fornire importanti informazioni per comprendere quali siano i fattori climatici che maggiormente influenzano i trend di crescita degli alberi.

L'ampiezza (R) realizzata da un anello legnoso nell'anno t può essere considerata, in maniera semplificata, come una combinazione lineare degli effetti di diverse componenti (Cook e Kairiukstis 1990) secondo la seguente equazione:

$$R_t = G_t + C_t + aD1_t + aD2_t + E_t$$

dove (G) rappresenta il trend di crescita legato all'aumento delle dimensioni del fusto e dell'età dell'albero; (C) il clima, con la sua variabilità di breve, medio e lungo periodo; ($D1$) i disturbi endogeni o localizzati, interessanti uno o pochi alberi (es. morte per senescenza); ($D2$) i disturbi esogeni o diffusi, estesi a gran parte del popolamento (ad esempio, incendi, epidemie, attività antropiche, ecc...) e, infine, (E) la variabilità inter-annuale non spiegata dai precedenti fattori. Le a associate a $D1$ e $D2$ sono indicatori binari della presenza ($a = 1$) o assenza ($a = 0$) nell'anello formato nell'anno t delle componenti a cui sono riferite. Da questo modello teorico, sebbene notevolmente semplificato, si capisce che una serie dendrocronologica può essere scomposta in un trend biologico di lungo termine, due segnali comuni agli alberi dell'ecosistema dovuti all'azione del clima e dei disturbi esogeni diffusi, e due segnali individuali legati ai disturbi localizzati ed alla casualità.

Il panorama degli studi dendroecologici sul pino domestico non risulta particolarmente ampio come quello di altre conifere tipiche soprattutto dell'ambiente montano. Tuttavia nel bacino del Mediterraneo diverse ricerche sono state condotte prevalentemente in Spagna (Genova Fuster 2000; Raventós et al. 2001; De Luis et al. 2009; Rozas et al. 2009), Italia (Biondi 1992; Galli et al. 1992; Cherubini 1993; Romagnoli e Bernabei 1997; Cherubini et al. 2003; Raddi et al. 2009; Piraino et al. 2012; Piraino e Roig-Juñent 2014; Di Filippo et al. 2016), Portogallo (Campelo et al. 2007), Albania (Toromani et al. 2015) ma anche in Turchia (Akkemik 2000). Di particolare interesse negli ultimi anni si sono dimostrati anche gli studi inerenti le fluttuazioni di densità intra-annuale (IADFs) del pino domestico e di altre specie di pino mediterraneo, considerate come anomalie degli anelli degli alberi che possono essere utilizzati per capire meglio la crescita e di ricostruire le condizioni climatiche del passato, con risoluzione non solo annuale ma anche intra-annuale (stagionale) (Campelo et al. 2007a; Vieira et al. 2009; Olivar et al. 2012; Nabais et al. 2014; Olivar et al. 2015a; Olivar et al. 2015b; Battipaglia et al. 2016; De Micco et al. 2016).

Lo sviluppo di una rete dendroecologica è in grado di fornire una più accurata descrizione ecologica della specie, e contribuisce a migliorare la conoscenza delle esigenze ecologiche e delle valutazioni biogeografiche. Inoltre, l'analisi del rapporto tra gli indici di crescita e le variabili climatiche a scala regionale e nazionale può aiutare a prevedere come il pino domestico (*Pinus pinea* L.) possa comportarsi in uno scenario climaticamente instabile (IPCC 2014).

In questo panorama di studi condotti prevalentemente nel bacino del Mediterraneo, si inseriscono gli obiettivi della ricerca. Tali obiettivi riguardano lo studio delle dinamiche di crescita del pino domestico nel sud Italia, che insieme agli altri pini mediterranei si ritrova con piante molto vecchie che permettono di ricostruire a posteriori l'impatto dei cambiamenti climatici a scala spaziale e temporale, attraverso l'analisi delle serie di ampiezze anulari, al fine di:

- 1) individuare la variabilità dell'accrescimento radiale e delle risposte di crescita ai fattori ambientali, non solo attraverso lo studio delle ampiezze anulari (RW), ma cercando segnali più precisi nel solo legno primaverile (EW) e nel legno tardivo (LW), confrontando pinete situate in diverse aree geografiche e secondo un gradiente altitudinale;
- 2) analizzare l'andamento del tasso di crescita radiale nel corso dell'ultimo secolo e valutare le risposte di crescita ai principali parametri climatici, evidenziando le variazioni nel tempo delle relazioni clima-accrescimento.

L'obiettivo sarà quello di identificare delle zone bioclimaticamente affini, all'interno delle quali la crescita delle pinete di pino domestico sono influenzate dagli stessi segnali climatici. Solo comprendendone meglio l'ecologia e le strategie di adattamento al cambiamento climatico si

potranno adottare delle strategie gestionali mirate, con la consapevolezza che tale area ha risentito e risente ancora oggi di una forte pressione antropica. Inoltre le analisi andranno ad inserirsi nel contesto della Rete Dendroecologica Nazionale, colmandone parzialmente le aree non ancora coperte, sviluppata dal Laboratorio di Dendroecologia del Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali (DAFNE) dell'Università degli Studi della Tuscia.

5. MATERIALI E METODI

5.1.Siti di studio

La ricerca è stata condotta su un campione di 5 pinete caratterizzate dalla dominanza di pino domestico (*Pinus pinea* L.). A questi popolamenti si è poi aggiunto per confronto un popolamento di pino nero (*Pinus nigra* Arnold) per un totale di 6 siti prevalentemente di origine antropica. I siti sono rappresentativi di due aree del sud Italia ben distinte come Calabria e Sicilia coprendo un *range* altitudinale variabile tra ~4 m slm in Calabria e ~700 m slm in Sicilia (Tabella 1). Questi diversi popolamenti oltre ad essere situati a quote diverse in aree geografiche distinte (Figura 1), e quindi con regimi climatici localmente diversi, presentano anche diverse caratteristiche strutturali e gestionali.

Il primo sito scelto è la pineta di pino domestico in località Candelara (CAN), sui Monti Peloritani nel comune di Messina (ME) all'interno del SIC ITA030011 (Monti Peloritani, Dorsale Curcuraci, Antennamare). Il secondo sito di indagine è la pineta di pino domestico situata nella parte nord-occidentale della provincia di Enna, a confine con quelle di Palermo e Messina, su Monte Indovino tra i comuni di Nicosia e Sperlinga nella valle del fiume Salso. (Tabella 1). Il terzo sito è rappresentato dalla pineta di pino nero in località Ziriò (ZIR) sui Monti Peloritani nel comune di Messina (ME) (Tabella 1). Il quarto sito è collocato nella parte più orientale nella dorsale dei monti Peloritani nel comune di Messina (ME). Il quinto sito è la pineta di pino domestico in località Colamaio (CLM) nel comune di Pizzo Calabro (VV) sul versante tirrenico calabrese ed infine il sesto sito indagato è la pineta di pino domestico in località Cropani (CRO) ricadente nel comune di Catanzaro (CZ) sul versante ionico calabrese (Tabella 1).

5.2.Il campionamento

Il progetto di ricerca prende in esame una rete composta da pinete di pino domestico (*Pinus pinea* L.) del sud Italia secondo un transetto, che dalla costa ionica calabrese, procede in direzione ovest verso la costa tirrenica calabrese, per poi passare dall'area dello stretto di Messina lungo la dorsale dei Monti Peloritani, giungendo fino ai Monti Iblei nella Sicilia centro-settentrionale (Figura 1). All'interno di questo transetto, le aree sono state distinte anche secondo un gradiente altitudinale e quindi per fasce bioclimatiche. Ogni sito è stato posizionato geograficamente acquisendo le coordinate geografiche con GPS. Le indagini sono state condotte con metodo dendroecologico, attraverso la misura delle serie di ampiezze anulari (curve dendrocronologiche). Il campionamento dendrocronologico è stato effettuato attraverso il prelievo a 1,30 m, mediante trivella di Pressler, di un numero minimo di 22-24 carote legnose per sito da individui codominanti che non mostravano segni di deperimento. Nel solo sito di Badiazza sono stati prelevati un numero

inferiore di campioni e la cronologia è stata validata comunque con l'EPS (rif. "La standardizzazione). Di ogni individuo dal quale si è prelevato il campione legnoso si è misurato il diametro (a 1,30 m) e l'altezza con ipsometro Vertex IV.

Tabella 1 - Caratteristiche dei siti studiati. (Lat): Latitudine; (Lon): Longitudine; (DBH): *range* dei diametri campionati a 1.30 m, tra parentesi il valore medio; (H): *range* delle altezze rilevate, tra parentesi il valore medio.

Sito	Codice	Lat* N	Lon* E	Specie	Quota (m s.l.m.)	Esposizione	Pendenza (%)	DBH (cm)	H (m)
Nicosia (EN)	NIC	4178925	445668	<i>P. pinea</i>	660-713	N	15	32 (48) 64	10 (15) 20
Candelara (ME)	CAN	4231896	544869	<i>P. pinea</i>	336-497	N-W	9	35 (55) 76	15 (18) 22
Badiazza (ME)	BAZ	4229732	544798	<i>P. pinea</i>	287-320	N-W	10	63 (76) 90	12 (13) 15
Colamaio (VV)	CLM	4293295	604529	<i>P. pinea</i>	4-5	W	2	30 (35) 41	13 (13) 14
Cropani (CZ)	CRO	4308330	657300	<i>P. pinea</i>	3-4	E	2	31 (45) 60	13 (13) 14
Ziriò (ME)	ZIR	4225293	540952	<i>P. nigra</i>	875-901	N-W	5	45 (57) 70	22 (24) 27

*Sistema di riferimento WGS84/UTM

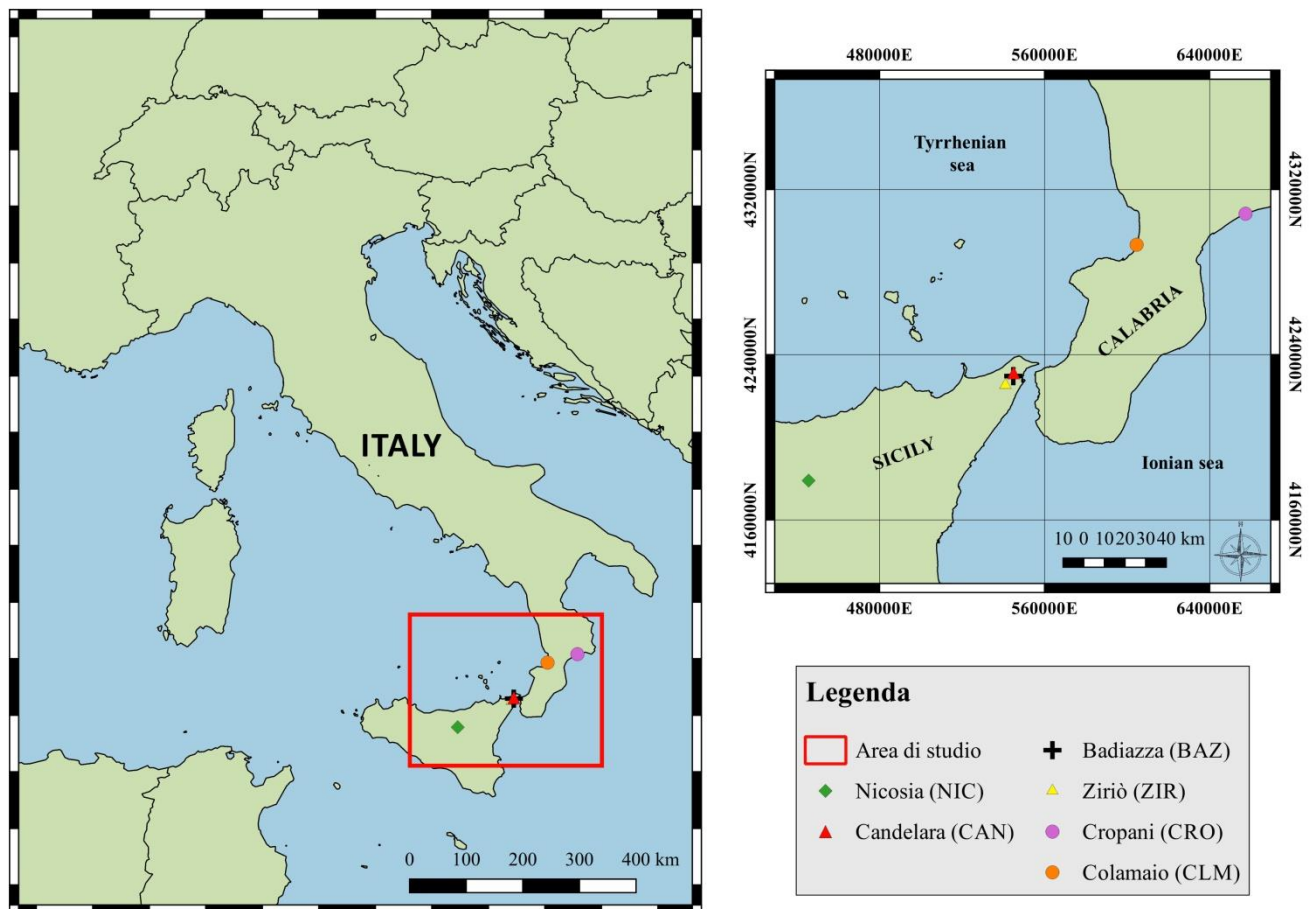


Figura 1 - Inquadramento dell'area di studio [(Proiezione Universale Trasversa di Mercatore (UTM) - Fuso 33N, Ellissoide Internazionale con orientamento medio europeo (Datum WGS84)]

In tutte le aree il clima è tipicamente mediterraneo (Figura 2), con una piovosità media annua (periodo 1970-2014) da 556 a 855 mm circa, concentrata nei mesi autunno-invernali, ed una temperatura media annua da 13,7 a 18,8 °C circa. Il periodo di aridità estiva risulta maggiore a CRO, nella Calabria ionica, non tanto per le maggiori temperature, che sono comunque leggermente superiori nei valori massimi, quanto per la minore quantità di pioggia che cade in un periodo più ampio (nei mesi da fine maggio a settembre). Il sito NIC si distingue per un regime di piogge nettamente inferiore rispetto agli altri siti e per le temperature medie annuali più basse, coerentemente con l'ambiente che lo caratterizza; esso infatti è il popolamento di pino domestico più in quota della rete indagata.

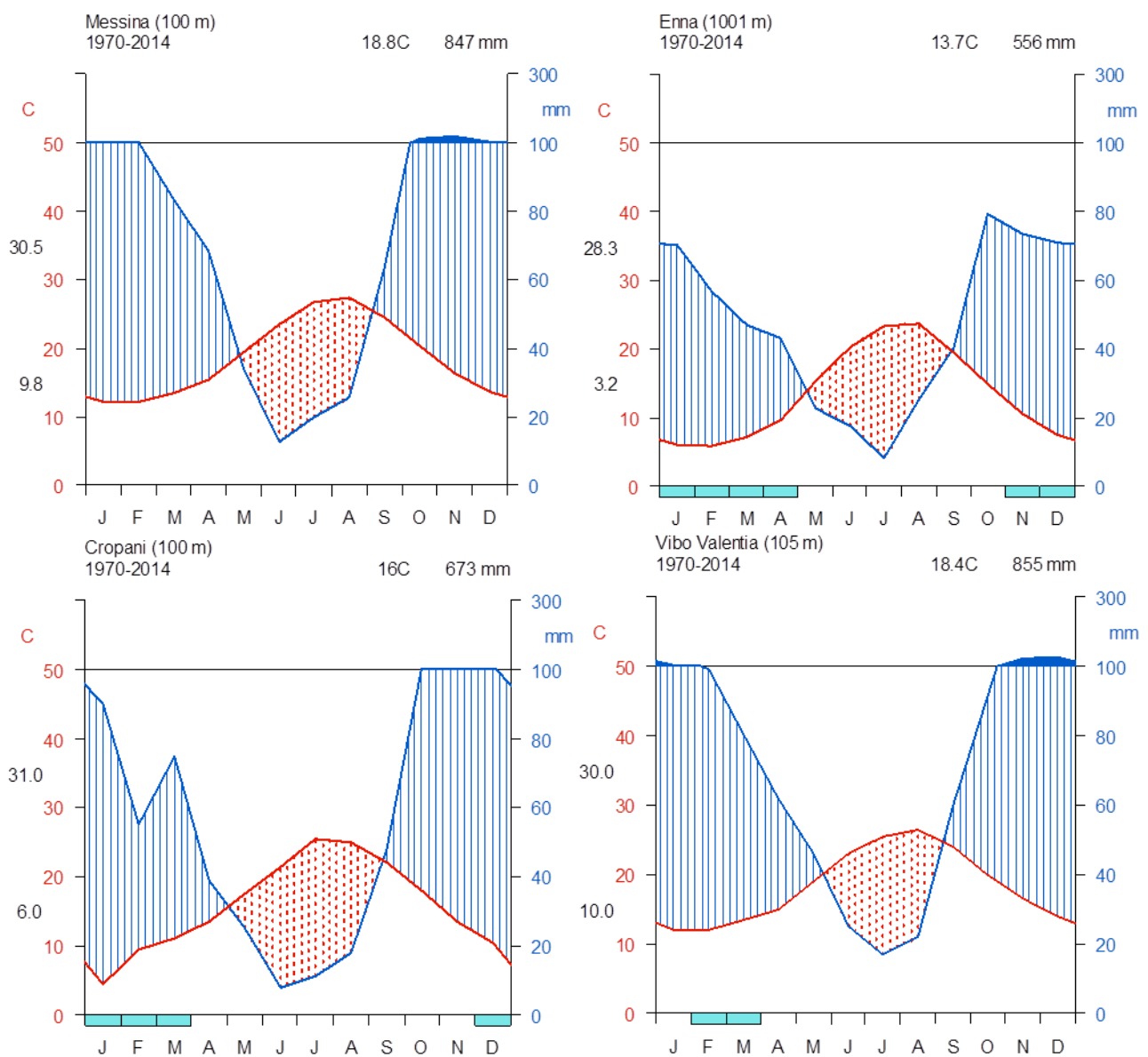


Figura 2 - Diagrammi climatici secondo Walter e Lieth (1960) caratteristici delle aree di studio. La linea continua in rosso e la linea continua blu indicano rispettivamente le serie temporali di temperatura e precipitazioni. L'area tratteggiata al centro indica il periodo di aridità estivo. I rettangoli blu sull'asse x mostrano i mesi nei quali è probabile il verificarsi di gelate.

5.2.1. *La pineta di Nicosia (NIC)*

La pineta di pino domestico (*Pinus pinea* L.), che si estende per circa 25 ettari, è situata nel comune di Nicosia (EN) su Monte Indovino, tra i comuni di Nicosia e Sperlinga nella valle del fiume Salso. Del tutto assenti risultano le notizie storiche per questo popolamento, che oggi si rinviene solo in questo piccolo nucleo. Tutta l'area, a partire dagli anni '30, è stata oggetto di opere di rimboschimento con conifere, della quale il pino domestico è stata la seconda specie (dopo il pino nero) per ordine di importanza di utilizzo. Verosimilmente l'origine di questa pineta è da attribuirsi a queste opere che sono continuate fino agli anni '60 (anche se come verrà esposto successivamente nei risultati, sono stati trovati alberi con età maggiori e quindi antecedenti a quell'epoca). Potrebbe essere un popolamento risalente alla fine dell'800 quando iniziò un vasto programma di riforestazione della Regione Sicilia con scopi di protezione e copertura del suolo, cercando di limitare i diffusi e disastrosi fenomeni erosivi, e per creare le condizioni per una più facile ridiffusione delle specie arboree naturali, che si è successivamente naturalizzata (Camerano 2011; PFR Sicilia 2012). Vista la vicinanza con la Riserva Naturale di Sambughetti-Campanito condivide affinità geologiche non indifferenti: si tratta di depositi di Flysh Numidico, essenzialmente formato da detriti accumulatisi ad opera di correnti sottomarine e poi affiorati in fasi successive. Attualmente il soprassuolo presenta densità piuttosto irregolari; zone più rade si alternano a zone più dense con strutture diversificate in diversi piani. Gli alberi si presentano con una chioma generalmente inserita in alto e piuttosto espansa negli esemplari di più grandi dimensioni. A seconda della pendenza del versante sul quale vegetano le piante, il suolo si presenta più o meno superficiale ed il sottobosco è rappresentato principalmente da specie della macchia mediterranea come erica arborea, corbezzolo e cisti.

5.2.2. *La pineta di Candelara (CAN)*

Il bosco demaniale di Candelara, che si estende per circa 160 ha sui Monti Peloritani nel comune di Messina (ME), fu impiantato a partire dal 1930 a seguito di un imponente intervento di rimboschimento, con l'obiettivo di tutelare le vallate del bacino montano "Tarantonio" dall'azione erosiva delle acque meteoriche. I forestali dell'epoca, decisero di introdurre diverse specie di conifere ed in particolare di pino domestico, in quanto l'estremo degrado della stazione rendeva difficile il rimboschimento con specie più esigenti. Allo scopo fu importato seme dalla Toscana ed utilizzato a spaglio in piena estate (luglio – agosto).

Successivamente la costituzione della pineta e dopo l'affrancamento della stessa, sono stati eseguiti numerosi e ripetuti interventi di semina e sottopiantagioni di latifoglie. In diverse aree questi interventi hanno determinato lo sviluppo di un fitto sottobosco costituito da leccio e roverella

con più rara presenza di corbezzolo (*Arbutus unedo* L.) e di pioppo negli impluvi ed un piano dominato costituito dalla fustaia di pino domestico. Localizzati lungo i margini delle numerose piste che attraversano tutto il bosco di Candelara si trovano diversi filari di cipressi (*Cupressus sempervirens* L.), anch'essi messi a dimora proprio per segnare il percorso di queste strade e permetterne una più facile individuazione. In buona parte, nella zona oggetto di studio, la matrice litologica è rappresentata da depositi del Miocene medio superiore, costituita da marne argillose grigie con sottili intercalazioni di arenarie a grana medio fine (Gatto 2002). Nelle zone più elevate della pineta di Candelara si riscontrano conglomerati calcarei risalenti al Pliocene medio. E' presente uno strato di terreno vegetale particolarmente ricco di sostanza organica variamente decomposta, di spessore mediamente intorno a 50 cm (Gatto 2002).

5.2.3. *La pineta di Badiazza (BAZ)*

La pineta di contrada Badiazza si trova lungo i pendii della vallata del torrente San Michele, sui monti Peloritani orientali del comune di Messina. Questo popolamento è un "relitto" dell'azione di rimboschimento, intrapresa già dal 1873 ad opera del Consorzio per il Rimboschimento e proseguito successivamente dal 1920 dal Demanio Forestale dei Peloritani, che ha portato alla costituzione di vaste pinete di pino domestico (*Pinus pinea* L.), pino marittimo (*Pinus pinaster* Aiton), Pino d'Aleppo (*Pinus halepensis* Mill.) e formazioni di castagno, leccio e roverella.

Questa tipologia strutturale è rappresentativa della pineta pura di pino domestico. Attualmente il soprassuolo presenta densità piuttosto uniformi e strutture diversificate in diversi piani a seguito di forti fenomeni di concorrenza che si sono verificati nel passato e che hanno portato alla presenza di piante di grandi dimensioni accanto ad altre decisamente più piccole. Gli alberi si presentano con una chioma, generalmente inserita in alto ma piuttosto ristretta e la forma del fusto piuttosto regolare.

5.2.4. *La pineta di Colamaio (CLM)*

La pineta sita in località Colamaio (Calabria tirrenica), nel comune di Pizzo Calabro (VV), rientra nella categoria delle pinete litoranee del golfo di S. Eufemia che vennero impiantate a partire dagli anni '50 a seguito di un imponente opera di bonifica dell'allora esteso sistema dunale che era occupato da stagni e zone palustri intervallati da formazioni di macchia mediterranea e boschi planiziali igrofilii (Mercurio et al. 2009). In questi ambienti si diffuse la malaria a causa del ristagno delle acque tra i cordoni sabbiosi del litorale ed il costituito Consorzio di Bonifica, insieme all'Azienda di Stato Foreste Demaniali di Catanzaro, eseguirono le prime opere di rimboschimento con pino domestico, in parte con semina diretta ed in parte con piantine allevate in vasi di terracotta.

Nel primo tratto verso mare fu creata una larga fascia di protezione dietro una piccola duna artificiale, impiegando psamma, acacie e tamerici, rilasciando verosimilmente le specie autoctone presenti. Nelle zone paludose e soggette a periodico allagamento furono aperti fossi di scolo e furono impiantati eucalitti e pioppi. La pineta di Colamaio si estende per una lunghezza di circa 3.9 km con una larghezza massima di 524 m e occupa una superficie di circa 122.9 ettari su un substrato costituito principalmente da dune e sabbie mobili e stabilizzate (Mercurio et al. 2009). Il popolamento si presenta ad alta densità, per cui i fusti sono esili e la chioma verde è ridotta alla parte terminale. Il sottobosco è assente a causa dell'insufficiente illuminazione e il frequente calpestio. Nel corso degli anni non è mai stata sottoposta ad alcun tipo di gestione, tranne che ad uno sporadico diradamento, anche se la densità ancora elevata determina la mortalità delle piante e condizioni di minore stabilità meccanica.

5.2.5. *La pineta di Cropani (CRO)*

La pineta si trova nel comune di Cropani in provincia di Catanzaro sul versante ionico della Calabria. I rimboschimenti realizzati in molti tratti del versante ionico calabrese rientrano nella vasta attività di opere di bonifica attuate a partire dalla fine degli anni 1950, soprattutto su aree limitrofe, dotate di scarsa fertilità, soggette a processi di denudamento elevato con conseguente degradazione fisico-chimica, e lungo i litorali caratterizzati da zone paludose, a rischio malaria, marginali per le colture agricole. L'azione pubblica di conservazione del suolo prevedeva l'occupazione temporanea dei terreni di proprietà privata secondo gli effetti del R.D.L. 30.12.1923 n° 3267 e relativo regolamento (R.D. 16.5.1926 n° 1126), incontrando una scarsa resistenza dei proprietari che, in seguito al massiccio esodo dall'agricoltura registratosi negli anni '60, erano disposti a cedere anche le superfici migliori poste a coltura da diversi anni. Sul finire degli anni 1950 furono occupate le terre prossime ai litorali e agli inizi degli anni 1960, ad opera dei Consorzi di Bonifica locali, furono eseguiti i rimboschimenti. Dopo circa dieci anni dall'esecuzione dei rimboschimenti, tali terreni furono riconsegnati ai proprietari. Gli interventi realizzati nel corso degli anni hanno consentito la valorizzazione ambientale e turistica del litorale, caratterizzata da una crescente frequentazione turistica tale che, intorno agli anni '80, il comune di Cropani ha eseguito l'espropriazione di un breve tratto di pineta per realizzare il lungomare con annesso piazzale per i parcheggi. Dopo circa venti anni dalla messa a dimora e dalla semina, in seguito ad autorizzazione del Corpo forestale dello Stato, sono stati eseguiti diradamenti di tipo selettivo, ad opera dei proprietari privati, con lo scopo di regolare la densità della pineta. In seguito alla semina in molti casi le piante erano cresciute in gruppi densi fino a 0,30 - 0,50 - 1 m di distanza sulla fila. Successivamente non è stato eseguito nessun intervento. La pineta è costituita da pino domestico

(*Pinus pinea* L.) e si caratterizza per un'elevata densità, sesto d'impianto irregolare, forse per via della semina in filari. Le piante presentano un buon sviluppo in altezza anche se i diametri sono piccoli; l'autopotatura è frequente, infatti le chiome sono concentrate nella parte alta della pianta. I fusti sono esili e spesso ricurvi per l'azione del vento. Il sottobosco, a causa dell'elevata densità, è privo di rinnovazione naturale, sia del pino che di altre specie; lo strato di lettiera è poco spesso, contribuendo poco sia per la protezione dall'inacidimento che a migliorare la fertilità. La natura del substrato è variabile. Si passa da suoli a tessitura grossolana a suoli moderatamente fini, da sottili a profondi

Nella fascia retrostante la pineta sono presenti piante di eucalitto, soprattutto *E. camaldulensis* Dehn., rade, in alcuni casi ceduate, con fusti irregolari e curvati. All'interno di questa parte di soprassuolo si rinnova il lentisco e altre specie erbacee, soprattutto compositae.

5.2.6. La pineta di Ziriò (ZIR)

La pineta di pino nero (*Pinus nigra* Arnold) si trova all'interno della foresta Musolino – Ziriò, in provincia di Messina, che si stende da Pizzo Corvo (412 m s.l.m.) fino a Ponte Santo Stefano e interessa una fascia della larghezza variabile fra 1000 e 5000 m, per una lunghezza di circa 12 Km, che si affaccia sul versante tirrenico e ionico. Ricade nella testata dei bacini montani del torrente Calvaruso e Saponara per quanto riguarda il versante ovest e San Filippo, Larderia, Mili e Santo Stefano per il versante orientale. In questa zona si trovano i monti più elevati della catena dei Peloritani. Questa foresta costituisce la parte più vasta del demanio regionale in provincia di Messina poiché interessa il 90% dei terreni che attualmente costituisce l'intero comprensorio dei Peloritani. Ricade in territorio dei comuni di Messina e Villafranca Tirrena. All'interno della foresta si trova anche il vivaio Ziriò, di circa di 3.000 m² di superficie realizzato nel 1952-53 e destinato alla produzione delle piantine che venivano messe a dimora nell'Azienda stessa. I rimboschimenti sono stati iniziati nel 1952. Le specie legnose maggiormente utilizzate sono state il pino domestico, il pino nero, il castagno e in minor misura sono state piantate anche querce, specialmente roverella e cerro, eucalitti e robinia soprattutto lungo le pendici scoscese dove erano in atto gravi fenomeni di erosione superficiale del suolo. Il bosco nell'area presa in considerazione è costituito principalmente da un rimboschimento di pino nero, con presenza di castagno. Laddove il rimboschimento ha mantenuto una struttura “chiusa” e il pino nero è la specie nettamente dominante si osserva una ridotta presenza di individui di castagno che costituiscono, per lo più, un piano inferiore e non raggiungono mai dimensioni significative. È interessante osservare, invece, come in alcune zone dove sono stati effettuati interventi colturali, anche di leggera intensità, (in molti casi si può parlare di fattori di “disturbo” legati a utilizzazioni di singole piante deperienti o

morte in piedi), la struttura e la composizione del bosco presentino modificazioni che vanno nella direzione di una sempre maggiore complessità strutturale della pineta. Il suolo non è molto profondo e presenta un sottile strato di lettiera indecomposta. Questa tipologia strutturale è la risultante dell'applicazione nel passato, in modo molto irregolare e discontinua nel tempo, del tradizionale taglio a scelta. L'area non è stata interessata dall'incendio verificatosi nel 1979. A seguito dell'applicazione del taglio a scelta, la rinnovazione di pino nero, specie eliofila, ha trovato grosse difficoltà a insediarsi e ad affermarsi, mentre il castagno, specie mesofila, è stato favorito.

Attualmente il soprassuolo presenta densità piuttosto uniformi e struttura di tipo biplano. Il pino nero presenta una chioma piuttosto ampia, generalmente inserita in alto; la forma del fusto è decisamente regolare nel caso delle piante che costituiscono il piano dominante. Gli individui di castagno costituiscono il piano dominato, con piante più o meno vigorose in funzione dello spazio che era stato liberato in occasione di precedenti utilizzazioni.

5.3. La costruzione delle serie individuali e l'interdatazione

Le carote legnose prelevate in campo sono state analizzate in laboratorio, presso il DendrologyLab del dipartimento DAFNE dell'Università della Tuscia. I campioni sono stati posti su di un listello di legno, facendo attenzione nel porre la loro fibratura perpendicolarmente al piano orizzontale e scarificate per mezzo di un bisturi lungo la sezione trasversale, in modo da metterne in evidenza gli anelli legnosi; l'evidenziazione è stata poi migliorata grazie all'uso di acqua e gesso. Le ampiezze anulari sono state così misurate con precisione del centesimo di millimetro mediante uno stereomicroscopio ed il sistema CCTRMD (*Computer Controlled Tree-Ring Measurement Device*) di Aniol (1987) interfacciato ad un computer, il quale salva ogni lettura effettuata in un file per mezzo del programma CATRAS (Aniol, 1983). Si è proceduto successivamente alla sincronizzazione visuale e statistica delle curve, per verificare la concordanza dei principali minimi e massimi assoluti e l'assenza di opposizioni di fase. La sincronizzazione statistica, si è basata sui valori forniti dal coefficiente di coincidenza (G) e del t di Student, relativi al confronto fra due o più cronologie, calcolati da CATRAS. Si è provveduto quindi, all'interdatazione delle curve, ovvero ad assegnare l'anno di formazione ad ogni anello legnoso. Grazie alla netta distinzione della transizione tra legno primaverile e tardivo è stato misurato inoltre l'accrescimento dell'anello primaverile (EW) e di quello tardivo (LW). Una volta datate tutte le serie elementari, è stato utilizzato il programma COFECHA (Holmes, 1983) per verificare ulteriormente la qualità delle datazioni effettuate e per avere una prima informazione sul segnale comune espresso dalle serie elementari (Grissino-Mayer, 2001). Il programma sviluppa una cronologia "di riferimento" priva di

variazioni di bassa frequenza usando una *spline* con rigidità di 32 anni con il 50% di risposta in frequenza, mette a confronto la serie individuali alla cronologia master utilizzando un'analisi di correlazione e restituisce un file contenente le statistiche descrittive delle serie individuali e della cronologia di riferimento (Grissino-Mayer 2001).

5.4.I parametri statistici dendrocronologici

Una volta determinata l'effettiva bontà delle serie interdatate create si è passati alla definizione dei principali parametri statistici dendrocronologici confrontando, tra le diverse stazioni campionate, i valori medi ed il campo di variazione di tali parametri. Il primo parametro considerato è stato il valore medio di ampiezza anulare (MW):

$$MW = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{t=n} X_t$$

dove x_t rappresenta l'ampiezza anulare nell'anno t e n il numero di anni che costituiscono la serie dendrocronologica. Con questo parametro si sintetizzano i diversi fattori che determinano ed influenzano gli accrescimenti, come la specie, l'età e la fertilità stazionale.

Il secondo parametro calcolato è stato la deviazione standard (SD):

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{t=n} (X_t - MW)^2}$$

la quale ha fornito un indice di dispersione dei valori indagati intorno al valore medio, indicando per ogni cronologia individuale, la variabilità delle ampiezze anulari.

Al fine di poter descrivere il grado di recettività degli alberi campionati nei confronti delle variazioni climatiche di alta frequenza è stato applicato alle serie cronologiche precedentemente costruite il "coefficiente di correlazione di primo ordine" (A_1):

$$A_1 = \frac{\sum_{t=1}^{t=n} (X_t - MW_x)(Y_t - MW_y)}{(n-1)SD_x SD_y}$$

dove y rappresenta la serie temporale x sfasata di un anno per consentire la sovrapposizione dell'anno n con l'anno $n - 1$. Tale parametro è in grado di spiegare la correlazione corrente tra l'anello dell'anno n e quello dell'anno $n - 1$ fornendo una misura dell'inerzia di accrescimento della pianta dovuta alla dipendenza dell'anno precedente, basata soprattutto sull'accumulo autunnale di sostanze di riserva.

Un altro parametro calcolato che viene usato molto frequentemente nelle analisi dendrocronologiche è stato la sensitività media (MS):

$$MS = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{t=n-1} \left| \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{x_{t+1} + x_t} \right|$$

che esprime la misura della variabilità di alta frequenza delle serie dendrocronologiche, indicando per ogni pianta la capacità di reagire ad input climatici di breve periodo con immediate variazioni nell'accrescimento. Contrario della sensitività è la compiacenza che si manifesta con una forte inerzia negli accrescimenti e quindi un appiattimento della curva, indicando così per quel determinato albero una scarsa reattività agli stimoli ambientali esterni.

Infine per valutare la variabilità temporale nella forza del segnale comune della crescita radiale di ogni serie, è stato calcolato il coefficiente di correlazione media (RBAR) tra le cronologie di ogni sito. RBAR è il coefficiente di correlazione medio per tutti i possibili abbinamenti tra gli accrescimenti delle serie in una cronologia, calcolati per un intervallo di tempo comune specificato (Wigley et al. 1984, Briffa 1995) che per la nostra rete corrisponde al periodo 1974-2014.

5.5. Analisi auxologica

Per studiare le storie auxologiche delle piante carotate sono state ricostruite le serie storiche di incremento diametrico. La ricostruzione degli incrementi diametrici è stata ottenuta, per ogni anno di ogni serie di ampiezza anulare (RW), sottraendo al diametro fuori corteccia misurato a petto d'uomo due volte il valore di incremento radiale, secondo la seguente formula:

$$DBH_{t-n} = DBH_{(t-n)+1} - 2RW_{(t-n)+1}$$

con $1 < n < [\text{lunghezza della serie}]$ e dove DBH_t = diametro misurato a petto d'uomo nell'anno t (cm) e RW_t = ampiezza anulare nell'anno t (cm). In questo modo ogni serie di ampiezza anulare è stata trasformata in una serie storica di incremento diametrico, in cui per ogni anno t è noto il diametro DBH_t della pianta.

Le serie di ampiezza anulare (RW) sono state infine trasformate in serie di Incremento di Area Basimetrica (BAI) espresso in $\text{cm}^2 \text{ anno}^{-1}$ (Piovesan et al. 2008). 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 (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:

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

dove DBH è il diametro misurato in campo attraverso il cavallettamento e

$$DC = \sum_{i=1}^n RW * 0.002$$

dove RW= ampiezza anulare. Per il calcolo definitivo dell'incremento di area basimetrica si è proceduto quindi sottraendo due volte l'ampiezza anulare annua (w_t) dal diametro fuori corteccia con la seguente formula:

$$BAI_t = \frac{\pi}{4} [DBH_t^2 - (DBH_t - 2w_t)^2]$$

I valori di BAI così ottenuti sono stati messi in relazione con i relativi diametri ed età (delle sole carote che raggiungevano il midollo) per verificare l'eventuale esistenza di correlazione. È stato inoltre calcolato l'incremento medio (Im) riferito a ciascun popolamento.

5.6. La standardizzazione

I valori di ampiezza anulare totale (RW), di legno primaverile (EW), di legno tardivo (LW) e di incremento di area basimetrica (BAI) di ciascuna carota legnosa sono stati utilizzati per costruire le **cronologie stazionali** di **RW**, **EW**, **LW** e di **BAI**, ossia le medie delle ampiezze anulari e di BAI delle serie individuali. Per la realizzazione delle curve stazionali sono state utilizzate un minimo di 10 serie individuali, mediate tra loro per ciascun anno della cronologia. Al fine di rimuovere la variabilità di lungo periodo, legata al trend biologico dovuto all'età ed alle dimensioni della pianta, le cronologie sono state standardizzate per l'analisi di alta frequenza (Di Filippo et al. 2007). Ciascuna serie di ampiezza anulare (RW, EW, LW) è stata standardizzata con una *spline* cubica con periodo di 50 anni, mentre le serie di BAI sono state standardizzate con una retta. Si sono ottenute così delle serie standardizzate indicizzate i cui valori indicano la differenza rispetto al valore del trend biologico stimato in un determinato anno. Il procedimento si è completato

aggiungendo ad ogni indice annuale una costante per rendere la media uguale ad 1 e dare, quindi, un ugual peso a tutte le serie, che sono state mediate per produrre una cronologia finale per amplificare ulteriormente il segnale.

La qualità delle cronologie standardizzate così prodotte è stata valutata per mezzo dell'EPS (*Expressed Population Signal*), considerandole valide solo dal periodo in cui l'EPS superasse la soglia convenzionale di 0,85 (Wigley et al. 1984). Nelle analisi che seguono è stato preso in considerazione il periodo 1974-2014 (40 anni), comune a tutte le cronologie. Alle cronologie standardizzate è stato poi rimosso il rumore dovuto all'autocorrelazione, attraverso l'applicazione di un modello autoregressivo di terzo ordine. L'applicazione del modello autoregressivo porta ad un'ulteriore indicizzazione della media stagionale, ora costituita da una cronologia temporale di residui con media uguale ad 1 e priva di autocorrelazione.

Le cronologie residue a questo punto sono state considerate rappresentative dell'influenza del clima sulle variazioni di crescita di alta frequenza dei popolamenti indagati. Tutte le analisi dendrocronologiche sono state effettuate mediante i pacchetti di R "dplR" (Dendrochronology Program Library in R (Bunn 2008; Bunn 2010) e "detrendeR" (Campelo et al. 2012), un interfaccia grafica per analizzare e visualizzare dati dendrocronologici

5.7. Analisi multivariata

Per evidenziare quanto più possibile il segnale climatico che condiziona la crescita all'interno di ciascun popolamento, con il fine di mettere in evidenza la presenza di modalità di crescita comuni tra le diverse stazioni, si sono confrontate le variabilità annuali delle serie residue di ogni sito di indagine attraverso la statistica multivariata. Dopo aver unito tutte le cronologie residue di crescita nell'intervallo temporale comune in un'unica matrice, è stata applicata l'Analisi delle Componenti Principali (PCA - *Principal Component Analysis*) con lo scopo di ordinare le variabili in gruppi omogenei basati sulla loro affinità (Orlóci 1975; Jolliffe 1986; Legendre e Legendre 1988). Ogni componente principale (PC), infatti, rappresenta una frazione della variabilità totale in comune a più cronologie stagionali alla cui origine c'è, evidentemente, un comune segnale di tipo climatico. 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 stagionale possiede con la serie di punteggi di ogni PC viene detta "peso" (*loading*), e sintetizza il legame esistente con quel segnale climatico. L'Analisi delle Componenti Principali è stata effettuata sulle cronologie residue di RW, EW e LW attraverso l'utilizzo del software PAST (Hammer e Harper 2006)

5.8. Analisi dendroclimatica

Sulle cronologie residue di RW, EW e LW è stata effettuata la calibrazione (Bradley 2014), ovvero lo studio del legame tra l'accrescimento radiale degli alberi ed i fattori climatici. L'analisi è stata sviluppata sia a livello di rete che di singolo sito. Per questa ricerca, i dati climatici dei regimi di precipitazioni e temperature, per ogni stazione, sono stati forniti dall'Istituto ISAC-CNR di Bologna.

Per lo studio dei rapporti tra il clima e la rete delle pinete di pino domestico sono state utilizzate le serie temporali di *score* di RW, EW e LW della componente con la varianza maggiormente rappresentativa, ottenuta dalla PCA e sono state confrontate con i dati climatici (Temperature e Precipitazioni) con il metodo delle funzioni di correlazione (CF). Infatti, correlando i dati climatici, di solito a una risoluzione mensile con cronologie stazionali, 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 variabili climatiche e consistono in stime di correlazione lineare di Pearson (Cropper 1984). I calcoli della significatività vengono effettuati secondo il metodo bootstrap (Efron e Tibshirani, 1986) ed 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 pseudo-campioni. Poiché l'accrescimento annuale del pino domestico può essere condizionato da eventi climatici verificatisi anche prima dell'inizio del periodo vegetativo, le correlazioni sono state effettuate con i dati termopluviometrici a partire dal mese di giugno dell'anno precedente la formazione dell'anello fino a dicembre dell'anno di formazione. Un prolungamento dell'attività cambiale quantomeno fino ad ottobre sembra, infatti, plausibile date le condizioni climatiche ancora favorevoli in questo periodo nelle aree esaminate. La finestra temporale presa in considerazione è quella che copre il periodo in comune alle serie (1974 – 2014). L'andamento nel tempo delle risposte ai fattori climatici, e quindi la stazionarietà delle correlazioni clima-accrescimento, è stata valutata con il metodo delle funzioni di correlazione mobile (*moving correlation function*, MCF) con finestra mobile di 30 anni con *offset* di 1 anno. Biondi (2000) ha introdotto il concetto di funzioni di risposta e di correlazione mobili. Questo argomento è diventato ampiamente dibattuto a causa del “fenomeno della divergenza”, vale a dire l'instabilità temporale delle relazioni di clima-accrescimento a partire dalla fine del ventesimo secolo (D'Arrigo et al. 2008), tant'è che il fattore temporale è sempre più integrato negli studi dendroclimatici ed ecologici (Schuster e Oberhuber 2013).

Indagando ancor più nel dettaglio e grazie alla possibilità di confrontare le cronologie residue con dati termopluviometrici stazionali di riferimento, sono state condotte le funzioni di

correlazione bootstrap tra le cronologie di RW, EW e LW dei singoli siti studiati con le rispettive variabili climatiche di precipitazioni e temperatura per identificare il segnale climatico caratteristico di ogni sito.

Le CF e le MCF sono state effettuate con il package di R “treeclim” (Zang e Biondi 2015).

5.9. Analisi della variazione di crescita a scala decennale

Al fine di studiare ed interpretare le variazioni di crescita a scala decennale, le cronologie stazionali standardizzate di BAI, sono state filtrate attraverso il software PAST (Hammer e Harper 2006), 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 alta frequenza dei diversi popolamenti per ciascuno dei 6 siti indagati. Lo stesso filtraggio è stato operato sulle serie di valori di temperatura e precipitazioni per tre tipi di analisi: la prima considerando il periodo che interessa i mesi di Dicembre (anno precedente la formazione dell'anello), Gennaio, Febbraio e Marzo, la seconda i mesi di Settembre e Ottobre, la terza i mesi di Maggio e Giugno per poter confrontare la presenza di concordanza tra variabilità di alta frequenza, produttività e clima. Questi periodi sono stati selezionati sulla base dei risultati delle funzioni di correlazione. Le analisi sono state condotte sempre per il periodo comune a tutte le serie (1974-2014).

Per l'analisi dell'influenza dei fattori climatici sulla presenza percentuale del solo legno primaverile e del legno tardivo si sono messe a confronto le curve dei trend di crescita percentuale di EW e LW con il regime di precipitazioni dei periodi invernali (da dicembre a marzo), dei periodi estivi (maggio-giugno) e dei periodi autunnali (settembre-ottobre). Si è inoltre calcolato l'Indice SPI (*Standardized Precipitation Index*) (McKee et al. 1993) come indicatore di surplus o deficit pluviometrico estesamente utilizzato a livello internazionale e confrontato con i trend percentuali di produzione del legno primaverile e tardivo. Esso 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). I valori dello SPI oscillano nella maggior parte dei casi tra +2 e -2 anche se questi estremi possono essere superati entrambi. I valori positivi indicano situazioni di surplus pluviometrico mentre valori negativi individuano situazioni di siccità. Il calcolo dello SPI è stato effettuato con il package “spi” (Neves 2012) in ambiente R.

6. RISULTATI

6.1. Caratteristiche della rete dendroecologica

Dal campionamento si sono prelevati un totale di 156 campioni, 121 dei quali sono stati utilizzati per costruire le 18 cronologie stazionali (6 di RW totale, 6 per il solo EW e 6 per il solo LW) (Figura 3).

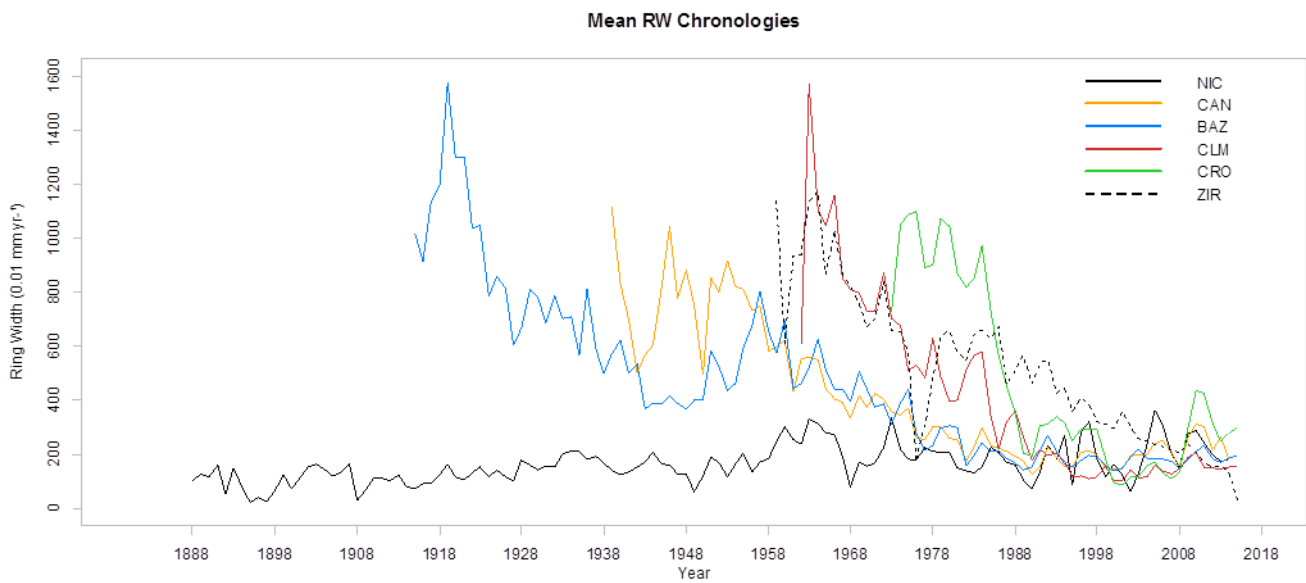


Figura 3 – Cronologie stazionali dei popolamenti di pino domestico della rete di Sicilia e Calabria. In tratteggio la cronologia stazionale di pino nero

Il primo dato importante che emerge dalle analisi dendrocronologiche è quello relativo all'età riscontrata negli alberi dominanti e codominanti di ciascun popolamento che, pur essendo una stima in difetto dell'età reale, fornisce importanti informazioni di carattere ecologico. All'interno della Rete si è osservato un notevole campo di variazione di questa variabile, che oscilla tra un minimo di 43 anni a Colamaio (Calabria tirrenica) ad un massimo di 122 anni a Nicosia (Sicilia) (Tabella 2). Mettendo in relazione le età con i diametri delle piante campionate in ciascun sito, attraverso una regressione lineare, è risultata un'assenza di correlazione in NIC, BAZ (pinete con le età maggiori rilevate) e CRO (Figura 4), evidenziando che alle dimensioni maggiori degli alberi non corrispondono sempre le età maggiori. Sussiste ancora una debole correlazione a CAN e CLM dove comunque i valori risultano abbastanza dispersi (Figura 4). Nel caso di questi due popolamenti permangono ancora le caratteristiche tipiche dei rimboschimenti, a testimonianza anche del fatto della mancata gestione di queste pinete nel corso del tempo, che si traduce in una ancor presente omogeneità strutturale.

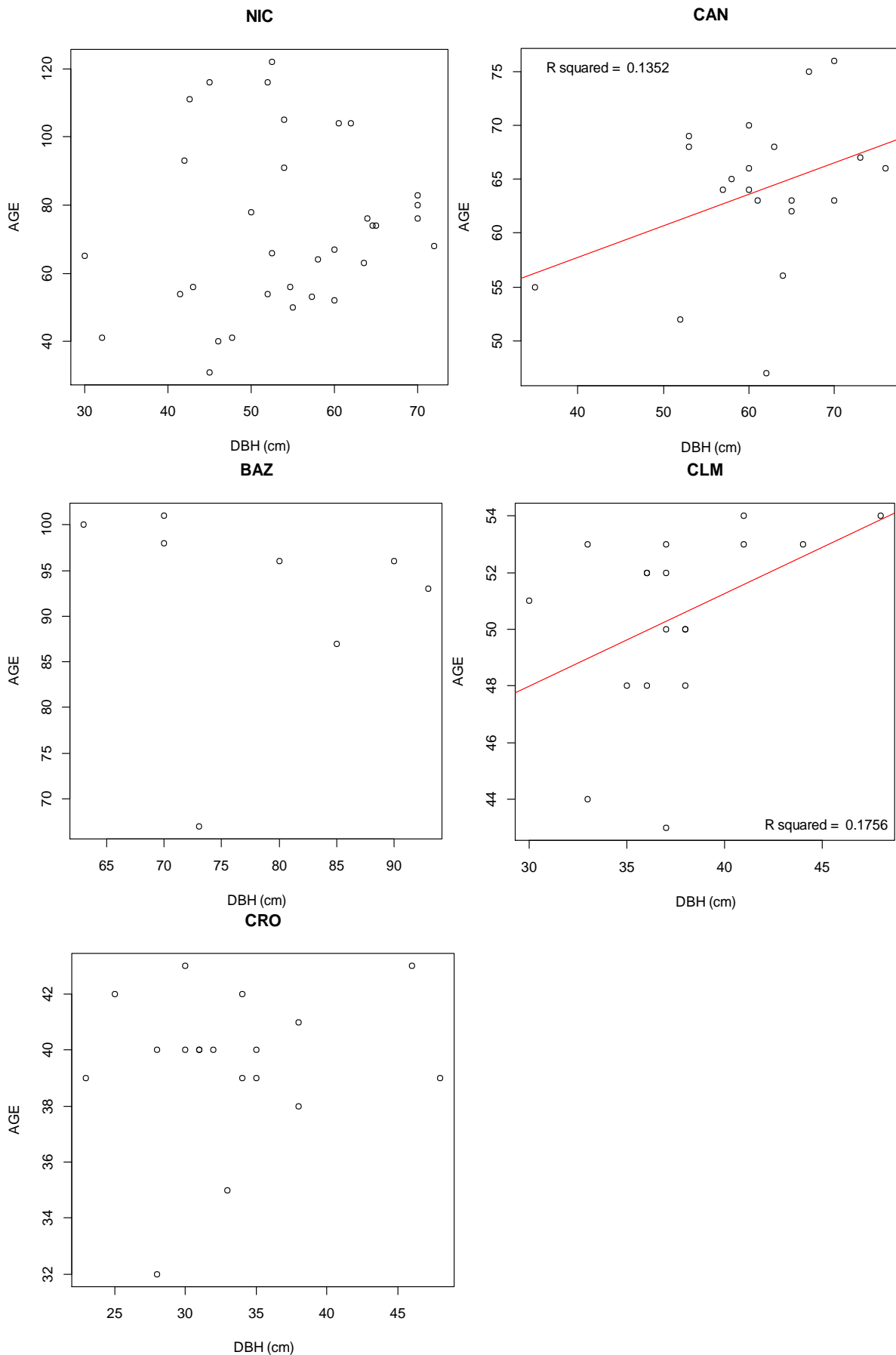


Figura 4 - Correlazione età-diametro della rete delle pinete di pino domestico, utilizzando tutte le carote integre che raggiungevano il midollo. (NIC): Nicosia; (CAN): Candelara; (BAZ) Badiazza; (CLM): Colamaio; (CRO): Cropani. Gli assi di ogni grafico sono riportati in scale diverse.

Analizzando i valori medi dei parametri statistici dendrocronologici all'interno di ogni campione, si sono valutate le principali caratteristiche dell'accrescimento anulare di ogni stazione (Tabella 2). I parametri mostrano nel complesso una certa omogeneità di accrescimento tra le stazioni di NIC, BAZ e CLM con un valore di ampiezza anulare media (MW) che oscilla tra i 2.43 mm di NIC e 2.85 mm di BAZ. Il valore più basso di MW a NIC rispecchia probabilmente il principio secondo cui alberi più vecchi crescono più lentamente (trattandosi effettivamente del popolamento con le età maggiori riscontrate) e a quote più alte. Valori maggiori di MW si ritrovano a CAN e CRO. Per entrambi i siti questo potrebbe essere spiegato dal fatto che a CAN si riscontrano le migliori condizioni di fertilità stagionale e CRO è il popolamento che si trova ancora in una fase giovanile. Un ampiezza anulare media maggiore si riscontra a ZIR (4.46 mm) trattandosi di una specie differente (pino nero) rispetto agli altri siti.

Tabella 2 - Parametri statistici dendrocronologici dei siti studiati. (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; (EPS): segnale espresso dalla popolazione; (±): deviazione standard

Sito	Piante	Campioni	CM	rbar	MW (mm anno ⁻²)	SD (mm anno ⁻²)	MS	A ₁	N. anni (max)	Periodo	EPS>0.8 5
NIC	39	33	0.565	0.66	2.43±0.8	1.405±0.4	0.397	0.582	122	1888-2014	1932-2014
CAN	22	20	0.520	0.57	3.60±0.6	2.524±0.7	0.233	0.862	76	1939-2014	1944-2013
BAZ	10	8	0.379	0.68	2.85±0.8	2.135±0.6	0.225	0.882	101	1915-2015	1916-2015
CLM	30	20	0.551	0.78	2.82±0.5	2.424±0.5	0.240	0.913	54	1962-2015	1962-2015
CRO	30	20	0.544	0.81	3.08±0.8	2.501±0.8	0.309	0.860	43	1973-2015	1974-2015
ZIR	25	20	0.587	0.68	4.46±0.7	2.636±0.6	0.238	0.831	57	1959-2015	1960-2015

La deviazione standard (SD) è controllata sostanzialmente dagli stessi fattori di MW (Cook e Kairiukstis, 1990). Il suo campo di variazione oscilla tra il valore di 1.40 a Nicosia e quello di 2.52 a Candelara, presentando una variabilità individuale simile all'interno di ciascun campione. Come nel caso di MW, anche SD a Ziriò ha un valore maggiore (2.63). La sensitività media (MS) si mantiene sempre di poco al di sopra del valore limite di 0.2 se riferito alla crescita dell'intero anello (RW), con il valore più alto rilevato a Nicosia (0.397). Questa grandezza aumenta se riferita all'ampiezza del solo legno tardivo (LW) in tutti i siti (Tabella 3) dove raggiunge il valore più alto sempre nel sito di Nicosia, il che suggerisce che LW sia apparentemente più sensitivo ai fattori ambientali limitanti. Nel complesso il legno primaverile (EW) cresce quasi il doppio rispetto al legno tardivo, come testimoniano i valori di MW (Tabella 3) e rappresenta in media il 70%

dell'intero anello. La misura dell'inerzia di accrescimento della pianta dovuta alla dipendenza dell'accrescimento attuale da quello dell'anno precedente attraverso il coefficiente di autocorrelazione di primo ordine (A_1), oscilla tra il valore minimo di 0.5 a NIC e 0.9 a CLM. Nel complesso il valore di EPS è sempre al di sopra del valore soglia di 0.85 nel periodo comune a tutte le cronologie del 1974-2014 (Tabella 2).

Tabella 3 - Parametri statistici dendrocronologici relativi al solo legno primaverile (EW) e legno tardivo (LW). (rbar): correlazione media tra le serie; (MW): ampiezza anulare media; (SD): deviazione standard; (MS): sensibilità media; (A_1): autocorrelazione di primo ordine; (%): percentuale di legno primaverile e tardivo sull'intero anello.

Sito	EW						LW					
	rbar	MW (mm anno ⁻²)	SD (mm anno ⁻²)	MS	A_1	%	rbar	MW (mm anno ⁻²)	SD (mm anno ⁻²)	MS	A_1	%
NIC	0.61	1.97	±1.176	0.41	0.57	77	0.56	0.51	±0.405	0.54	0.37	23
CAN	0.52	2.54	±1.924	0.25	0.83	71	0.38	0.99	±0.776	0.40	0.64	29
BAZ	0.64	1.95	±1.610	0.23	0.87	73	0.65	0.77	±0.567	0.35	0.75	27
CLM	0.75	1.97	±1.745	0.25	0.90	68	0.70	0.86	±0.813	0.40	0.74	32
CRO	0.80	2.18	±1.892	0.34	0.86	70	0.81	0.86	±0.728	0.44	0.69	30
ZIR	0.74	2.77	±2.061	0.28	0.81	58	0.38	1.74	±0.908	0.30	0.64	42

6.2. Analisi multivariata e relazioni clima-crescita

L'Analisi delle Componenti Principali (PCA) è stata eseguita, per il periodo comune 1974-2014, separatamente sulle cronologie residue di ampiezza anulare totale (RW), di legno primaverile (EW) e di legno tardivo (LW). Si è inoltre deciso di non utilizzare in questa analisi della varianza comune ZIR che, mostrando una bassa affinità sostanziale con le altre cronologie (bassa correlazione media e DS), è stata studiata separatamente. In questo modo si è cercato di mantenere il più possibile puri i segnali che accomunano i diversi popolamenti di pino domestico, evitando il rumore potenzialmente apportabile da questo sito. La prima componente estratta dalle 5 cronologie residue di RW di pino domestico, spiega nel complesso il 46.6% della varianza totale originale ed è stata ritenuta sufficiente (mediante il metodo *broken stick*) per descrivere le principali modalità di crescita presenti all'interno della Rete (Tabella 4). La correlazione di ogni cronologia con ciascuna componente è stata rappresentata mediante dei grafici in cui gli assi sono le componenti ed i valori i relativi pesi (Figura 5). Il primo fatto che emerge è che rispetto alla prima componente (PC1), che generalmente accomuna tutte le variabili, si distinguono i popolamenti di pino siciliani di NIC, BAZ e CAN e quello calabrese di CRO (Figura 5), con NIC rappresentata con i *loadings* più bassi (Figura 7). Questo fatto è particolarmente interessante perché nel contesto della PCA, sta a significare che, nonostante siano popolamenti che si trovano in contesti regionali differenti e disposti secondo un gradiente altitudinale differente, esiste un fattore climatico comune che influenza la crescita di tutti gli individui indagati.

Tabella 4 - Statistiche dell'analisi delle componenti principali (PCA) estratte dalla matrice del periodo comune 1974 - 2014 per la cronologia residua di RW

PC	Eigenvalue	% of variance	Eig 2.5%	Eig 97.5%
1	2.33496	46.699	3.7059	56.096
2	1.09834	21.967	15.709	29.444
3	0.790424	15.808	8.7134	22.872
4	0.561336	11.227	4.672	16.407
5	0.21494	4.2988	1.836	51.836

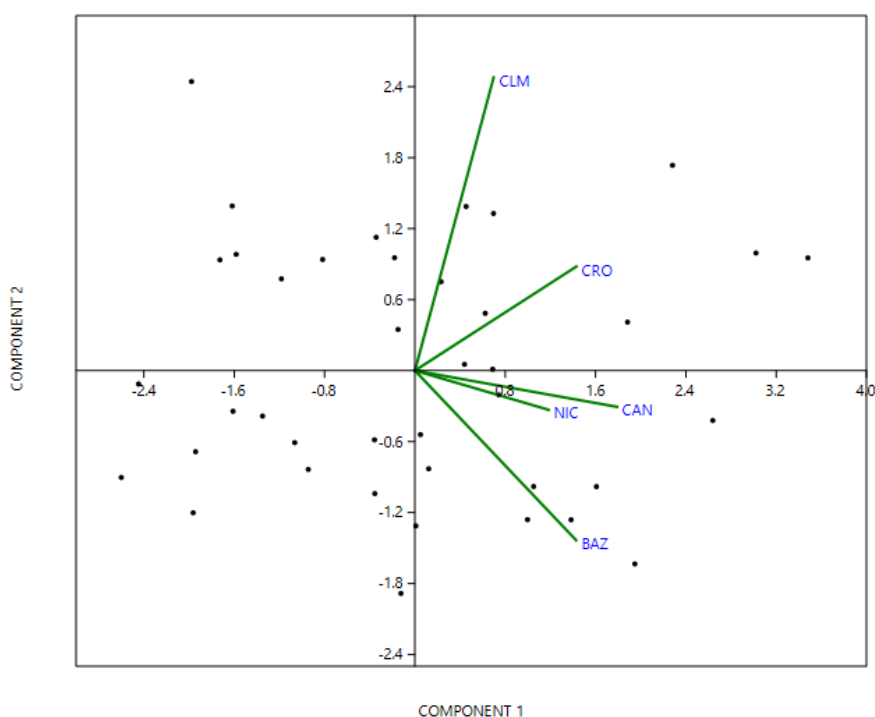


Figura 5 - Scatter plot dei pesi dell'analisi delle componenti principali (PCA) per la matrice del periodo comune 1974-2014

La pineta di Colamaio (CLM) invece, sembra avere un comportamento differente poiché la si ritrova sull'asse ortogonale del PC2, con il 21.9 % della varianza spiegata.

Per le cronologie residue di legno primaverile (EW) la prima componente spiega il 41.9% della varianza totale originale mentre per il solo legno tardivo (LW) la prima componente spiega il 53% della varianza (Tabella 5), distinguendo in maniera evidente i siti di NIC e CLM con quest'ultima spiegata sulla seconda componente (PC2) con il più alto valore di correlazione dei *loadings* (0.73). Quest'ultimo dato, coadiuvato dalla più alta sensibilità media proprio del legno tardivo, costituisce un'ulteriore dimostrazione di come esista un fattore climatico comune che influenza in maniera particolare le variazioni di crescita del legno tardivo.

Tabella 5 - Statistiche dell'analisi delle componenti principali (PCA) estratte dalla matrice del periodo comune 1974 - 2014 per le cronologie residue di legno primaverile (EW) e legno tardivo (LW)

PC	Early Wood				Late Wood			
	Eigenvalue	% of variance	Eig 2.5%	Eig 97.5%	Eigenvalue	% of variance	Eig 2.5%	Eig 97.5%
1	2.09721	41.944	18.28	50.011	2.65324	53.065	1.5271	61.322
2	1.16765	23.353	14.422	34.002	1.06239	21.248	15.496	27.47
3	0.835692	16.714	9.3082	24.485	0.819004	16.38	10.445	23.124
4	0.613253	12.265	5.0772	19.784	0.321898	6.438	3.4549	9.6675
5	0.2862	5.724	2.5731	8.8339	0.143467	2.8693	1.2932	59.212

L'analisi delle componenti principali ha evidenziato un raggruppamento geografico distinto per sito, con una maggiore evidenza per le pinete siciliane di CAN e BAZ rispetto a CLM della costa tirrenica calabrese, ancor più che da CRO nella costa ionica calabrese; dunque una sola componente principale (PC1) sembra essere importante per descrivere sufficientemente quattro cronologie indipendentemente dal tipo di legno preso in considerazione (Figura 6) e una seconda componente (PC2) è importante per descrivere il sito di CLM. Il segnale climatico comune, espresso dalla rete, ha il massimo di correlazione nei valori dei *loadings* in CAN (0.9) seguito dalle pinete di BAZ e CRO (0.72), NIC (0.59) e diviene meno caratteristico per la pineta di CLM nella Calabria tirrenica (Figura 7).

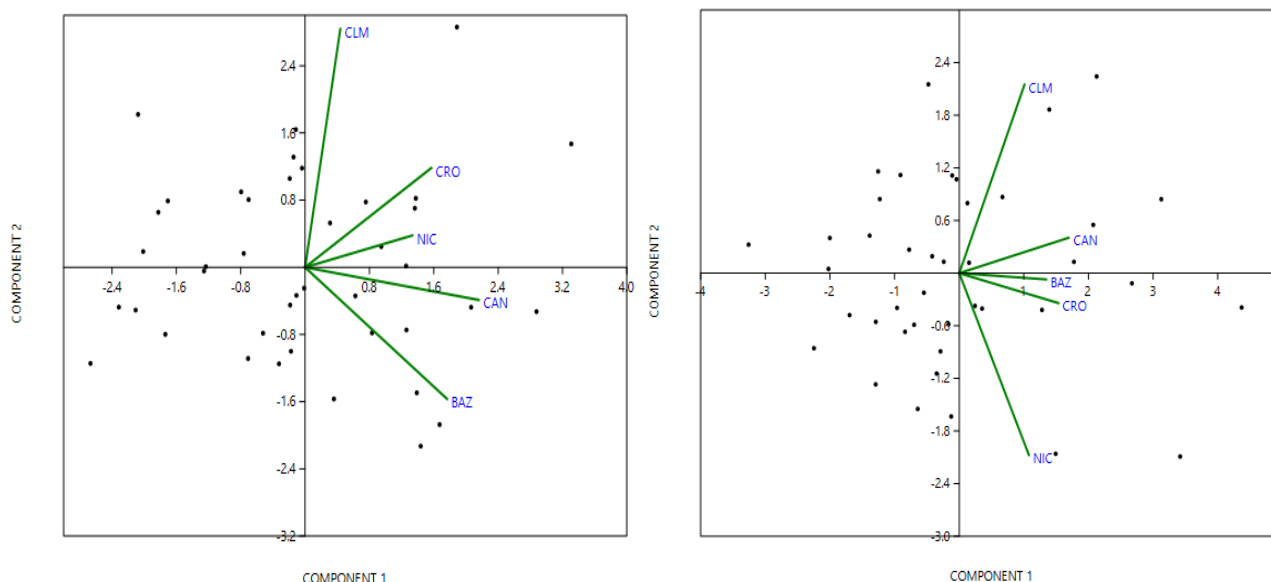


Figura 6 - Scatter plot dei pesi dell'analisi delle componenti principali (PCA) per la matrice del periodo comune 1974-2014 di EW (sx) e LW (dx)

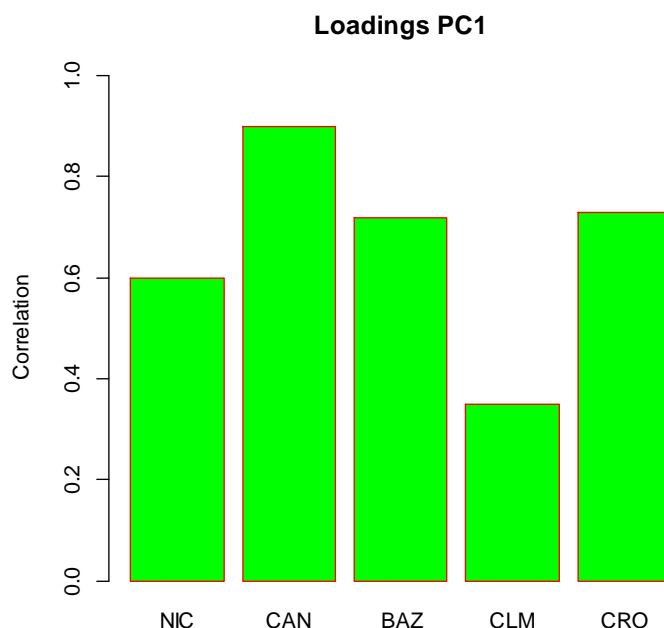


Figura 7 - Loadings plot dei valori di correlazione del PC1 riferito alle sole pinete di pino domestico

Come risultato dell'analisi PCA, la PC1 è stata considerata indicativa della variazione inter-annuale di alta frequenza della crescita di RW a livello di rete, per il periodo comune 1974-2014. Questa cronologia è stata così sottoposta alla successiva analisi delle funzioni di correlazione con metodo *bootstrap* ed è servita a mettere in luce i fattori climatici che influenzano la variabilità di questa componente e che rappresenta il principale segnale responsabile della crescita delle pinete individuate. In particolare, la PC1 è correlata direttamente alle precipitazioni di dicembre dell'anno precedente la formazione dell'anello (con coefficienti significativi con $p < 0.05$) ed inversamente alle temperature del mese di marzo dell'anno di formazione dell'anello. Mostra, inoltre, un fabbisogno di pioggia durante il periodo tardo primaverile-estivo (mese di maggio dell'anno di formazione dell'anello) (Figura 8). Considerando nel dettaglio le funzioni di correlazione di EW e LW, i risultati sembrano confermare i segnali riscontrati per l'intero anello. In tutta la rete la crescita del legno primaverile (EW) è positivamente influenzata dalla quantità di precipitazioni di settembre e ottobre dell'anno precedente la formazione dell'anello e continua a rispondere positivamente a quelle del periodo gennaio-marzo dell'anno corrente (Figura 9). Questo comportamento trova conferma nei risultati delle funzioni di correlazione eseguite per le cronologie residue di ogni singolo sito. Infatti la crescita di EW è correlata positivamente nei mesi di settembre e ottobre a BAZ e CRO (allegati) e si protrae nei mesi di dicembre e gennaio a CLM e NIC (allegati), dove CLM ha comunque un regime pluviometrico più alto nel periodo autunnale iniziale e NIC è la stazione più alta in quota. La quantità di acqua che si accumula nelle falde nel periodo autunnale-invernale, evidentemente favorisce lo sviluppo di EW, mentre le temperature dello stesso periodo

(settembre-ottobre) influenzano negativamente la formazione di questa parte dell'anello. Inoltre, EW sembra beneficiare ancora di alti valori di temperatura nel mese di novembre dell'anno precedente la formazione dello stesso (Figura 9). Anche in questo caso in NIC, CAN, CLM e CRO le correlazioni confermano come EW in questi siti sia sfavorito da alte temperature (allegati) e che nel caso di CRO, questo segnale prosegue anche in primavera nei mesi di marzo e maggio a testimonianza del fatto che ci si trovi nella Calabria ionica in un clima più caldo-arido. Differentemente da tutti gli altri siti, ZIR mostra una correlazione positiva invece nel mese di marzo dell'anno di formazione dell'anello.

Le funzioni di correlazione svolte con la cronologia residua di PC1 di LW mostrano come la formazione di questa parte dell'anello è positivamente influenzata dalle precipitazioni di settembre e ottobre dell'anno in corso, con quest'ultimo fortemente correlato allo sviluppo del legno tardivo (Figura 10) e presente in tutti i siti (allegato). Inoltre è stata rilevata una correlazione positiva tra la crescita di LW con le temperature di dicembre dell'anno in corso per PC1, e negativa in luglio e ottobre a CRO nell'anno di formazione dell'anello. Le funzioni di correlazione del PC2 con LW (per il sito di CLM) mostrano una correlazione negativa con le precipitazioni nel mese di gennaio dell'anno di crescita e correlazioni positive con le temperature nel mese di settembre nell'anno precedente. Risulta inoltre correlato negativamente con le temperature del mese di dicembre (Figura 11).

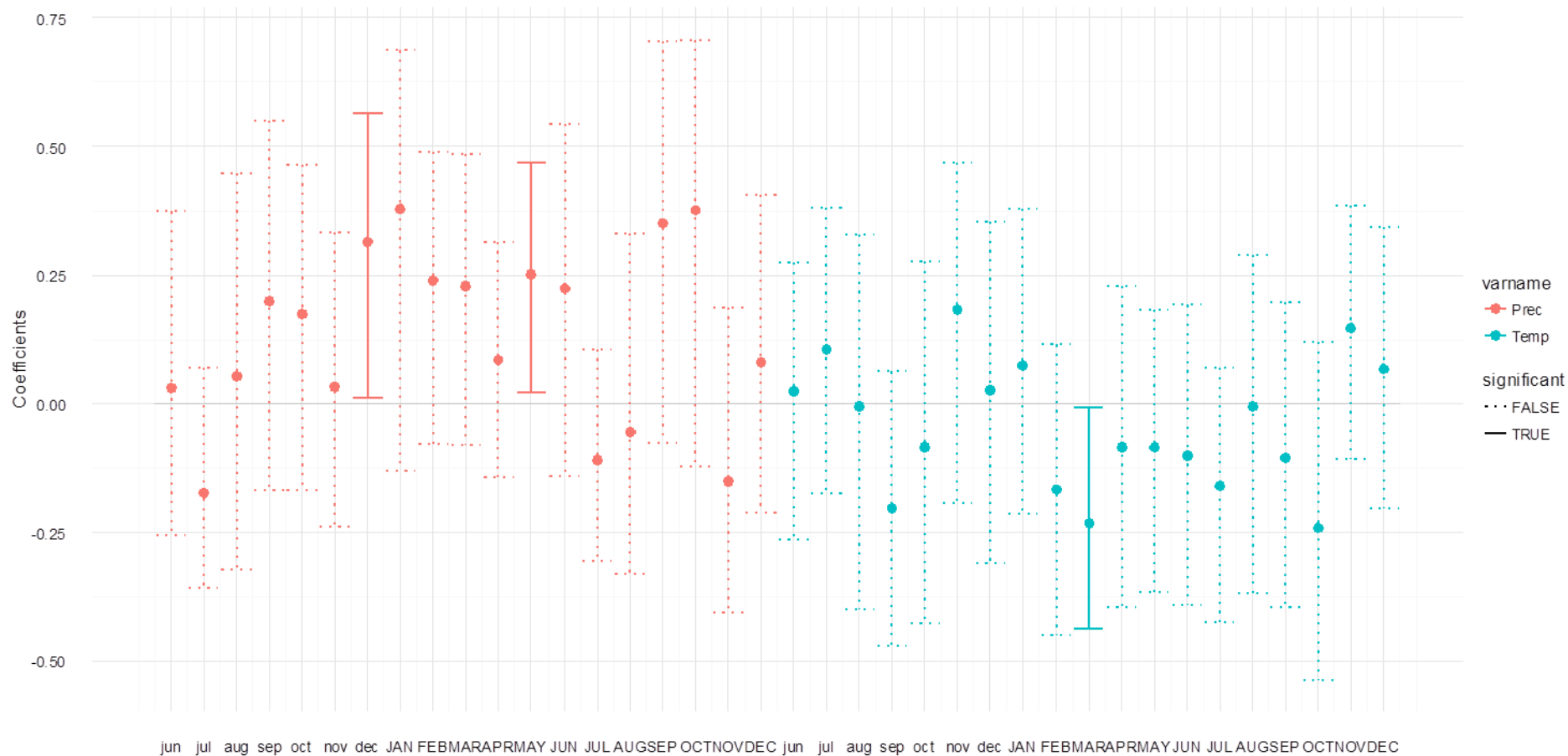


Figura 8 - Funzioni di correlazione bootstrap tra *score* del PC1 di RW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello, in maiuscolo i mesi dell'anno di formazione dell'anello.

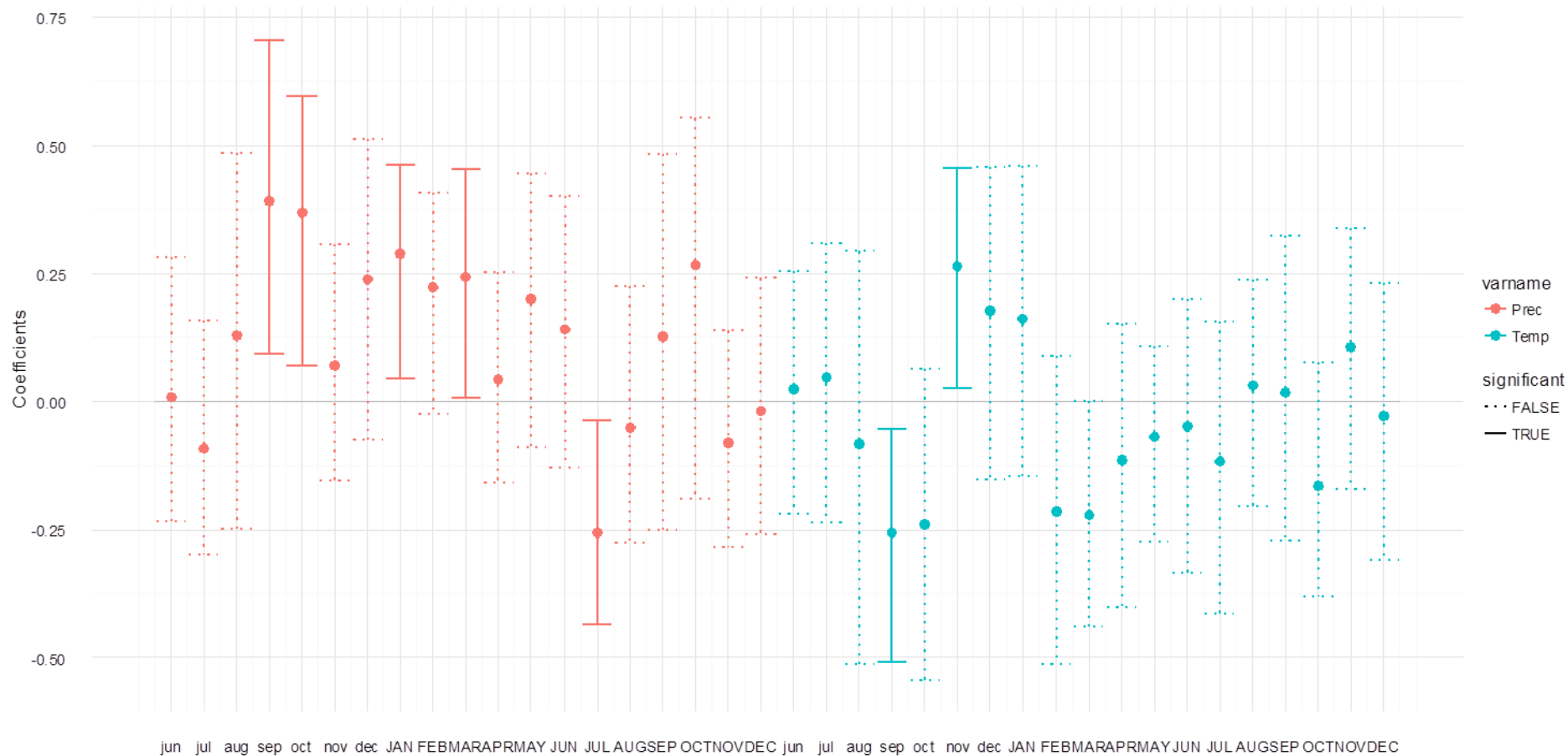


Figura 9 - Funzioni di correlazione bootstrap tra *score* del PC1 del legno primaverile (EW) e precipitazioni (Prec.) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello, in maiuscolo i mesi dell'anno di formazione dell'anello.

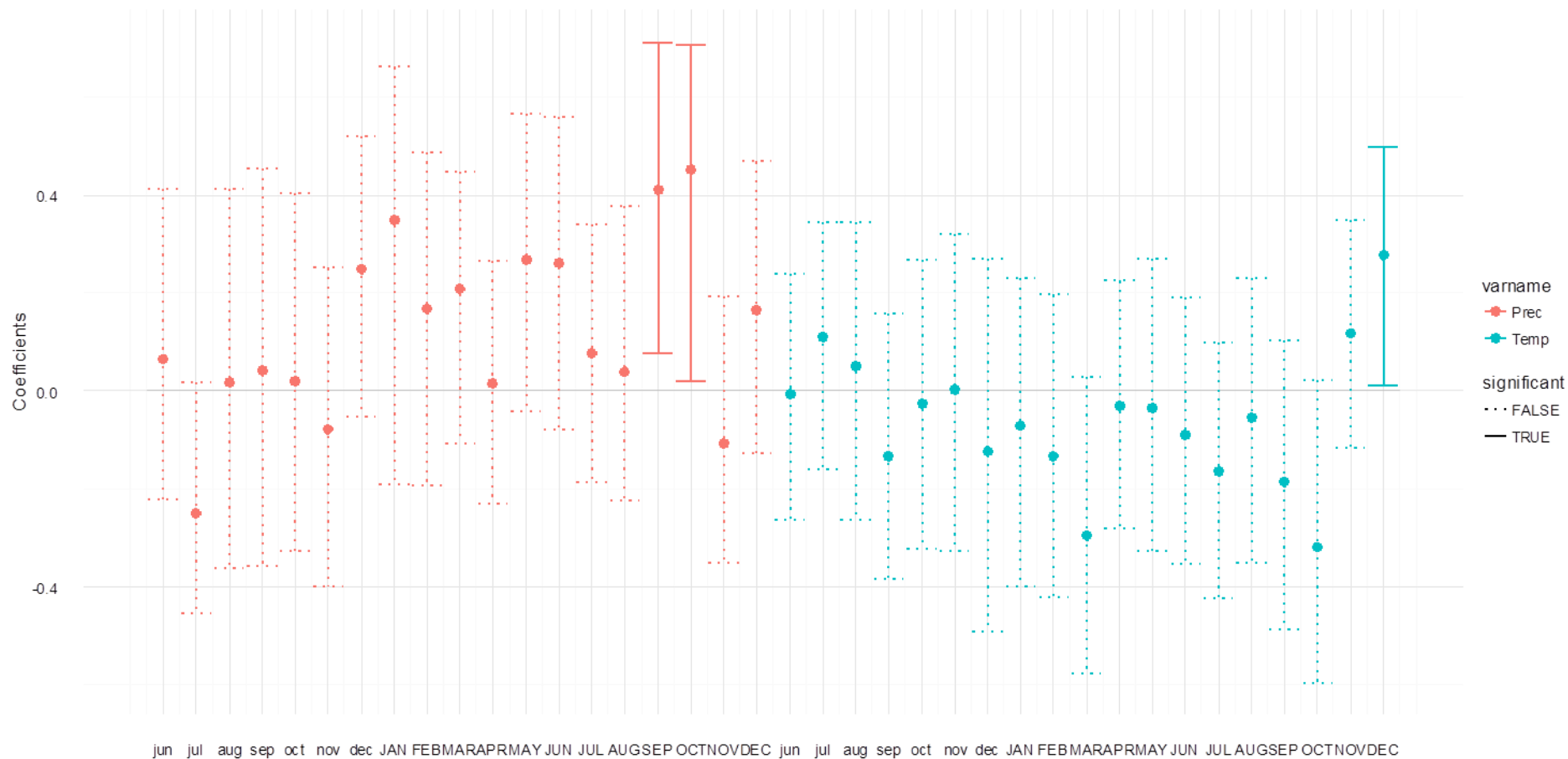


Figura 10 - Funzioni di correlazione bootstrap tra *score* del PC1 del legno tardivo (LW) e precipitazioni (Prec.) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello, in maiuscolo i mesi dell'anno di formazione dell'anello, in maiuscolo i mesi dell'anno di formazione dell'anello.

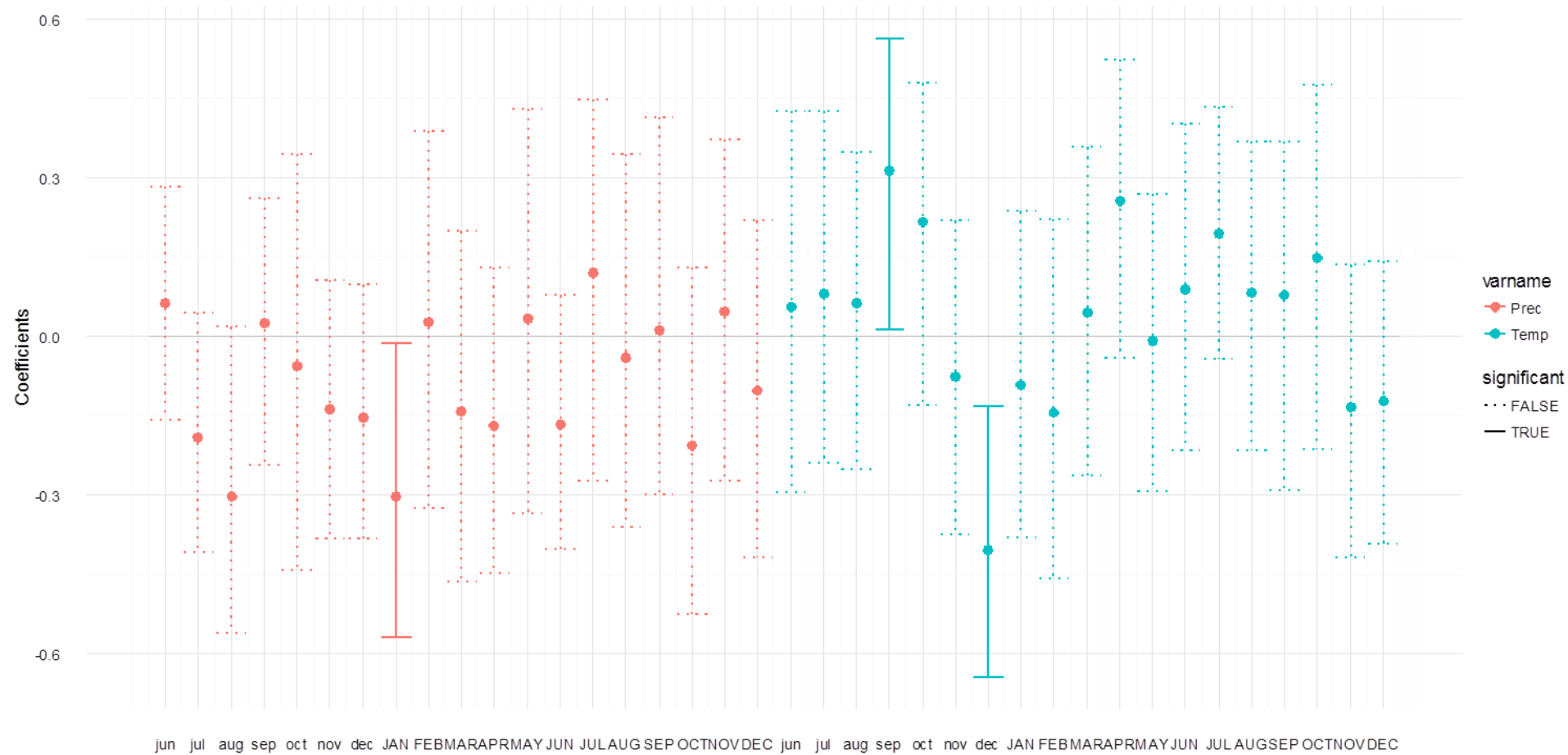


Figura 11 -Funzioni di correlazione bootstrap tra *score* del PC2 del legno tardivo (LW) e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$) sono indicate da un asterisco Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello, in maiuscolo i mesi dell'anno di formazione dell'anello, in maiuscolo i mesi dell'anno di formazione dell'anello.

Il calcolo delle *moving correlation function* ha permesso successivamente di evidenziare l'andamento e la loro stabilità nel tempo delle relazioni significative tra l'accrescimento e le variabili climatiche analizzate. Anche in questo caso è stato osservato il ruolo principale della pioggia, con una correlazione quasi sempre positiva e maggiore rispetto alla temperatura che, invece, ha evidenziato correlazioni quasi sempre negative con l'accrescimento.

Come per le funzioni di correlazione, le precipitazioni cadute nel mese di ottobre dell'anno precedente la formazione dell'anello sono risultate significative e stabili per quasi tutto l'arco temporale considerato (Figura 12) in tutte le pinete. I valori più alti di correlazione significativa, ottenuti per questa cronologia, sono quelli del mese di ottobre dell'anno in corso. Queste correlazioni con le precipitazioni sono risultate molto evidenti a partire dai primi anni '80 e si protraggono fino ad oggi. Dalla seconda metà degli anni '80, tutte le pinete sono correlate positivamente anche con le piogge dei mesi estivi di maggio e giugno, con i coefficienti che registrano un aumento dei valori negli ultimi 25 anni (Figura 12). Il segnale della rete non presenta particolari correlazioni, negative significative, tra l'accrescimento e le precipitazioni nel periodo considerato.

Meno chiaro è risultato il ruolo della temperatura e la sua influenza nel tempo sull'accrescimento. Un segnale climatico correlato negativamente in maniera significativa si è registrato per il mese di luglio (anno di formazione dell'anello) tra il 1976 ed il 1980 (Figura 13). Nello stesso periodo, la crescita era influenzata anche dalle temperature nei mesi di aprile (anno corrente) e di agosto dell'anno precedente l'accrescimento. La correlazione del mese di luglio è scomparsa agli inizi degli anni '80 e non si manifesta fino alla fine dell'intervallo comune. I segnali di Agosto (dell'anno precedente) e febbraio-marzo-aprile (anno corrente) assumono un comportamento fluttuante scomparendo anch'essi agli inizi degli anni'80, ripresentandosi nel periodo 1983-1985 per poi scomparire nuovamente. Solo le correlazioni negative nel mese di marzo permangono negli ultimi 26 anni. È interessante notare che nella finestra di analisi 1990-2014 sono state trovate correlazioni negative significative, nel mese di ottobre nell'anno di accrescimento, in giusta contrapposizione con le correlazioni positive con le precipitazioni dello stesso mese. Appare evidente che il segnale che emerge è essenzialmente legato all'approvvigionamento idrico del periodo autunnale precedente la crescita, con legame particolarmente forte con le precipitazioni di ottobre, mentre le temperature estive non hanno mostrato una chiara correlazione significativa con l'accrescimento nel corso degli ultimi 40 anni avendo un comportamento ciclico e discontinuo.

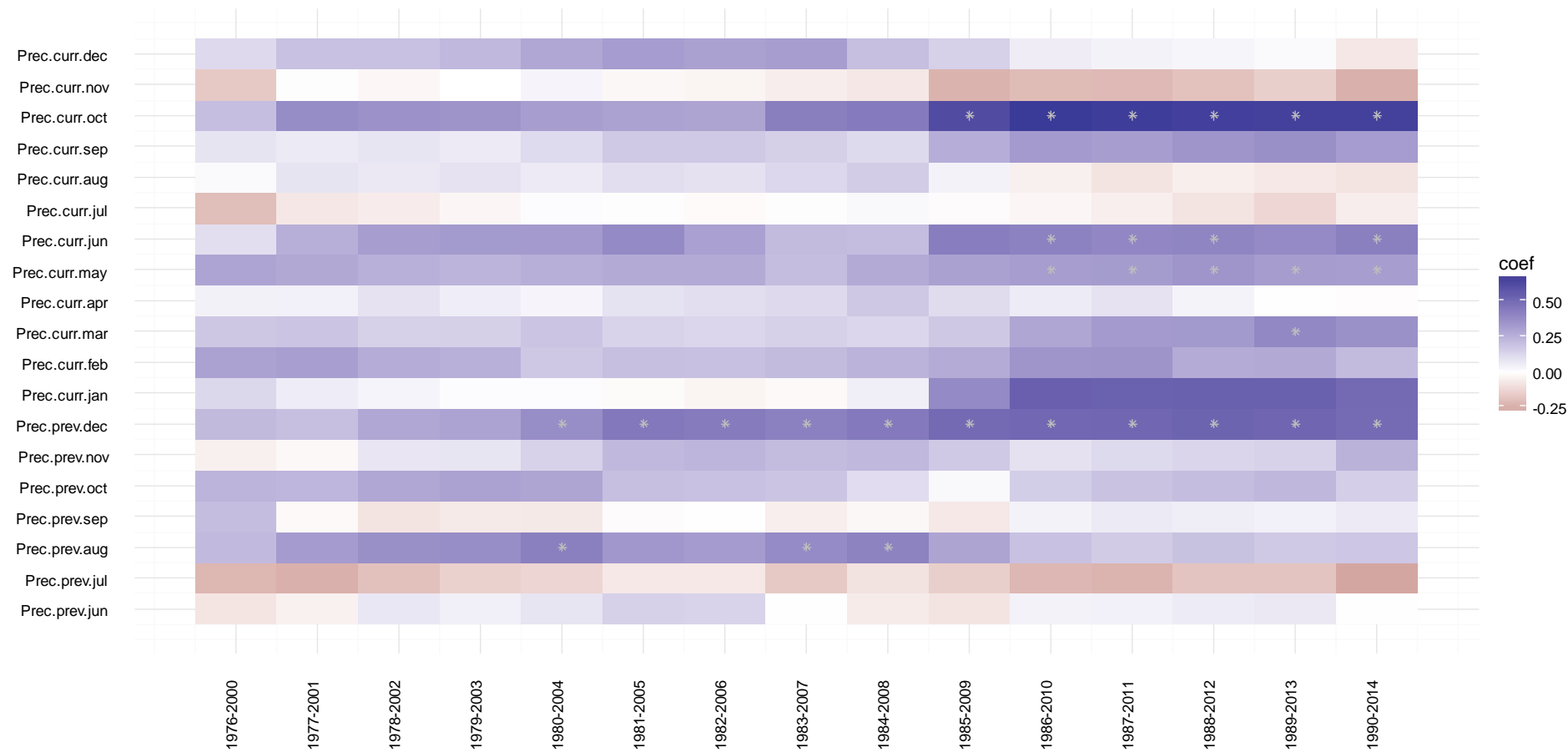


Figura 12 - Funzioni di correlazione mobile tra *score* del PC1 sull'intera ampiezza anulare e precipitazioni (Prec.) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. La correlazione mobile è effettuata in finestre di 25 anni con offset di 1 anno. Le correlazioni con coefficienti significativi ($p < 0.05$) sono indicate da un asterisco. Asse y: (prev.): mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello; (curr.): mesi dell'anno corrente di formazione dell'anello

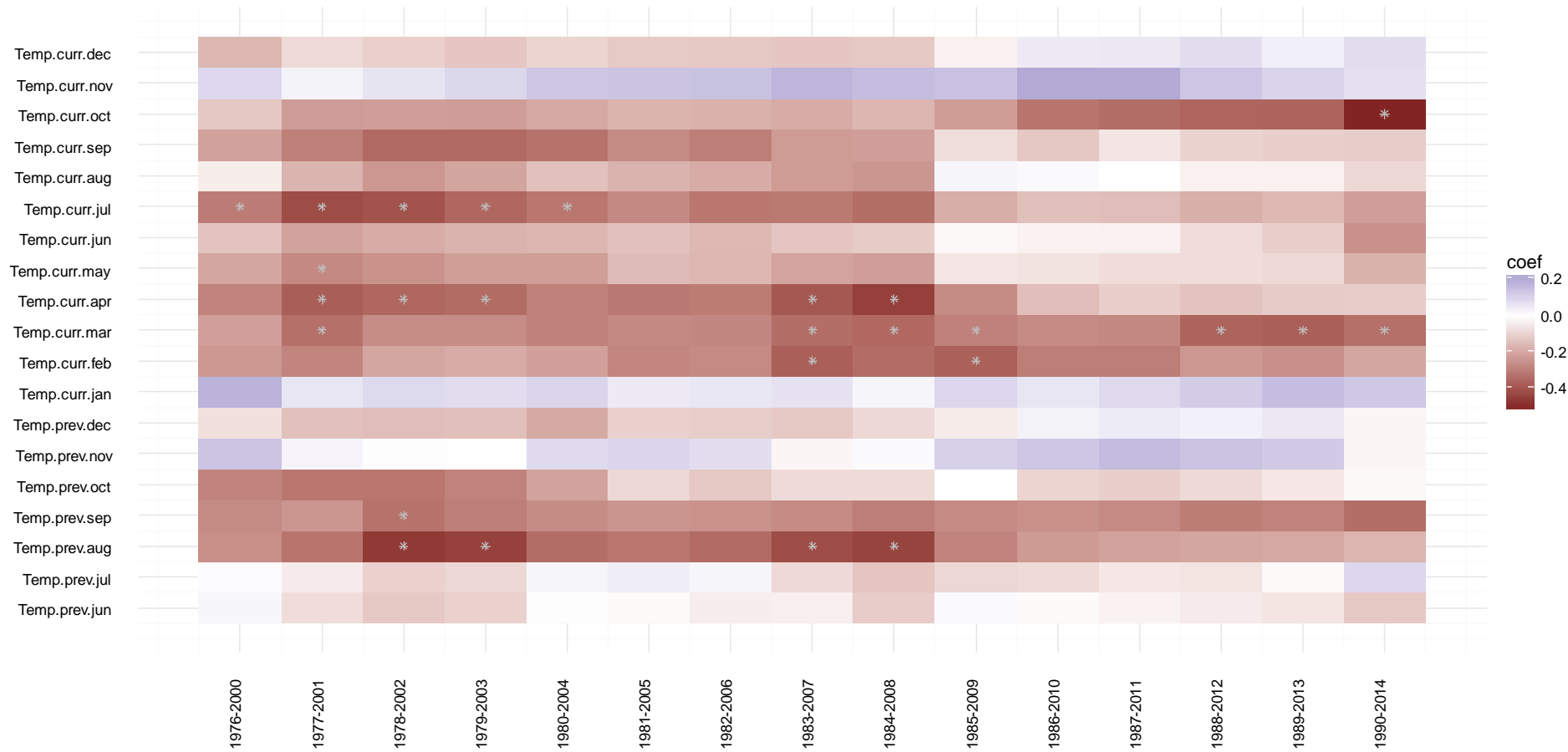


Figura 13 - Funzioni di correlazione mobile tra *score* del PC1 sull'intera ampiezza anulare e temperature (Temp.) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. La correlazione mobile è effettuata in finestre di 25 anni con offset di 1 anno. Le correlazioni con coefficienti significativi ($p < 0.05$) sono indicate da un asterisco. Asse y: (prev.): mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello; (curr.): mesi dell'anno corrente di formazione dell'anello

6.3. Analisi del BAI, produttività e storia auxologica

Dal confronto delle cronologie stazionali grezze di Incremento di Area Basimetrica (BAI) dei sei popolamenti (Figura 14), il dato che emerge è un diverso livello di produttività durante tutto il periodo registrato. Questo è confermato anche dal valore medio annuo di BAI, che nel periodo comune alle cronologie (1974-2014), è pari a 12.6 cm² anno⁻¹ per NIC (min. 4.1, max. 28.5), 45.8 cm² anno⁻¹ per CAN (min. 26.5, max. 74.8), 45 cm² anno⁻¹ per BAZ (min. 30, max. 81.9), 21.8 cm² anno⁻¹ per CLM (min. 10.5, max. 46.8), 21.9 cm² anno⁻¹ per il popolamento di CRO (min. 7.1, max. 45.5) e 40.8 cm² anno⁻¹ per ZIR (min. 13, max. 75).

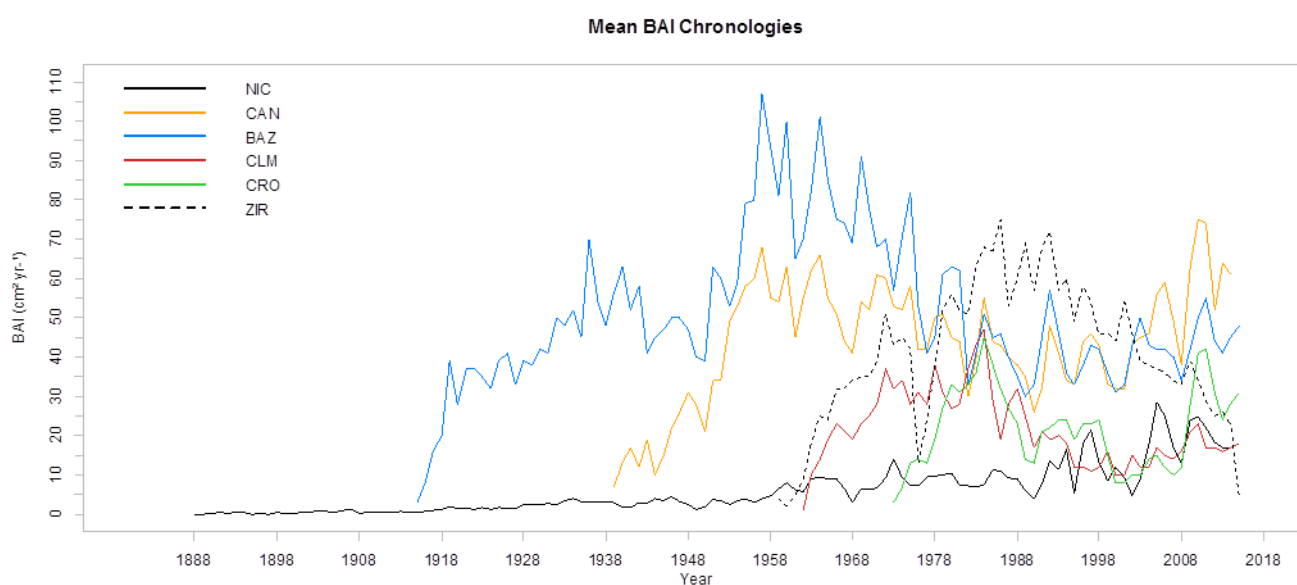


Figura 14 - Cronologie grezze di Incremento di Area Basimetrica (BAI) dei popolamenti di pino domestico della rete di Sicilia e Calabria. In tratteggio la cronologia stagionale di pino nero di Ziriò

In tutte le cronologie di pino domestico è possibile osservare una flessione della produttività negli anni che intercorrono tra il 1970 e il 1990 (tralasciando il periodo di crescita iniziale). I valori minimi di incremento di BAI si sono registrati nel sito di NIC nel 1968 e nel 1996 (Figura 14). A questo declino è seguita poi una lieve ripresa con livelli più o meno stabili negli anni tra il 1990 e il 2000 cui ha fatto seguito una ripresa della produttività con i più alti livelli nei popolamenti siciliani (NIC, CAN, BAZ e ZIR), mentre si è mantenuta costante in quelli calabresi (CLM e CRO). È interessante notare come negli ultimi 20 anni, fino ad arrivare ai giorni nostri, il BAI abbia un andamento crescente nelle pinete siciliane, tranne che per il pino nero (ZIR) in cui la produttività ha un andamento decrescente anche se vi è un lieve incremento nell'ultimo decennio.

Mettendo in relazione il BAI con i parametri di diametro (DBH cm) ed età (AGE) (Figura 15, Figura 16) in ciascun sito, è risultato che a NIC non sussiste alcuna correlazione tra tali

parametri mettendo in evidenza che a valori di BAI più elevati non corrispondono le piante con diametro maggiore né quelle con le età maggiori.

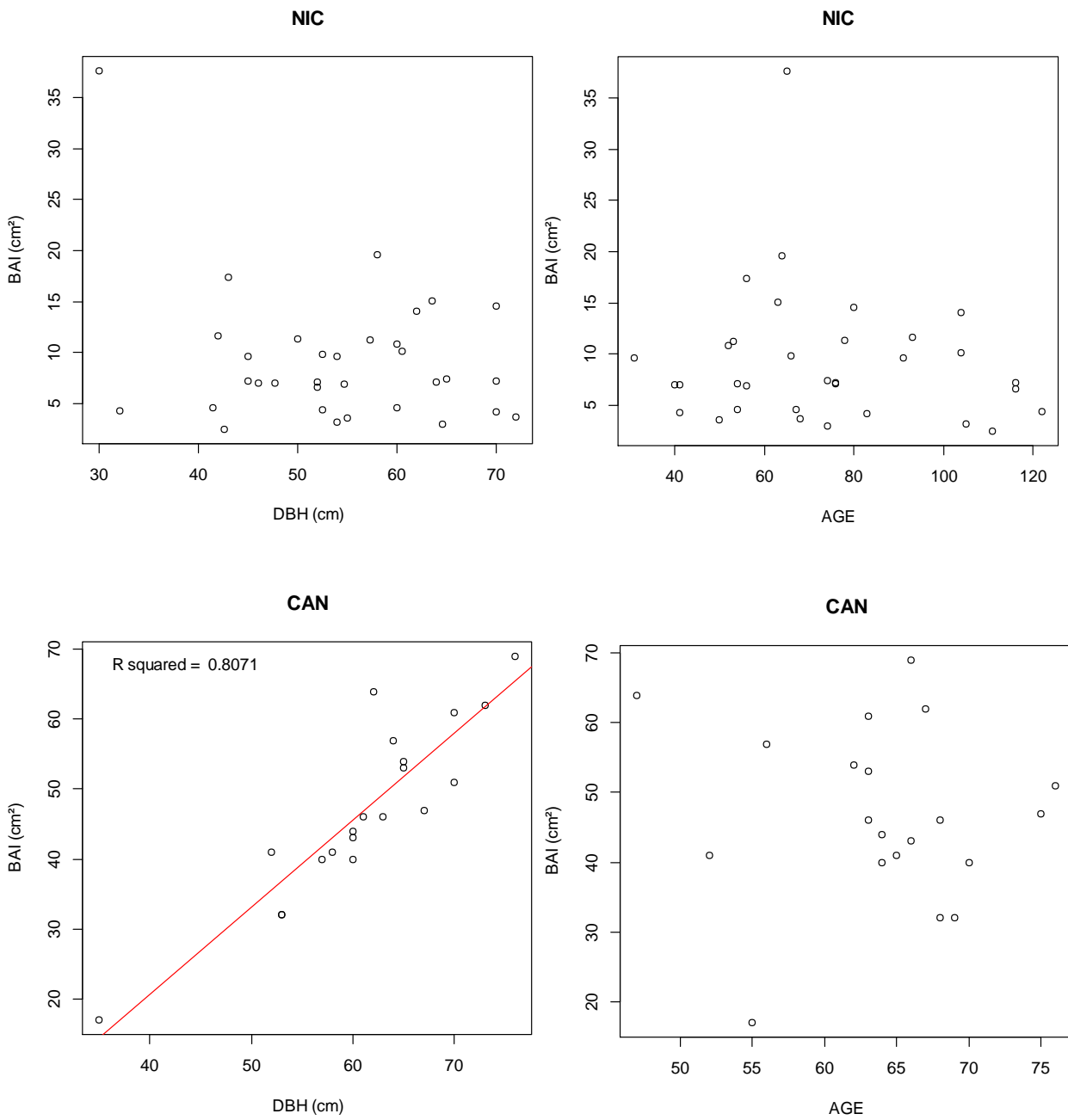


Figura 15 - Relazione diametro (DBH)-incremento di area basimetrica (BAI) delle pinete di pino domestico. (NIC): Nicosia; (CAN): Candelara.

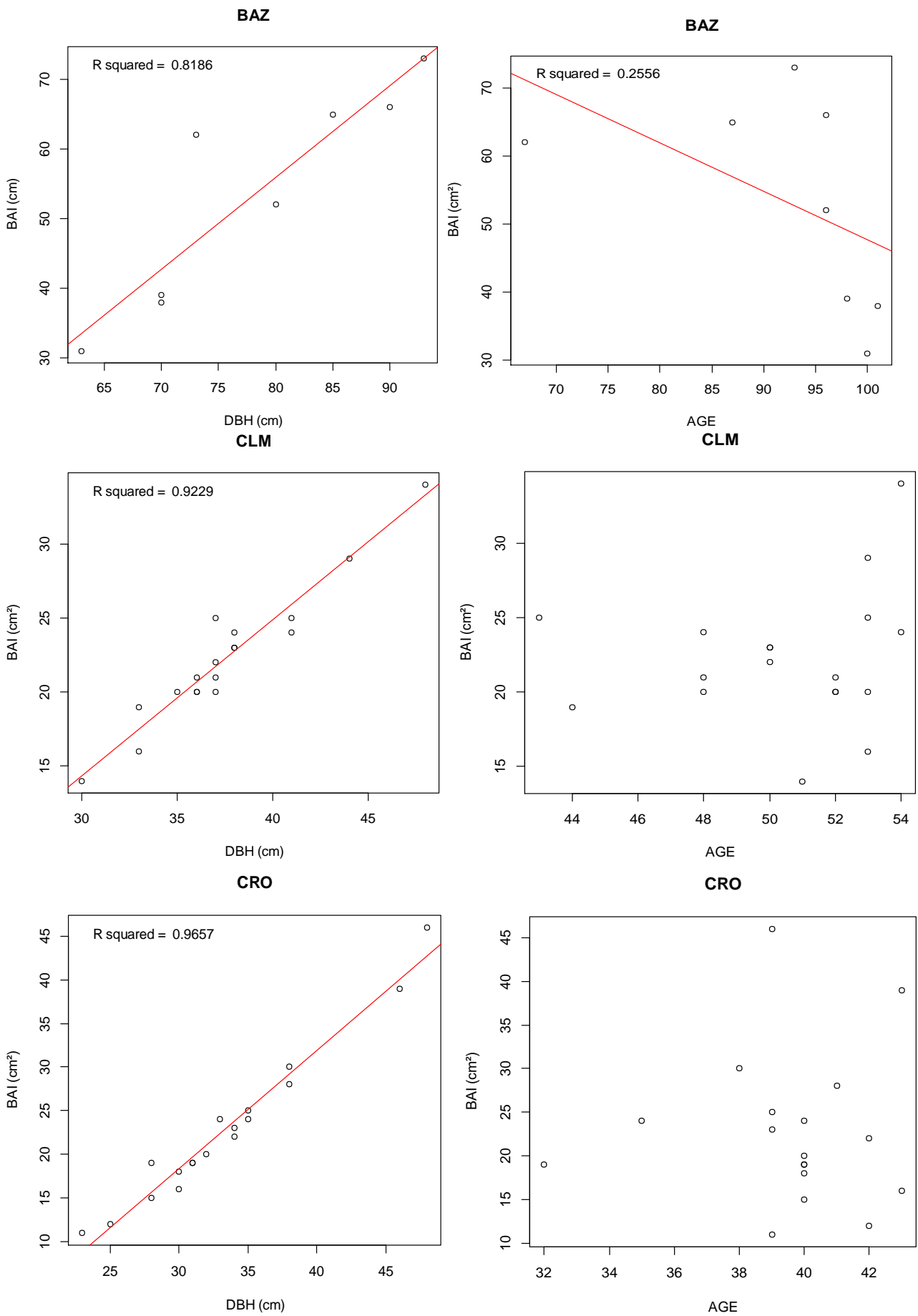


Figura 16 - Relazione diametro (DBH)-incremento di area basimetrica (BAI) delle pinete di pino domestico. (NIC): Nicosia; (CAN): Candelara; (BAZ) Badiazza; (CLM): Colamaio; (CRO): Cropani

Nelle stazioni di CAN, BAZ, CLM e CRO invece il coefficiente di determinazione assume un valore di significatività statistica se confrontato con DBH, con il valore minimo di 0.8 a CAN e quello massimo di 0.96 a CRO. In queste pinete l'incremento di area basimetrica aumenta proporzionalmente all'aumentare del diametro degli alberi. Analizzando i dati relativi al confronto tra il BAI e l'età invece, così come per Nicosia, si perde qualsiasi tipo di correlazione. Ancora una volta si ha una conferma di come alle piante più vecchie non corrisponda una diminuzione di area basimetrica. Solo a BAZ sussiste una debole correlazione con l'età.

6.4. Variazioni di produttività a scala decennale

Per studiare le variazioni di produttività nel periodo comune, delle pinete della rete di pino domestico, sono stati usati dei filtri (*smoothing*) di tipo polinomiale di 5° grado, che rimuovono parte della variabilità esaltando la frequenza prescelta. Lo stesso filtraggio è stato operato sul fattore climatico prescelto (precipitazioni medie) al fine di poter confrontare la concordanza tra variabilità di alta frequenza e clima.

Dal confronto visuale di tali curve (Figura 17) si vede come la produttività di tutti i siti possa essere divisa in due grandi periodi a seconda del trend di produttività. Quest'ultima diminuisce più o meno progressivamente a cominciare dal 1974 fino alla fine degli anni '90 - inizi 2000, periodo in cui raggiunge un minimo in tutti i siti tranne Nicosia, per poi riprendere a crescere fino al 2010-2012. Negli ultimi la crescita del pino comincia nuovamente a declinare. Dall'analisi delle funzioni di correlazione è emerso che il principale fattore climatico che influenza la crescita è il regime di precipitazioni distribuito in tre distinti periodi dell'anno: quello invernale, quello primaverile-estivo e quello autunnale. Si sono dunque confrontate le curve delle precipitazioni, nel periodo comune, con la variabilità di alta frequenza del BAI dei diversi siti. Dal confronto con le precipitazioni dei mesi invernali (Dicembre, Gennaio, Febbraio, Marzo) è emerso che in un primo periodo dal 1975 al 1985, entrambi i siti calabresi, CLM e CRO, solo sembrano aver beneficiato di un aumento delle precipitazioni, mentre in tutti gli altri siti è seguita una diminuzione della produttività (Figura 17).

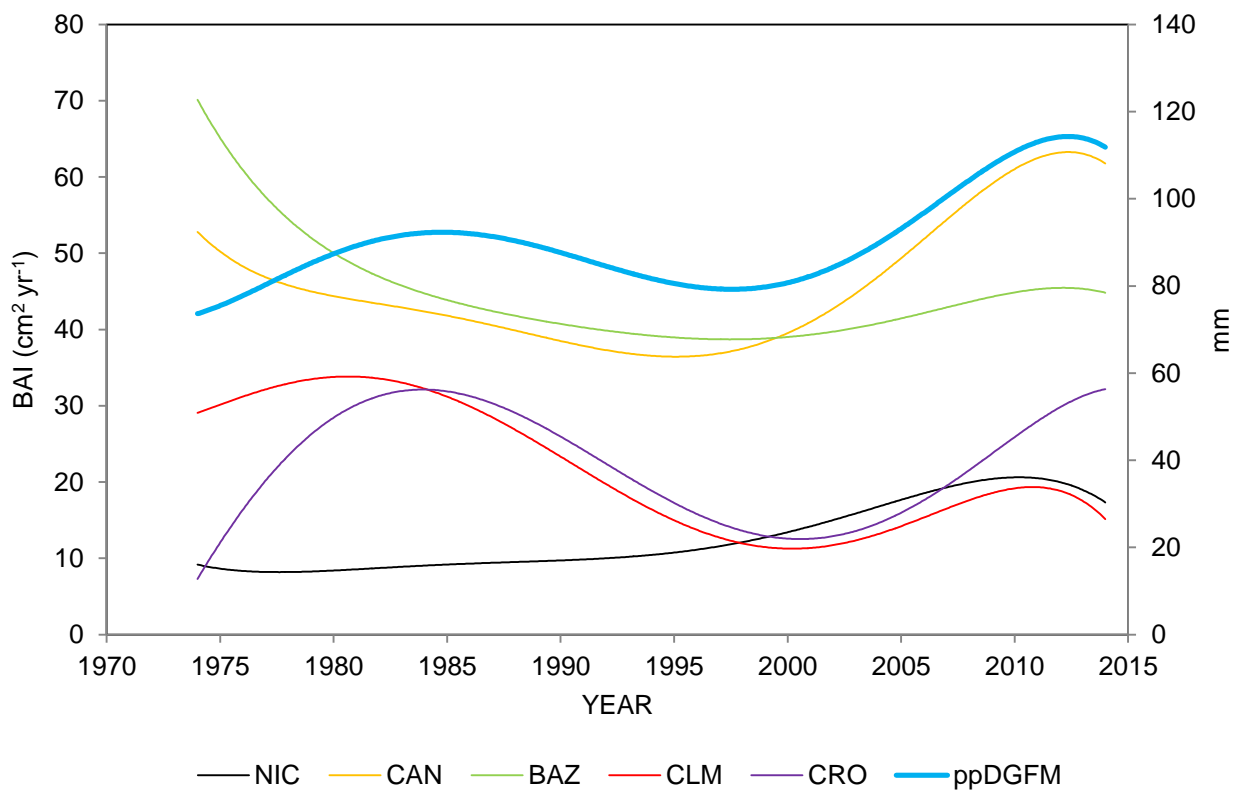


Figura 17 - Confronto tra le cronologie di Incremento di Area Basimetrica (BAI) delle pinete di pino domestico, filtrate con frequenza 11 anni, e i valori medi delle precipitazioni dei mesi di dicembre, gennaio, febbraio, marzo (ppDGFM), filtrati con frequenza 11 anni. . (NIC): Nicosia; (CAN): Candelara; (BAZ) Badiazza; (CLM): Colamaio; (CRO): Cropani

A seguito del 1985 si nota invece una diminuzione del regime di precipitazioni invernali fino alla seconda metà dei '90. I trend di BAI confermano di seguire queste variazioni con leggere fluttuazioni legate probabilmente alla maggiore o minore capacità di usufruire di queste piogge. Comportamento che si accentua nell'ultimo periodo con un progressivo aumento delle precipitazioni cui fa seguito un aumento del trend di crescita di tutti i siti. Aumento fino al 2012 e poi rallentamento, seguito fedelmente da CAN, ma anche in misura minore dagli altri siti, tranne CRO.

Il pino domestico mostra un comportamento sensitivo nella bassa frequenza meno concorde con le precipitazioni del periodo estivo (Maggio-Giugno), fattore che influenza le funzioni di correlazione soprattutto a NIC (Figura 18). La diminuzione dell'apporto di acqua anche nel periodo ritardo primaverile-inizio estivo avvenuta negli ultimi anni (2010-2014) potrebbe comunque concorrere con le precipitazioni invernali alla recente caduta della produttività.

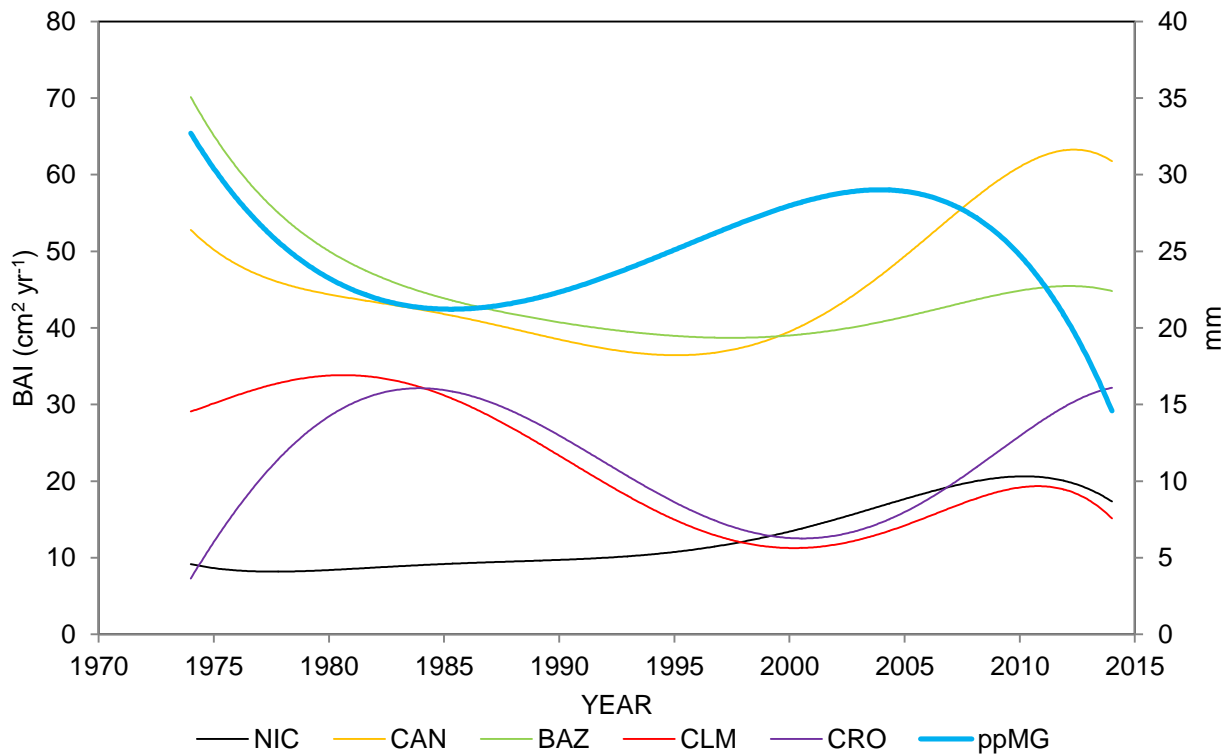


Figura 18 - Confronto tra le cronologie di Incremento di Area Basimetrica (BAI) delle pinete di pino domestico, filtrate con frequenza 11 anni, e i valori medi delle precipitazioni dei mesi di maggio e giugno (ppMG), filtrati con frequenza 11 anni. (NIC): Nicosia; (CAN): Candelara; (BAZ) Badiazza; (CLM): Colamaio; (CRO): Cropani

Il confronto della concordanza tra crescita media e precipitazioni autunnali (Settembre-Ottobre) non mostra nel complesso una sincronizzazione tra le diverse curve (Figura 19). Anche in questo caso, il segnale non è molto correlato nella bassa frequenza. Negli ultimi 24 anni del periodo comune di analisi, il trend nel regime pluviometrico è andato aumentando fino al 2010, cui ha seguito un incremento della produttività che si è arrestata nel 2010 con il diminuire nuovamente delle precipitazioni.

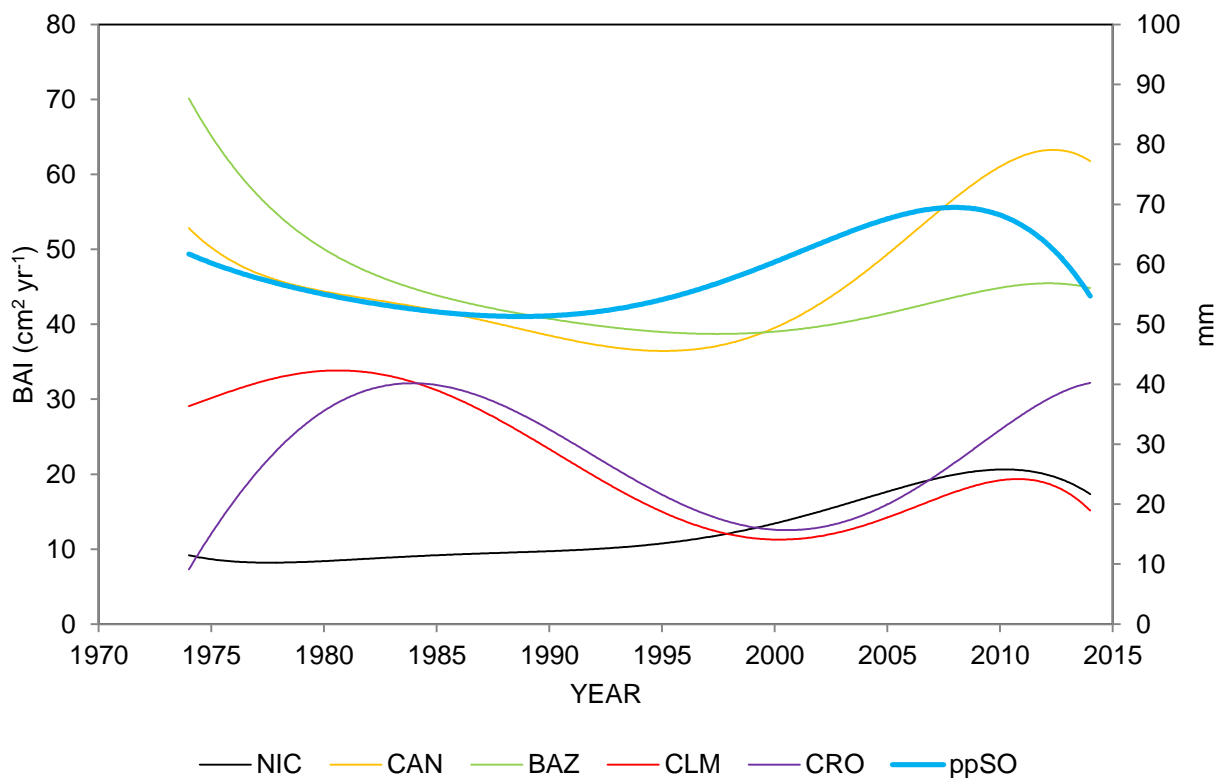


Figura 19 - Confronto tra le cronologie di Incremento di Area Basimetrica (BAI) delle pinete di pino domestico, filtrate con frequenza 11 anni, e i valori medi delle precipitazioni dei mesi di settembre e ottobre (ppSO), filtrati con frequenza 11 anni. . (NIC): Nicosia; (CAN): Candelara; (BAZ) Badiazza; (CLM): Colamaio; (CRO): Cropani

La sola analisi dell'Incremento di Area Basimetrica (BAI) medio non è sufficiente per spiegare come il pino domestico nelle diverse stazioni risponda al cambiamento dei fattori climatici, poiché la crescita del BAI implica numerose variabili nonché la capacità di utilizzo della risorsa idrica per l'induzione alla produzione di legno primaverile (EW) e/o di legno tardivo (LW). Più semplicemente, ad un aumento del BAI in generale, può corrispondere un aumento di un tipo di legno o dell'altro e viceversa. Così si è scelto di verificare e confrontare i tassi di crescita di EW e LW, presente in ogni anello delle cronologie stagionali create, e di confrontarli con le variazioni climatiche che sono risultate significative nelle analisi delle funzioni di correlazione lineari e con finestre mobili.

Analizzando i grafici dei trend di crescita di ampiezza anulare di EW e LW (Figura 20, Figura 21), si nota come vi sia comunque una correlazione nella crescita dei due legni, con valori di 0.78 a NIC, 0.48 a CAN, 0.86 a BAZ, 0.92 a CLM e 0.88 a CRO. I trend di crescita sono inoltre suddivisibili in tre fasi: una prima fase che si estende dal 1974 al 1999 in cui i trend risultano negativi; una seconda fase, dal 1999 al 2009, in cui si ha un trend stabile e poi leggermente positivo ed una terza fase, dal 2009 al 2014 nella quale si ha una diminuzione accentuata nell'accrescimento sia di EW che di LW (Figura 20, Figura 21). Mettendo a confronto i trend climatici delle precipitazioni, si evince che il legno primaverile (EW) di tutti i siti, durante la prima fase, segue

soprattutto il trend delle precipitazioni invernali, e meno quello delle precipitazioni del periodo estivo (Maggio-Giugno) con un andamento più accentuato nei siti calabresi (CRO e CLM) che si trovano a bassa quota. Il sito di NIC è l'unico che sembra seguire meno il trend di precipitazioni, invernali ed ha una culminazione intermedia tra il trend di maggio-giugno e quello invernale stesso (infatti è l'unico sito influenzato significativamente dalle precipitazioni di maggio-giugno nelle funzioni di correlazione).

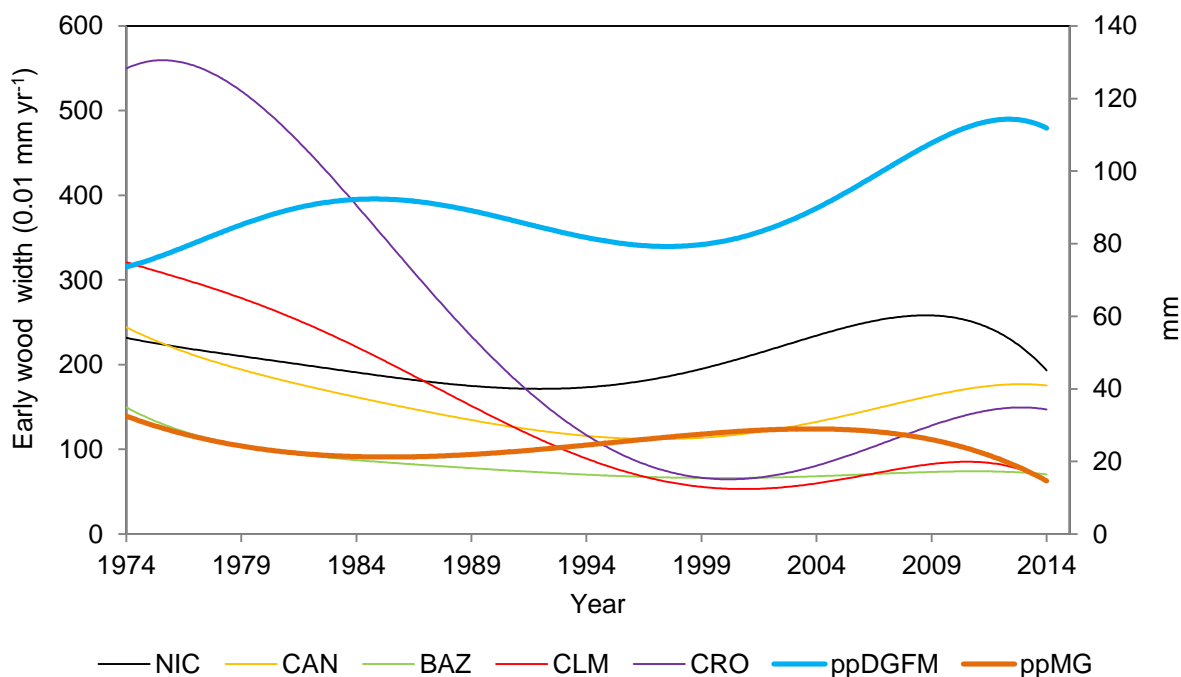


Figura 20 - Confronto tra i trend di ampiezza del legno primaverile (EW) le precipitazioni invernali (ppDGFM) e quelle estive (ppMG), per il periodo comune 1974-2014

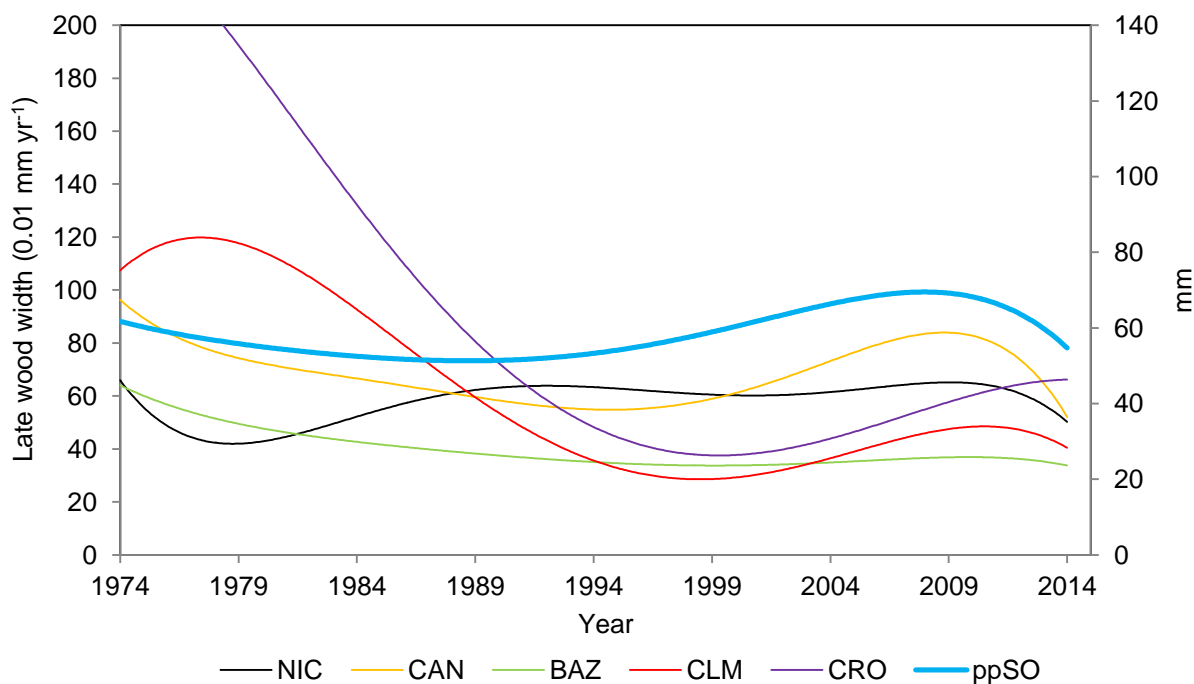


Figura 21 - Confronto tra i trend di ampiezza del legno tardivo (LW) e le precipitazioni autunnali (ppSO), per il periodo comune 1974-2014

Un andamento simile si è trovato anche nell'accrescimento del legno tardivo (LW) (Figura 21). Anch'esso mostra una diminuzione dell'accrescimento tra il 1974 ed il 1999 per poi riprendere a crescere dal 2000 e diminuire fra 2009 e 2014. Il trend di crescita segue fundamentalmente l'andamento delle precipitazioni del periodo autunnale (SO), il quale è risultato correlato significativamente nelle analisi di correlazione lineare con LW. Un trend del tutto diverso si riscontra nella pineta di Nicosia (NIC), che è la stazione posta a quote più alte (700 m s.l.m. in media) e dove l'ammontare annuo delle precipitazioni è il più basso di tutta la rete (556 mm anno⁻¹). L'accrescimento del solo LW mostra una crescita in controtendenza nel periodo 1980-1995 (Figura 21) per poi diminuire e tornare a tassi di crescita simili agli altri siti. Per esplorare nel dettaglio l'aumento del legno tardivo di NIC, vista la concordanza con le precipitazioni dei periodi autunnali e invernali, si è scelto di approfondire le variazioni del regime pluviometrico del periodo estivo, attraverso l'Indice Standardizzato di Precipitazione (SPI) come misura dei periodi di aridità dovuti alle scarse precipitazioni. Tale indice è stato successivamente messo a confronto con la percentuale di crescita di LW per verificare la sussistenza di una certa correlazione tra la siccità estiva e l'aumento percentuale del legno tardivo.

Confrontando i valori medi annui dello SPI con le variazioni percentuali di LW ed EW è risultato che nel periodo tra il 1974 ed il 1990 la percentuale di produzione di legno primaverile è diminuita con l'aumento dell'aridità media. Questo trend continua fino al 2003 per poi aumentare fino ad oggi, al diminuire dell'aridità ed al sopraggiungere di un regime più umido (Figura 22).

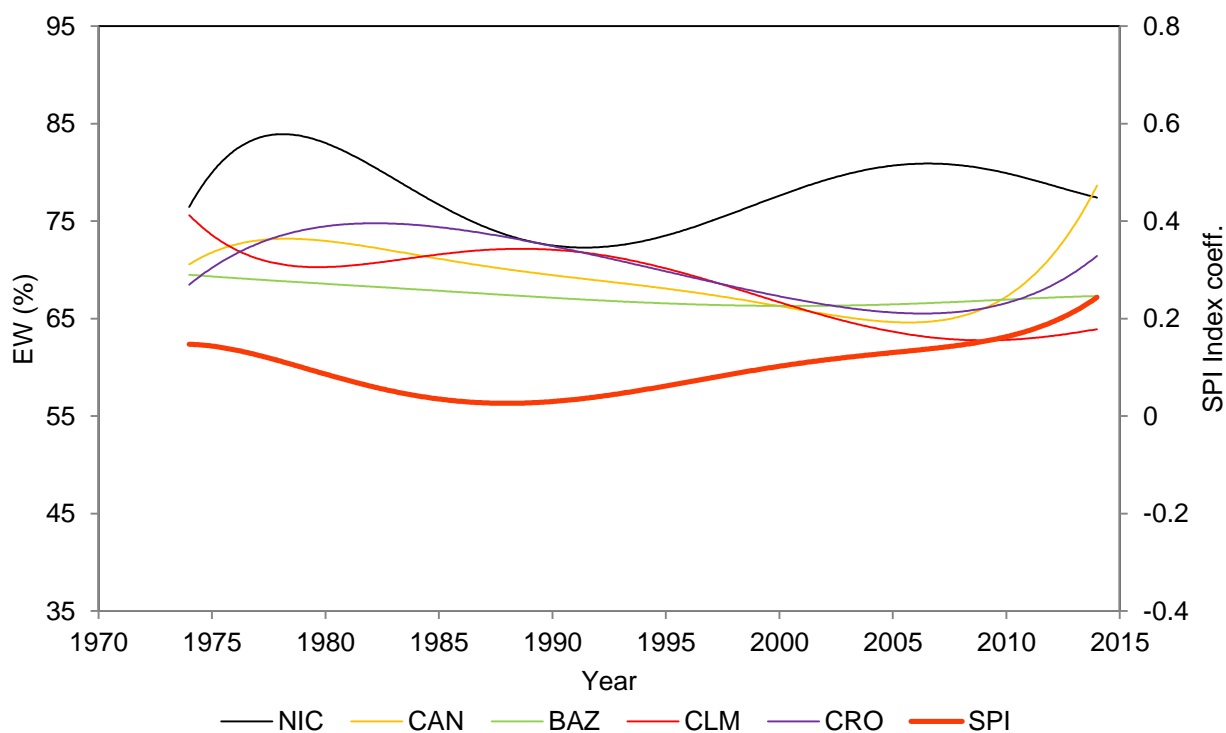


Figura 22 - Confronto tra i trend di variazione percentuale del legno primaverile (EW) ed i valori medi annuali dello SPI, per il periodo comune 1974-2014

Indagando ancor più nel dettaglio e confrontando i valori dello SPI di maggio-giugno con le variazioni percentuali di LW ed EW di tutti i siti il fenomeno è ancora più evidente. Dal 1978 al 1995 si ha avuto un aumento del 15 % nella produzione di legno tardivo negli anelli dei pini di NIC (dal 18 % del 1978 al 33 % nel 1995) nello stesso periodo di aumento dei valori dello SPI. Effetto che si ripete dal 2009 al 2014 con un picco di presenza del 27 %. Il presentarsi nel tempo di questo regime siccitoso sembra non essere uno dei fattori principali che influenza la produzione percentuale di LW in tutti gli altri siti. A conferma di ciò, analizzando la variazione percentuale di produzione di legno primaverile (EW) in tutti i siti si è passati da una presenza dell' 82 % al 67 %, con una diminuzione del 15 %, con successivo impulso di crescita che ha portato ad un altro aumento percentuale dal 2005 ad oggi. Anche in questo caso, l'influenza delle fluttuazioni dei periodi di aridità non sembrano influenzare la produzione percentuale di EW in tutti gli altri siti della rete. L'analisi dell'indice SPI e la sua spazializzazione nel periodo comune di analisi (1974-2014) conferma le analisi dei trend precedenti. Emerge che il periodo dove si è verificata una maggiore aridità del clima è compreso principalmente in due finestre temporali nei mesi da maggio ad agosto (Figura 23). Nel dettaglio, i massimi valori di aridità dell'indice, si ritrovano dal 1977 al 1988, nell'arco di tempo tra il 1997 ed il 2004 e tra il 2007 ed il 2013. Interessante è il fatto che in corrispondenza di questi periodi aridi nei mesi estivi, corrispondano valori di SPI di estrema umidità nel periodo autunnale ed invernale nello stesso anno. Attualmente (2007-in poi) si nota un aumento in intensità e durata della siccità estiva, ma parallelamente aumenta la piovosità invernale confermando la maggiore importanza che stanno assumendo le precipitazioni in tutti i siti.

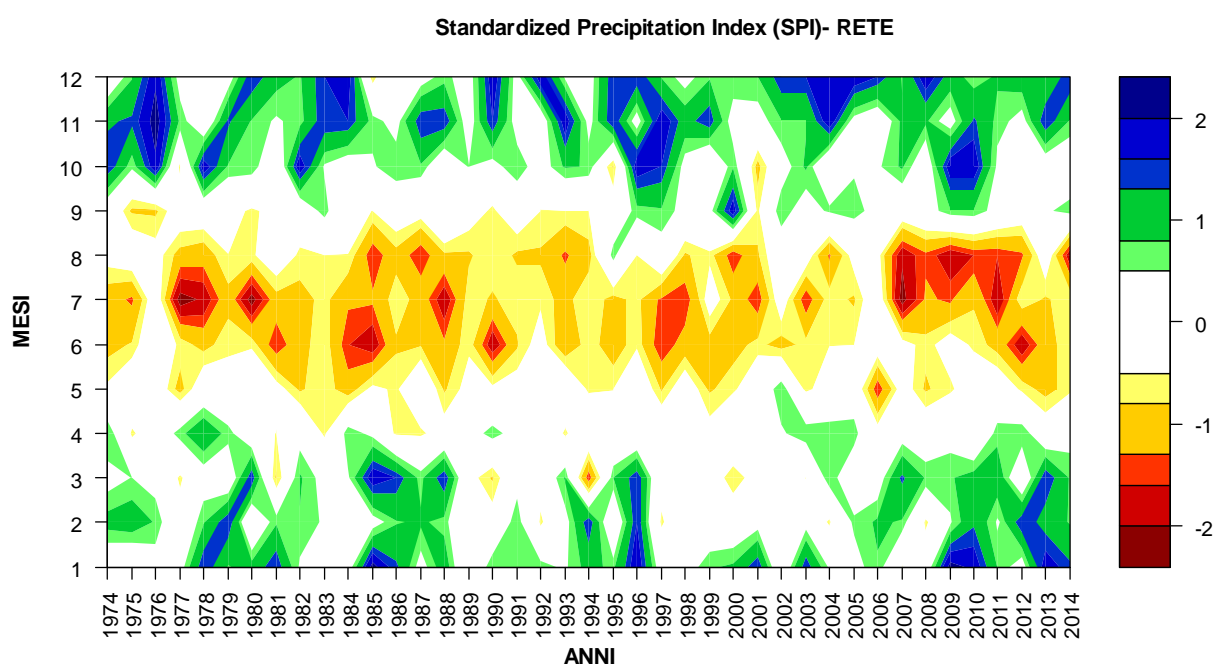


Figura 23 - Spazializzazione dei valori dello SPI (*Standardized Precipitation Index*) nel periodo comune 1974-2014. Valori dei coefficienti negativi indicano un periodo di aridità, valori positivi indicano un periodo di maggiore umidità.

L'andamento della produttività trova riscontro nell'analisi dell'incremento corrente di BAI (I_c) e nell'incremento medio (I_m) di tutti i popolamenti analizzati (Figura 24, Figura 25, Figura 26). Le curve di incremento corrente assumono negli ultimi anni, nei popolamenti di pino siciliani di NIC e CAN, un andamento crescente, con valori di I_c che si attesta intorno a $15 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$ a NIC e più di $70 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$ a CAN superando il valore dell'anno di una prima culminazione. Di contro, in entrambi i siti calabresi (CLM e CRO), le due curve degli incrementi assumono un andamento decrescente nel quale si evidenzia una doppia fase di crescita con la culminazione dell'incremento corrente avvenuto in due fasi distinte, ovvero quando ormai la curva ha raggiunto il suo apice e ha iniziato ad assumere una pendenza negativa si assiste a una nuova impennata della curva. Tali impennate si hanno per lo più nei primi dieci anni di storia dei popolamenti il che potrebbe essere riconducibile alla spinta vegetativa dei primi anni post-rimboschimento. Il secondo momento di crescita dell'incremento è avvenuto intorno al 1998 in entrambe le pinete e la causa è probabilmente di origine climatica. L'incremento corrente della pineta di Badiazza (BAZ) ha fatto registrare il valore massimo di incremento medio raggiunto di $59.6 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$ (nel 1960) dopodiché la curva ha assunto un andamento decrescente fino al 1995 dove si ha una lieve impennata. Probabilmente la struttura attuale ha risentito della presenza dell'uomo che ha utilizzato, seppur non in maniera intensiva il soprassuolo, dando un effetto positivo di crescita legato ai tagli. Un comportamento simile si ha a ZIR dove però negli ultimi dieci anni l'incremento corrente è tornato a crescere. In questa pineta si son verificati diversi schianti dovuti alla morte di piante malate di marciume radicale. Il venir meno di alcuni rapporti di competizione può aver dato un positivo effetto di crescita. Dalla ricostruzione dell'accrescimento del diametro di ogni singolo albero, per ogni sito (Figura 24, Figura 25, Figura 26), è risultata una certa eterogeneità che caratterizza soprattutto la pineta di Nicosia (NIC) dove le piante che hanno le stesse età variano in un ampio *range* di valori di diametro (Figura 24).

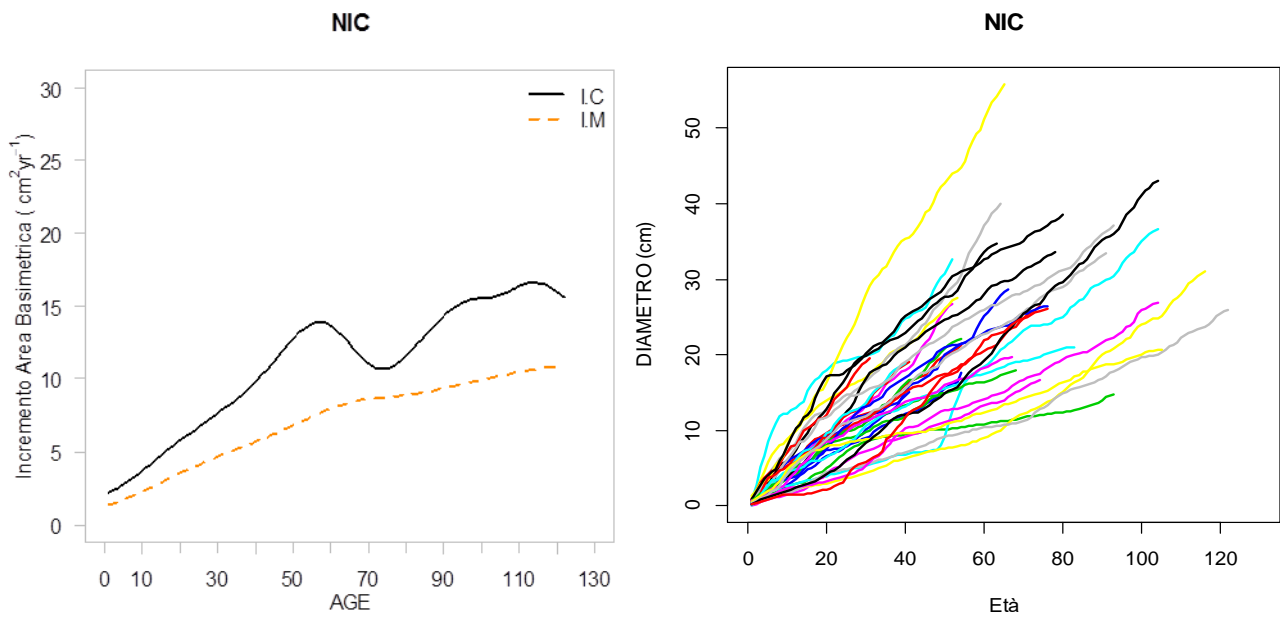


Figura 24 - (sx): curve dell'incremento corrente di area basimetrica (I.C) e dell'incremento medio (I.M); (dx): storie auxologiche dei popolamenti. Per ogni sito le linee continue rappresentano l'incremento cumulato diametrico sotto corteccia. (NIC): Nicosia

Analizzando la storia auxologica è ben visibile la diversificazione cronologica delle piante dominanti, tale da ipotizzare il sito un popolamento disetaneo. Per le pinete di CAN, BAZ, CLM, e per quella di pino nero di ZIR non si ha una grande dispersione delle curve ma le piante campionate mostrano una regolarità nella crescita, dove i diametri si distribuiscono in un *range* più ristretto (Figura 25, Figura 26).

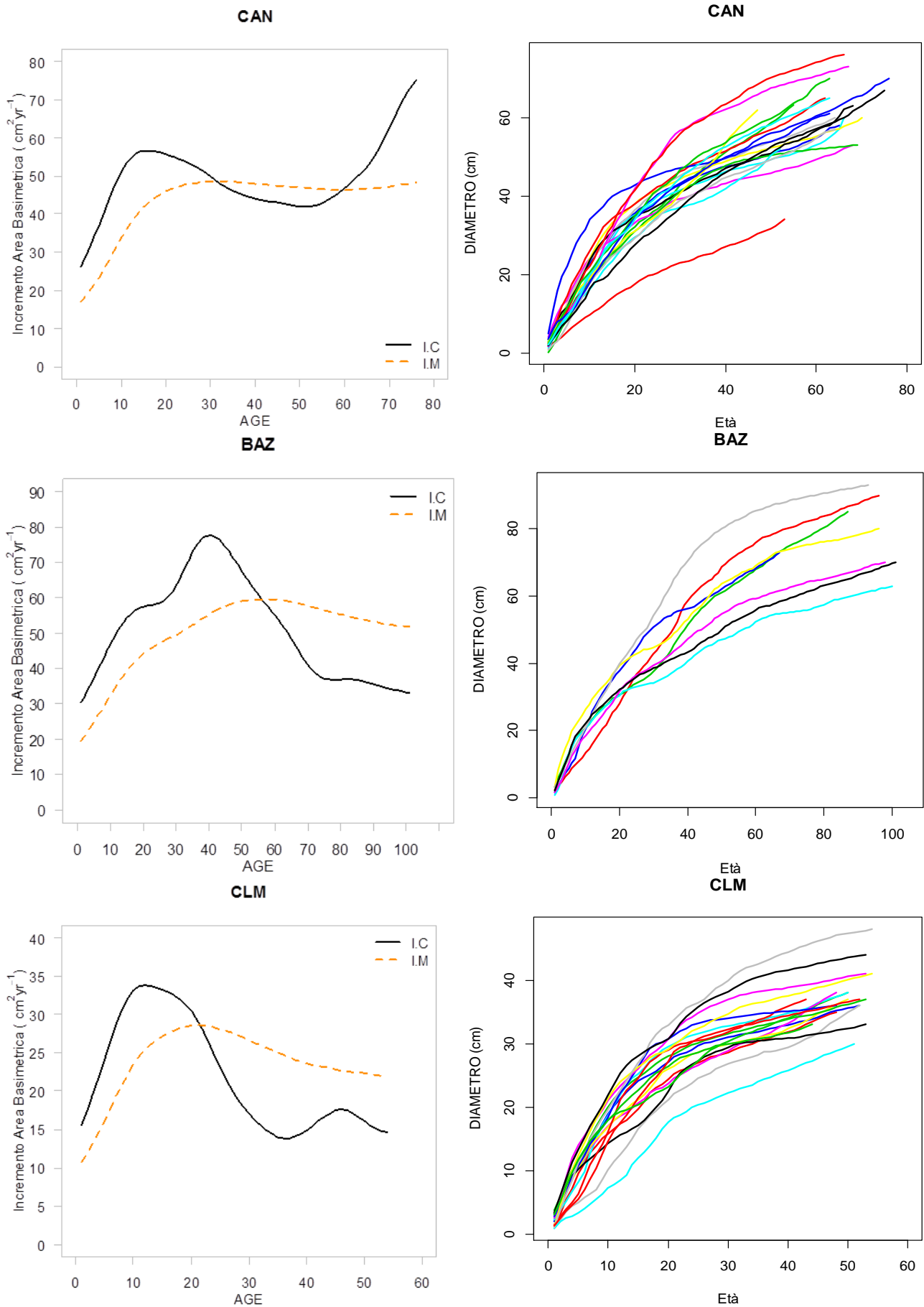


Figura 25 - (sx): curve dell'incremento corrente di area basimetrica (I.C) e dell'incremento medio (I.M); (dx): storie auxologiche dei popolamenti. Per ogni sito le linee continue rappresentano l'incremento cumulato diametrico sotto corteccia. (CAN): Candelara; (BAZ): Badiazza

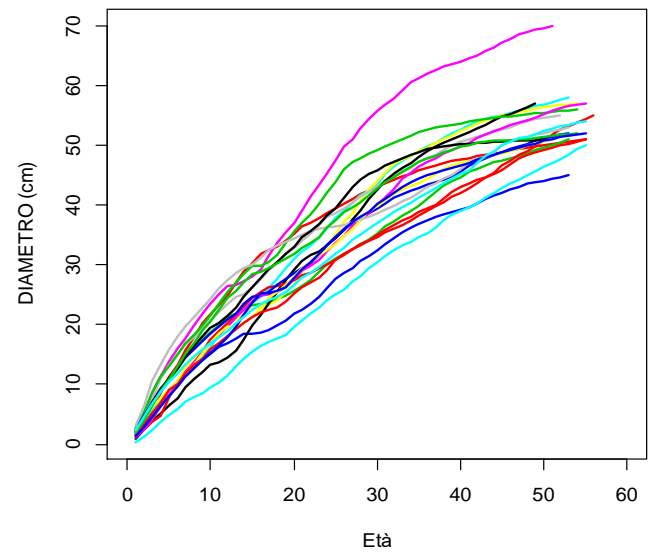
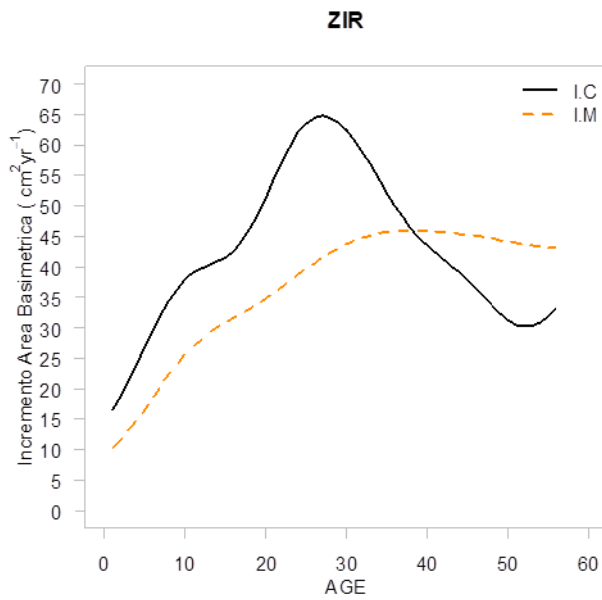
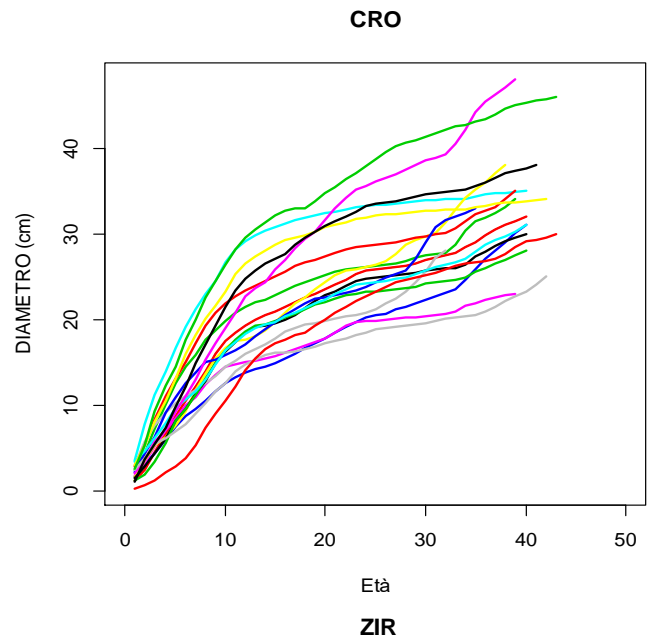
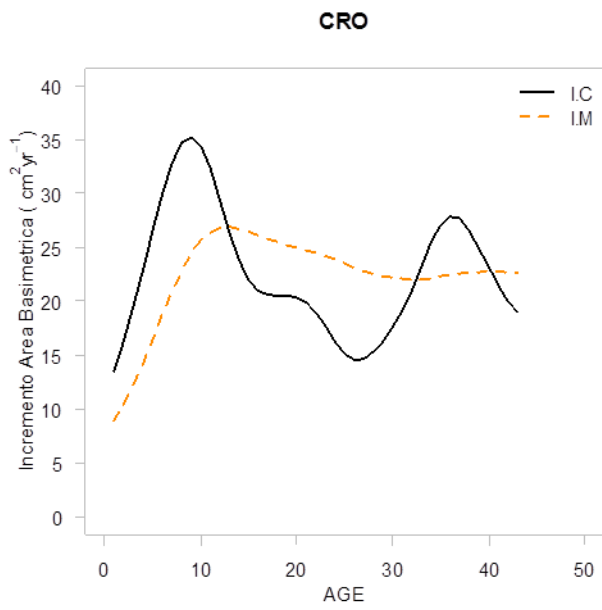


Figura 26 -(sx): curve dell'incremento corrente di area basimetrica (I.C) e dell'incremento medio (I.M); (dx): storie auxologiche dei popolamenti. Per ogni sito le linee continue rappresentano l'incremento cumulato diametrico sotto corteccia. (CLM): Colamaio; (CRO): Cropani; (ZIR): Ziriò

7. DISCUSSIONE

Le analisi dendroecologiche effettuate nei diversi siti di studio, hanno condotto al rilevamento di diversi pini domestici che superano il secolo di vita. In particolare l'età massima riscontrata si ha nel sito di Nicosia (122 anni), ma anche a Badiazza nel messinese, gli alberi hanno raggiunto i cento anni di età. Confrontando il risultato con precedenti studi dendrocronologici sulla stessa specie (Agrimi et al. 2002; Ciancio et al. 2009; Piraino et al. 2012; Di Filippo et al. 2016), questa ricerca conferma la capacità del pino domestico (*Pinus pinea* L.), in un ambiente come quello del Bacino del Mediterraneo, di raggiungere età ragguardevoli. Nel complesso i popolamenti siciliani sono risultati i più vecchi della rete e come evidenziato dalle correlazioni età-diametro, sono comunque tutti tendenzialmente coetanei, vista l'esigua differenza nel *range* d'età. Anche nei siti calabresi le regressioni positive sono tutte comunque deboli. Solo il sito di NIC mostra caratteri di disetaneità, con un *range* molto marcato di età (40-122 anni). L'EPS, sempre al di sopra del valore soglia di 0.85 nel periodo comune a tutte le cronologie di tutti i siti, ci permette di assumere che queste cronologie siano rappresentative del segnale comune espresso da tutte le pinete (Wigley et al. 1984). I parametri statistici dendrocronologici hanno mostrato nel complesso una certa omogeneità di accrescimento tra i siti di NIC, BAZ e CLM con il valore di MW più basso rilevato a NIC che risulta essere in linea con l'età maggiore di questo popolamento (Di Filippo et al. 2016). Le modalità di accrescimento delle pinete studiate, sono caratterizzate da una variabilità che dipende sia dall'età che dall'area geografica e dalle condizioni stazionali. A partire da due importanti parametri dendrocronologici quali MS e A_1 , è stato osservato che esiste una relazione inversa. Infatti all'aumentare della sensitività (quindi della capacità di risposta a stimoli esterni), diminuisce l'autocorrelazione, ossia l'influenza dell'accrescimento di un anno su quelli successivi. L'MS maggiore di NIC conferma ciò essendo il sito che si trova in un clima più arido e che quindi risulta più sensitivo ai fattori ambientali limitanti (Piraino et al. 2012). Sottoponendo ad analisi statistica separatamente la crescita del legno tardivo e del legno primaverile, la sensitività maggiore si ha nel legno tardivo (LW), indipendentemente dal sito, la cui crescita si suppone venga regolata principalmente dai fattori ambientali e meno dalle sostanze di riserva accumulate, come riportato anche in altri studi sempre nel Bacino del Mediterraneo (Rozas et al. 2009; Pasho e Alla 2015; Toromani et al. 2015). In particolare viene confermata la maggiore sensitività del LW a NIC, con un valore di 0.54, dove effettivamente sussiste un regime di precipitazione inferiore rispetto agli altri siti. Differentemente da quanto riscontrato da Domec e Gartner (2002), la sensitività media sia di RW che di LW e EW non sembra essere legata ad un gradiente altitudinale ma alle condizioni climatiche stazionali. Si ritrovano poi valori del coefficiente di autocorrelazione di primo ordine maggiore in EW rispetto al LW ed in linea con i valori trovati per la stessa specie lungo la costa tirrenica italiana (Piraino et al. 2012; Piraino e Roig-Juñent 2014; Di Filippo et al. 2016).

L'analisi multivariata ha mostrato che tutte le cronologie, di tutti i siti, hanno la maggior parte della varianza comune spiegata dalla prima componente (PC1), il che indica la presenza di un segnale comune in particolare per Candelara, Badiazza e Cropani e, in misura leggermente inferiore, Nicosia. Invero, il sito di Colamaio nella Calabria tirrenica, si differenzia sulla seconda componente (PC2). Inoltre, per quanto riguarda il LW, CLM si pone in contrapposizione con NIC (sul PC2) ed è proprio il comportamento dell'accrescimento del legno tardivo che differenzia i due siti. Mentre a Colamaio emerge una dipendenza dalle precipitazioni invernali, a Nicosia emerge l'importanza del caldo invernale (Dicembre). La scarsità di risposte di CLM infatti, potrebbe essere influenzata da condizioni stagionali relative all'abbondanza di acqua. L'azione della vicinanza con la falda freatica si sa essere determinante durante i periodi di scarse precipitazioni (Teobaldelli et al. 2004) e quindi le caratteristiche stagionali possono interagire con le relazioni che i parametri climatici hanno con questa pineta rispetto agli altri siti. Le funzioni di correlazione hanno mostrato che la PC1 di RW è direttamente influenzata positivamente dalle precipitazioni di dicembre dell'anno precedente la formazione dell'anello e negativamente alle temperature del mese di marzo dell'anno di formazione dell'anello. Mostrano, inoltre, un fabbisogno di pioggia durante il periodo tardo primaverile-estivo (mese di maggio dell'anno di formazione dell'anello). Quindi tutte le pinete sono influenzate dalla disponibilità di acqua che si accumula nel suolo che servirà per la costruzione dell'anello durante la stagione vegetativa (Campelo et al. 2007). L'accrescimento anulare è inoltre favorito da un bilancio idrico positivo anche nel periodo tardo-primaverile nell'anno di crescita. Questo segnale è ben marcato in quanto trovato sia nelle correlazioni del PC1 di RW che nelle cronologie di EW. La quantità di acqua che si accumula nelle falde nel periodo autunnale-invernale, evidentemente favorisce lo sviluppo di EW. Lo stesso segnale climatico è stato riportato per la stessa specie anche nella penisola Iberica ed in Turchia (Akkemik 2000; Campelo et al. 2007; De Luis et al. 2009; Novak et al. 2011). Per quanto riguarda il LW, buona parte dei siti (PC1) è positivamente influenzata dalle precipitazioni di settembre e ottobre dell'anno in corso. Inoltre, è emerso un comportamento opposto tra Colamaio e Nicosia (sul PC2). Queste analisi hanno messo in luce come la crescita della rete sia influenzata principalmente dalla disponibilità di acqua in tre periodi ben distinti: quello invernale precedente l'anno di crescita, quello tardo primaverile-estivo e quello autunnale (Tabella 6, Tabella 7, Tabella 8). Questo segnale è stabile nel tempo e si è visto che dagli anni '80 è diventato più marcato il segnale dei mesi autunnali (settembre-ottobre) probabilmente dovuto alla concomitante diminuzione del trend di precipitazione come riportato in altri studi sempre nel contesto del Bacino del Mediterraneo (Sarris et al. 2011; Mazza e Manetti 2013; Granda et al. 2013; Nabais et al. 2014; Piraino e Roig-Juñent 2014). Questo segnale però, a partire dal 1980 è diventato significativo già a Ottobre in relazione al fatto di un marcata diminuzione delle precipitazioni. Il ruolo primario delle precipitazioni sulla risposta

climatica di crescita è stata messa inoltre in evidenza dalle CF delle singole cronologie. Le ampiezze anulari indicano una correlazione positiva con le precipitazioni da Ottobre fino a Marzo in tutto il periodo comune considerato (1974-2014) (Tabella 6, Tabella 7, Tabella 8).

Tabella 6 - Coefficienti significativi delle funzioni di correlazione con metodo bootstrap tra cronologie residue di ampiezza anulare (RW) e le variabili climatiche mensili di precipitazione (P) e temperatura (T), calcolate nel periodo comune 1974-2014. (+): correlazione significativa positiva; (-): correlazione significativa negativa

RW	Anno precedente la crescita						Anno di crescita											
Sito	g	l	a	s	o	n d	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
NIC	P					+	+					+						-
	T			-														
CAN	P																	
	T																	-
BAZ	P									+								
	T																	
CLM	P	-																
	T																	
CRO	P	-							+	+								+
	T										-							
ZIR	P	-						+										-
	T																	

Tabella 7 - Coefficienti significativi delle funzioni di correlazione con metodo bootstrap tra cronologie residue di legno primaverile (EW) e le variabili climatiche mensili di precipitazione (P) e temperatura (T), calcolate nel periodo comune 1974-2014. (+): correlazione significativa positiva; (-): correlazione significativa negativa

EW	Anno precedente la crescita						Anno di crescita											
Sito	g	l	a	s	o	n d	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
NIC	P					+	+											
	T			-														
CAN	P									+								-
	T			-		-												
BAZ	P			+						+								
	T																	
CLM	P										+							
	T					+												
CRO	P					+				+								
	T					-					-							-
ZIR	P									+								
	T			+														

Tabella 8 - Coefficienti significativi delle funzioni di correlazione con metodo bootstrap tra cronologie residue di legno tardivo (LW) e le variabili climatiche mensili di precipitazione (P) e temperatura (T), calcolate nel periodo comune 1974-2014. (+): correlazione significativa positiva; (-): correlazione significativa negativa

LW		Anno di crescita						
Sito		G	L	A	S	O	N	D
NIC	P	+				+		
	T							+
CAN	P				+			
	T							+
BAZ	P				+			
	T							
CLM	P					+		
	T							
CRO	P					+		
	T		-					-
ZIR	P							
	T							

L'effetto che il clima ha sulla crescita delle pinete della rete, nel periodo comune, è stato confrontato con i livelli di produttività, per capire come queste variabili hanno guidato la crescita delle piante nei diversi siti. Abbiamo rilevato come la produttività di tutti i siti possa essere divisa in due grandi periodi. Quest'ultima diminuisce più o meno progressivamente a cominciare dal 1974 fino alla fine degli anni '90, inizi del 2000, per poi riprendere a crescere fino al 2010, per poi stabilizzarsi/declinare leggermente. In accordo con quanto riportato fino ad adesso, gli incrementi di area basimetrica (BAI) di tutti i siti mostrano una sincronizzazione soprattutto con le precipitazioni del periodo invernale (Dicembre, Gennaio, Febbraio, Marzo), con leggere fluttuazioni legate probabilmente alla maggiore o minore capacità di usufruire di queste piogge. Comportamento che si accentua nell'ultimo periodo con un progressivo aumento delle precipitazioni cui fa seguito un aumento del trend di crescita di tutti i siti. Per quanto riguarda Nicosia, il picco di BAI (2010) risulta intermedio fra il massimo di precipitazioni invernali (2011) e quello delle precipitazioni del periodo estivo (Maggio-Giugno) (2006).

Dal confronto dei tassi di crescita di EW e LW, presente in ogni anello delle cronologie stagionali create, con le variazioni climatiche che sono risultate significative nelle analisi delle funzioni di correlazione, si evince che il legno primaverile (EW) di tutti i siti, durante il periodo 1974-2009, segue il trend delle precipitazioni del periodo estivo (Maggio-Giugno) con un

andamento più accentuato nei siti calabresi (CRO e CLM) che si trovano a bassa quota. Durante il secondo e terzo periodo in comune invece, sembra aver influenzato maggiormente la crescita di EW il regime delle precipitazioni invernali (DGFM) con la conseguente diminuzione di accrescimento fino al 2014. Tutti i siti mostrano una sincronizzazione soprattutto con le precipitazioni del periodo invernale (Dicembre, Gennaio, Febbraio, Marzo), considerando d'altronde che EW è in media il 70% dell'intero anello. Un andamento simile si è trovato anche nell'accrescimento del legno tardivo (LW) che mostra un trend negativo tra il 1974 ed il 1999 per poi riprendere a crescere dal 2000 fino al 2014. Il trend di crescita segue, soprattutto nell'ultimo decennio, l'andamento delle precipitazioni del periodo autunnale (SO). Un trend del tutto diverso si riscontra nella pineta di Nicosia (NIC), che è la stazione posta a quote più alte (700 m s.l.m. in media) e dove l'ammontare annuo delle precipitazioni è il più basso di tutta la rete (556 mm anno⁻¹).

Per valutare le variazioni di crescita nei confronti della siccità che determinano queste differenti risposte in alberi che crescono in un diverso gradiente climatico è stato analizzato quantitativamente il regime della siccità, in diverse scale temporali, in base alla SPI. Confrontando i valori medi annui dello SPI con le variazioni percentuali di LW ed EW è risultato che nel periodo tra il 1974 ed il 1990 la percentuale di produzione di legno primaverile è diminuita con l'aumento dell'aridità media. Questo trend continua fino al 2003 per poi aumentare fino ad oggi, confermando che al diminuire dell'aridità ed al sopraggiungere di un regime più umido, la crescita è rappresentata dalla produzione di EW. Questo studio conferma il fatto che una maggiore produzione di LW è da attribuirsi ad uno stress idrico superiore (Campelo et al. 2007) e come riportato da Domec e Gartner (2002) potrebbe confermare la strategia per la crescita delle conifere in condizioni di un clima più umido in primavera e condizioni più aride in estate. L'indice di siccità (SPI) calcolati su scale stagionali è stato in grado di catturare l'impatto della siccità sulla crescita degli alberi e identificare la scala temporale e la stagione di crescita in gran parte in risposta a stress idrico estivo e maggiore umidità nel periodo autunno-inverno. Questa evidenza sottolinea l'utilità degli indici multi-scalari di siccità per il monitoraggio degli impatti sulla crescita degli alberi così come trovato per altri sistemi (Vicente-Serrano et al. 2012).

I popolamenti di pino domestico, in conclusione, allo stato attuale, riportano dei valori di incremento di area basimetrica (in termini di incremento medio) piuttosto stabili nell'ultimo periodo, nonostante l'inaridimento del clima; con il sito di NIC che mostra addirittura una crescita sia in IC che di IM. La percentuale di legno primaverile presente all'interno dell'anello si attesta sul valore medio del 70.6 %, con un trend percentuale che diminuisce a NIC (in misura più evidente) a favore del legno tardivo. Questo fenomeno si spiega se si prendono in considerazione i cambiamenti climatici che hanno visto dal 1960 a oggi un incremento della temperatura di 0.60 °C ed una diminuzione delle precipitazioni soprattutto nei mesi primaverili-estivi (Brunetti et al. 2006). Una

maggior aridità nei mesi primaverili estivi influenza negativamente la produzione di legno primaverile arrestando prima la crescita, come nel caso di NIC. Al contrario un clima più mite e piovoso nel periodo autunnale, favorisce la crescita di legno tardivo che va a compensare, in parte, la minore produzione di legno primaverile (Di Filippo et al. 2016).

8. CONCLUSIONI

Le analisi dendroclimatiche sopra riportate per la rete di pino domestico (*Pinus pinea* L.) del sud Italia, analizzate in questa ricerca, indicano che la crescita di questa specie è influenzata in particolare dal regime delle precipitazioni distribuite in tre periodi durante la crescita. In particolare si sono riscontrate correlazioni positive con le precipitazioni invernali-primaverili (mesi di dicembre, gennaio, febbraio, marzo) che in accordo con altri studi condotti nel bacino del Mediterraneo sulla stessa specie, mostrano come una larga parte dell'accrescimento si avvantaggi dell'acqua che viene accumulata nel terreno durante la stagione fredda. Inoltre la crescita delle pinete è influenzata positivamente dalle precipitazioni del periodo tardo primaverile - estivo (maggio-giugno) e nel periodo tardo estivo - autunnale (settembre-ottobre), che influenza la produzione di legno primaverile e tardivo, rispettivamente.

Le funzioni di correlazione mobile hanno indicato tendenze più dettagliate e dinamiche delle risposte di crescita nei confronti del clima nel corso del periodo 1974-2014 a scala decennale. Il significato dello spostamento dell'influenza delle precipitazioni dei mesi invernali ed autunnali sulla crescita, potrebbe indicare che gli alberi utilizzano sempre più la fornitura di acqua immagazzinata nel terreno nell'anno precedente per affrontare condizioni più aride durante la stagione vegetativa rispetto a quelle della prima metà del periodo comune. Queste tendenze mostrano come questo fenomeno aumenti fino ai giorni nostri con l'aumentare delle piogge invernali e con l'aumentare dell'aridità estiva. Le valutazioni sulle risposte della crescita, in relazione all'aumentare dell'aridità, determinano questa capacità di risposta in alberi che crescono in un ampio gradiente climatico-altitudinale. Il risultato ha evidenziato una maggiore tendenza di produzione percentuale di legno tardivo a discapito del legno primaverile. Se diminuisce la percentuale di EW è perché verosimilmente legato ad una diminuzione delle precipitazioni di maggio-giugno, mentre aumentano quelle autunnali.

Ciò suggerisce che i modelli di risposta alla siccità da parte di questa specie sono molto complessi, anche a scala locale e tra le specie coesistenti. Risultati simili sono stati ottenuti da studi precedenti con altre specie di pini mediterranei che suggeriscono che le risposte clima-crescita sono specie-specifiche (De Luis et al. 2009; Sánchez-Salguero et al. 2010; Novak et al. 2011; Nabais et al. 2014; Toromani et al. 2015).

Queste informazioni assumono un significato rilevante se si considera che in tutte le regioni del Mediterraneo le precipitazioni annue sono diminuite nel corso del tempo fino ad oggi e le temperature aumentano (IPCC 2014). Il documentato declino delle precipitazioni negli ultimi decenni (Brunetti et al. 2006) ha aumentato la dipendenza della crescita degli alberi (in diversi anni) dai segnali delle precipitazioni. Questo è importante in quanto per il sud Europa, scenari di cambiamento climatico prevedono un aumento della temperatura dell'aria (+4 °C) e la diminuzione delle precipitazioni (-20%) entro la fine del 21° secolo (Bruci 2007).

Alla luce delle evidenze dei diversi studi dendroecologici e del progressivo cambiamento delle condizioni climatiche, da un punto di vista pianificatorio, si pone il problema gestionale di queste pinete; di quali possano essere le strategie migliori per poter preservare le condizioni vegetative e migliorare la loro capacità di resilienza. Anche in presenza di un fattore comune che guida la crescita di questi popolamenti, si è visto come poi ognuno risponda in maniera differente a seconda dello stato vegetativo attuale, della struttura, dell'età, dei fattori di disturbo che ne influenzano le dinamiche. Occorrerà pertanto prevedere delle azioni specifiche e mirate in funzione delle situazioni. L'abbandono colturale avvenuto a partire dagli anni 70' e la totale o parziale assenza di una programmazione selvicolturale, hanno portato anch'esse ad un progressivo indebolimento delle pinete e della loro funzionalità, caratterizzato dalla presenza di popolamenti affetti da evidenti anomalie strutturali e funzionali, come nel caso delle pinete litoranee calabresi. Di conseguenza una gestione integrata e attiva basata sia su interventi selvicolturali ma anche di restauro forestale, mirati al mantenimento del pino domestico, può diventare un importante strumento nei soprassuoli ad elevato contenuto paesaggistico-ricreativo. Allo stesso modo nei soprassuoli caratterizzati da una certa naturalità, o dalla presenza di alberi annosi, come nel caso dei popolamenti siciliani di Nicosia e Badiazza, bisognerà tener conto dell'importanza che possono assumere gli interventi selvicolturali effettuati al fine di garantire un miglior utilizzo delle risorse idriche. Questo discorso potrebbe essere esteso sia per quanto riguarda la diminuzione delle precipitazioni autunno-invernali, che sono quelle maggiormente correlate con l'accrescimento radiale, sia per l'abbassamento della falda freatica dovuto all'antropizzazione eccessiva degli ambienti costieri.

9. BIBLIOGRAFIA

- Abad Viñas R, Caudullo G, Oliveira S, de Rigo D (2016) *Pinus pinea* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San Miguel Ayanz J, de Rigo D, Caudullo G, et al. (eds) *European Atlas of Forest Tree Species*, Publ. Off. Luxembourg, p e01b4fc+
- Agrimi M, Bollati S, Giordano E, Portoghesi L (2002) Agrimi M., Bollati S., Giordano E., Portoghesi L., 2002 – Struttura dei popolamenti e proposte di gestione per le pinete del litorale romano. *L'Italia Forestale e Montana*, LVII (3): 242-258. *L'Italia Forestale e Montana* LVII:242–258.
- Akkemik U (2000) Dendroclimatology of umbrella pine (*Pinus pinea* L.) in Istanbul, Turkey. *Tree-Ring Bulletin* 56:17–20.
- Aljos F, Filer D (2013) *An Atlas of the World's Conifers: An Analysis of Their Distribution, Biogeography, Diversity and Conservation Status*. Brill Academic Publishers
- AA.VV. (2012) *Piano Forestale Regionale: analisi conoscitiva*. Assessorato Regionale delle Risorse Agricole e Alimentari della Regione Siciliana. Palermo
- Aniol RW (1983) Tree-ring analysis using CATRAS. *Dendrochronologia*, 1: 45-53
- Aniol RW (1987) A new device for Computer Assisted Measurement of Tree-Ring Widths. *Dendrochronologia*, 5: 135-141.
- Battipaglia G, Campelo F, Vieira J, et al. (2016) Structure and Function of Intra–Annual Density Fluctuations: Mind the Gaps. *Frontiers in Plant Science* 7:595. doi: 10.3389/fpls.2016.00595
- Biondi F (1992) Development of a tree-ring network for the Italian Peninsula. *Tree-ring Bulletin* 52:15–29.
- Biondi F (2000) Are climate-tree growth relationships changing in north-central Idaho, USA? *Arct. Antarct. Alp. Res.* 32: 111–116
- Blasing T et al. (1984) Response functions revisited. *Tree Ring Bull.* 44: 1–15
- Briffa KR (1995) Interpreting High-Resolution Proxy Climate Data - The Example of Dendroclimatology. In: *Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques* (Eds. H. von Storch and A. Navarra), pp.77-94 Springer, Berlin.
- Bruçi E (2007) *Climate Change Projection for South Eastern Europe, HDMI*. Tirana Polytechnic University, Tirana, Albania
- Brunetti M, Maugeri M, Monti F, Nanni T (2006) Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *International Journal of Climatology* 26:345–381. doi: 10.1002/joc.1251
- Bunn AG (2008) A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26:115–124. doi: 10.1016/j.dendro.2008.01.002
- Bunn AG (2010) Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia*

28:251–258. doi: 10.1016/j.dendro.2009.12.001

- Camerano P, Cullotta S, Varese P, (2011). Strumenti conoscitivi per la gestione delle risorse forestali della Sicilia. Tipi Forestali. Regione Siciliana, pp. 192
- 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
- Campelo F, Nabais C, Freitas H, Gutierrez E (2007) Climatic significance of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a dry Mediterranean area in Portugal. *Annals of Forest Science* 64:229–238. doi: 10.1051/forest
- Cherubini P (1993) Studio dendroecologico su *Pinus pinea* L. in due differenti stazioni sulla costa mediterranea. *Dendrochronologia* 87–99.
- Cherubini P, Gartner BL, Tognetti R, et al. (2003) Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from mediterranean climates. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 78:S1464793102006000. doi: 10.1017/S1464793102006000
- Ciancio O, Travaglini D, Bianchi L, Mariotti B (2009) La gestione delle pinete litoranee di pino domestico: il caso dei Tomboli di Cecina. *Atti del Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura. Accademia Italiana di Scienze Forestali*, pp 156–162
- Cook ER, Kairiukstis LA (1990) *Methods of Dendrochronology: applications in environmental science* doi: 10.1007/978-94-015-7879-0
- Cropper JP (1984) Multicollinearity within selected western North American temperature and precipitation data sets. *Tree-Ring Bulletin* 44:29-37
- D'Arrigo R et al. (2008) On the “divergence problem” in northern forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global Planet. Change* 60: 289–305
- De Luis M, Novak K, Čufar K, Raventós J (2009) Size mediated climate-growth relationships in *pinus halepensis* and *pinus pinea*. *Trees - Structure and Function* 23:1065–1073. doi: 10.1007/s00468-009-0349-5
- De Micco V, Balzano A, Čufar K, et al. (2016) Timing of False Ring Formation in *Pinus halepensis* and *Arbutus unedo* in Southern Italy: Outlook from an Analysis of Xylogenesis and Tree-Ring Chronologies. *Frontiers in Plant Science* 7:1–14. doi: 10.3389/fpls.2016.00705
- Di Filippo A, Baliva M, De Angelis M, Piovesan G (2016) Dendroecological study of the old-growth *Pinus pinea* forest of Fregene (Fiumicino - Rome). *Designing the future of the forestry sector*. Florence, 26-29 November 2014. Florence, pp 161–165
- Di Filippo A, Biondi F, Čufar 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. *Journal of Biogeography* 34:1873–1892. doi: 10.1111/j.1365-2699.2007.01747.x

- Domec J-C, Gartner BL (2002) How do water transport and water storage differ in coniferous earlywood and latewood? *Journal of Experimental Botany* 53:2369–2379. doi: 10.1093/jxb/erf100
- Eckenwalder JE (2009) *Conifers of the World: The Complete Reference*. Timber press
- Efron B, Tibshirani R (1986) Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. *Statistical Science*, 1, 54–75
- Fady B, Fineschi S, Vendramin GG (2008) *EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for Italian stone pine (Pinus pinea)*. Rome
- Farjon (2015) *Pinus pinea*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013. 8235:
- Finlayson C, Giles Pacheco F, Rodríguez-Vidal J, et al. (2006) Late survival of Neanderthals at the southernmost extreme of Europe. *Nature* 443:850–853. doi: 10.1038/nature05195
- Fritts HC (1976) *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London
- Fritts HC (2001) *Tree Rings and Climate, 2nd Editio*. Blackburn Press
- Galli M, Guadalupi M, Nanni T, et al. (1992) Ravenna pine trees as monitors of winter severity in N-E Italy. *Theoretical and Applied Climatology* 45:217–224. doi: 10.1007/BF00866195
- Gatto A (2002) *Monti Peloritani. Azienda Regione Foreste Demaniali*, Palermo
- Genova Fuster M (2000) Relations between growth and climate in *Pinus pinea* based in the annual growth rings. 1st Symposium on Stone Pine (*Pinus pinea* L.)
- Giorgi F, Lionello P (2008) Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* 63:90–104. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.005
- Granda E, Camarero JJ, Gimeno TE, et al. (2013) Intensity and timing of warming and drought differentially affect growth patterns of co-occurring Mediterranean tree species. *European Journal of Forest Research* 132:469–480. doi: 10.1007/s10342-013-0687-0
- Grissino-Mayer HD (2001) Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57: 205-221
- Hammer Ø, Harper D (2006) *Paleontological Data Analysis*. Blackwell Publishing, Oxford, UK
- Holmes RL (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43: 69-78
- IPCC (2014) *Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers*. Ipcc 31. doi: 10.1017/CBO9781107415324
- Jolliffe IT (1986) *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag - New York.
- Legendre P, Legendre L (1988) Summary for Policymakers. In: *Intergovernmental Panel on Climate Change (ed) Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 1–30
- Lionello P, Boldrin U, Giorgi F (2008) Future changes in cyclone climatology over Europe as

- inferred from a regional climate simulation. *Climate Dynamics* 30:657–671. doi: 10.1007/s00382-007-0315-0
- Mazza G, Manetti MC (2013) Growth rate and climate responses of *Pinus pinea* L. in Italian coastal stands over the last century. *Climatic Change* 121:713–725. doi: 10.1007/s10584-013-0933-y
- Mercurio R, Bagnato S, Di Lorenzo F, et al. (2009) *Le pinete della Calabria (Versante tirrenico)*. Laruffa Editore, Reggio Calabria. pp.86
- Mirov NT, Iloff PM (1955) Composition of Gum Turpentine of Pines. XXIII: A Report on Three Mediterranean Species: *Pinus pinea* (Cultivated in California), *P. halepensis* (from Israel) and *P. brutia* (from Cyprus). *Journal of the American Pharmaceutical Association (Scientific ed)* 44:186–189. doi: 10.1002/jps.3030440317
- Montero G, Calama R, Ruiz-Peinado R (2008) *Slvicultura de pinis pinea*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (España)
- Nabais C, Campelo F, Vieira J, Cherubini P (2014) Climatic signals of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinaster* and *Pinus pinea* along a latitudinal gradient in Portugal. *Forestry* 87:598–605. doi: 10.1093/forestry/cpu021
- Novak K, De Luis M, Čufar K, Raventós J (2011) Frequency and variability of missing tree rings along the stems of *Pinus halepensis* and *Pinus pinea* from a semiarid site in SE Spain. *Journal of Arid Environments* 75:494–498. doi: 10.1016/j.jaridenv.2010.12.005
- Olivar J, Bogino S, Spiecker H, Bravo F (2012) Climate impact on growth dynamic and intra-annual density fluctuations in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) trees of different crown classes. *Dendrochronologia* 30:35–47. doi: 10.1016/j.dendro.2011.06.001
- Olivar J, Bogino S, Spiecker H, Bravo F (2015a) Changes in climate-growth relationships and IADF formation over time of pine species (*Pinus halepensis*, *P. pinaster* and *P. sylvestris*) in Mediterranean environments. *Forest Systems* 24:1–9. doi: 10.5424/fs/2015241-05885
- Olivar J, Rathgeber C, Bravo F (2015b) Climate change, tree-ring width and wood density of pines in Mediterranean environments. *IAWA Journal* 36:257–269. doi: 10.1163/22941932-20150098
- Orlóci L (1975) *Multivariate Analysis in Vegetation Research*. doi: 10.1007/978-94-017-5608-2
- Pasho E, Alla A (2015) Climate impacts on radial growth and vegetation activity of two coexisting Mediterranean pine species. *Canadian Journal of Forest Research* 45:1748–1756. doi: 10.1139/cjfr-2015-0146
- Piovesan G, Biondi F, Di Filippo A, et al. (2008) Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Global Change Biology* 14:1265–1281. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01570.x
- Piraino S, Camiz S, Filippo A, et al. (2012) A dendrochronological analysis of *Pinus pinea* L. on the

- Italian mid-Tyrrhenian coast. *Geochronometria* 40:77–89. doi: 10.2478/s13386-012-0019-z
- Piraino S, Roig-Juñent FA (2014) North Atlantic Oscillation influences on radial growth of *Pinus pinea* on the Italian mid-Tyrrhenian coast. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology* 148:279–287. doi: 10.1080/11263504.2013.770806
- Raddi S, Cherubini P, Lauteri M, Magnani F (2009) The impact of sea erosion on coastal *Pinus pinea* stands: A diachronic analysis combining tree-rings and ecological markers. *Forest Ecology and Management* 257:773–781. doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.025
- Raventós J, De Luis M, Gras MJ, et al. (2001) Growth of *Pinus pinea* and *Pinus halepensis* as affected by dryness, marine spray and land use changes in a Mediterranean semiarid ecosystem. *Dendrochronologia* 19:211 – 220.
- Romagnoli M, Bernabei M (1997) Analisi dendrocronologica preliminare nella Tenuta presidenziale di Castelporziano (Roma). *Linea Ecologica* XXIX 50–59.
- Rozas V, Lamas S, Garcia-Gonzalez I (2009) Differential Tree-Growth Responses to Local and Large-Scale Climatic Variation in Two *Pinus* and Two *Quercus* Species in Northwest Spain. *Ecoscience* 16:299–310. doi: 10.2980/16-3-3212
- Sánchez-Salguero R, Navarro RM, Camarero JJ, Fernández-Cancio Á (2010) Drought-induced growth decline of Aleppo and maritime pine forests in south-eastern Spain. *Forest Systems* 19:458. doi: 10.5424/fs/2010193-9131
- Sarris D, Christodoulakis D, Körner C (2011) Impact of recent climatic change on growth of low elevation eastern Mediterranean forest trees. *Climatic Change* 106:203–223. doi: 10.1007/s10584-010-9901-y
- Schuster R, Oberhuber W (2013). Drought sensitivity of three co-occurring conifers within a dry inner Alpine environment. *Trees* 27: 61–69
- Shaughnessy G (1980) Historical ecology of alien woody plants in the vicinity of Cape Town, South Africa. University of Cape Town
- Teobaldelli M, Mencuccini M, Piussi P (2004) Water table salinity, rainfall and water use by umbrella pine trees (*Pinus pinea* L.). *Plant Ecology* 171:23–33.
- Toromani E, Pasho E, Alla AQ, et al. (2015) Radial growth responses of *Pinus halepensis* Mill. and *Pinus pinea* L. forests to climate variability in Western Albania. *Geochronometria* 42:91–99. doi: 10.1515/geochr-2015-0012
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, et al. (2012) Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. *Earth Interactions* 16:1–27. doi: 10.1175/2012EI000434.1
- Vieira J, Campelo F, Nabais C (2009) Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate. *Trees - Structure and*

Function 23:257–265. doi: 10.1007/s00468-008-0273-0

Walter H, Lieth H (1960) Klimadiagramm Weltatlas, Lieferung . Fischer Verlag, Jena (Deutschland)

Wigley TML, Briffa KR, Jones PD (1984) On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:201–213. doi: 10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2

Zang C, Biondi F (2015) treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography* 38:431–436. doi: 10.1111/ecog.01335

10. RINGRAZIAMENTI

Non è facile citare e ringraziare in poche righe, figuriamoci in una tesi di Dottorato, tutte le persone che hanno contribuito alla nascita e allo sviluppo di questo elaborato: chi con una collaborazione costante, chi con un supporto morale o materiale, chi con consigli e suggerimenti o solo con parole di incoraggiamento. Ancor più, in quanto la sua stesura è avvenuta in mesi dolorosi e difficili contrassegnati da un grande vuoto. Essere qui a scrivere oggi i ringraziamenti è una grande vittoria! Ma non posso non dedicare ancora qualche altra battuta sulla tastiera del PC per ringraziare a chi, in particolare, andrà sempre la mia riconoscenza:

Ringrazio il prof. Gianluca Piovesan per essersi fatto carico di ospitare all'Università della Tuscia un "migrante" siciliano, per il tempo dedicatomi e gli insegnamenti dispensati nonostante gli impegni e le enormi difficoltà; sono valsi più di qualsiasi altra cosa.

Ringrazio il mio Tutor, il dott. Alfredo Di Filippo, che ha permesso e favorito il raggiungimento di tale obiettivo.

Desidero ringraziare "ancora una volta", il prof. Roberto Mercurio al quale andranno sempre la mia gratitudine e riconoscenza; colui che per primo mi ha dato fiducia e senza il quale non avrei avuto l'opportunità di crescere e fare tante esperienze. Grazie di cuore per la sua stima ed il suo impegno, esempio di vita e di professionalità.

Un grazie speciale al mitico Michele Baliva, per l'amicizia, l'aiuto indispensabile ed al quale devo anche un po' del mio sapere; spero di avere in futuro, la possibilità di rendere a te ciò che tu hai fatto per me.

Grazie a te Francesca, solo tu potevi sopportare questi anni della nostra vita. Grazie a te che non mi ha mai abbandonato e che credi profondamente in me. Sei speciale.

Grazie di cuore anche a Giuseppe Modica, per la fiducia e l'entusiasmo dimostrato nel corso di questi anni e per la vicinanza nei momenti difficili, nonostante la lontananza.

Ovviamente un sincero grazie lo dedico a due "lavoratori" magnifici, Marcello Libro e Alessandro Sirna, per l'aiuto nei rilievi in bosco e quando chiamati in causa, siete stati fantastici.

Un grazie per la vita a mia madre, che ha sempre osservato e vegliato su di me e ha sempre compreso senza tante parole, nonostante le grosse difficoltà di questi ultimi mesi.

In ultimo, ma non per questo per ultimo, un grazie non posso che rivolgerlo all'amico fraterno Angelo Merlino; posso solo augurarci che il futuro ci riservi ancora tanto tempo da trascorrere insieme, anche se la faccenda la vedo.....moolto complessa!!!!

Grazie a tutti coloro i quali mi hanno accompagnato nelle lunghe giornate viterbesi rendendole un'esperienza indimenticabile.

Infine, il ringraziamento più importante e più sentito va a te, papà, perché so che da lassù mi stai guardando. Perché so che ovunque tu sia mi stai sorridendo, come sempre. Grazie, per tutte le

volte che pensavo di mollare eri tu che mi davi la forza e il coraggio per andare avanti. Voglio lottare anch'io, come hai sempre fatto tu. Spero tu sia fiero di me. Nonostante tutto ce l'ho fatta. E questo grande traguardo è per te!

Francesco Solano

11. ALLEGATI

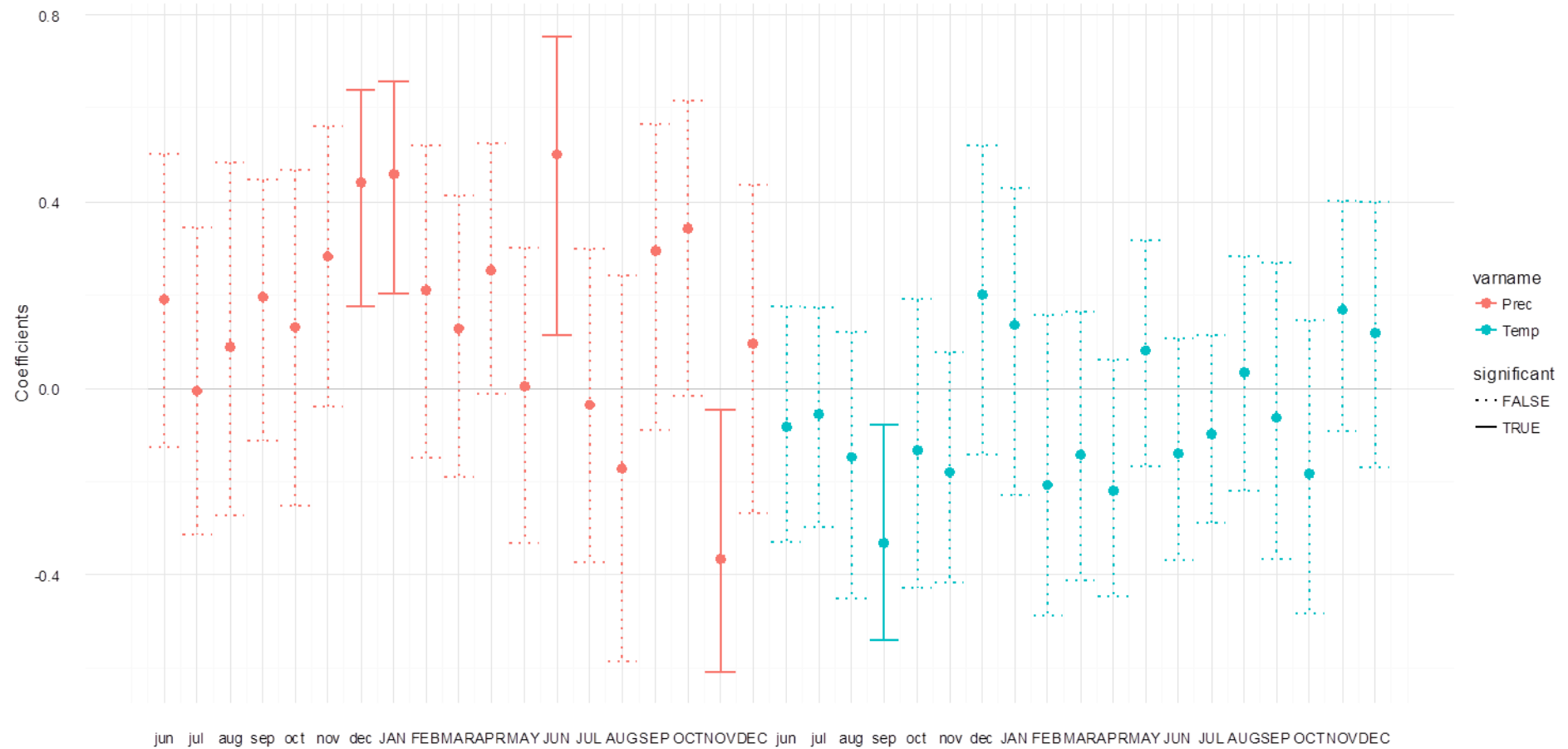


Figura 27 - SITO NIC. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di RW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$) sono indicate da un asterisco Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

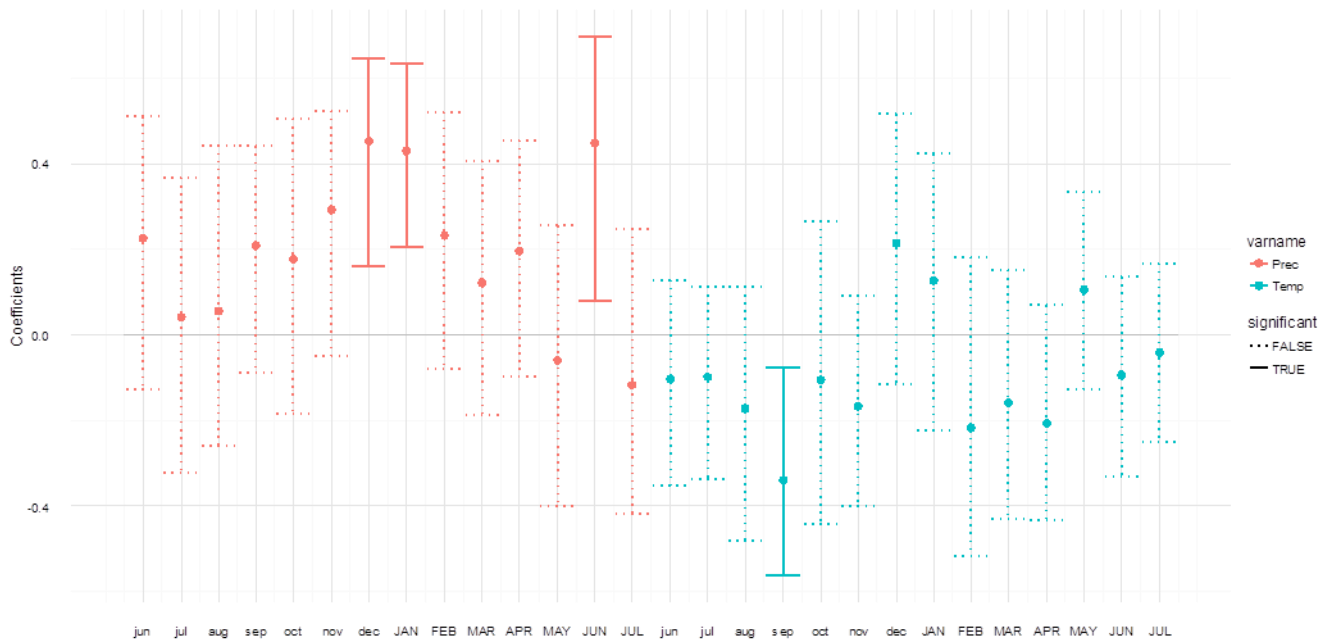


Figura 28 - SITO NIC. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di EW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

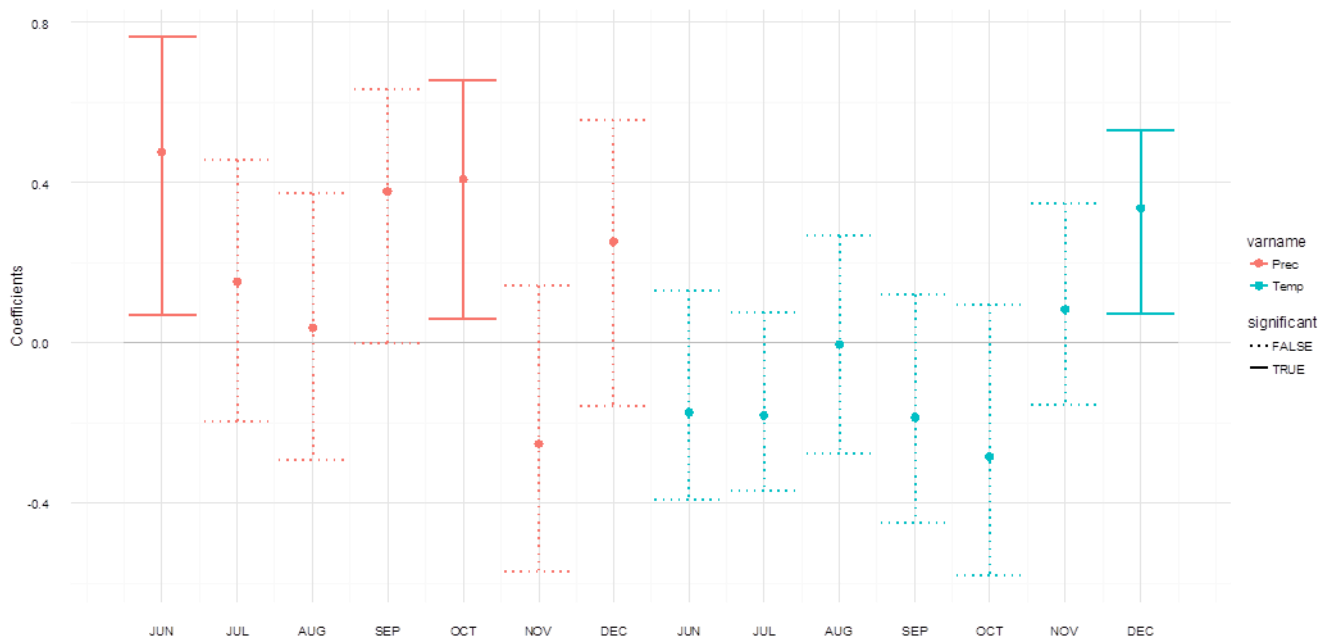


Figura 29 - SITO NIC. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di LW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

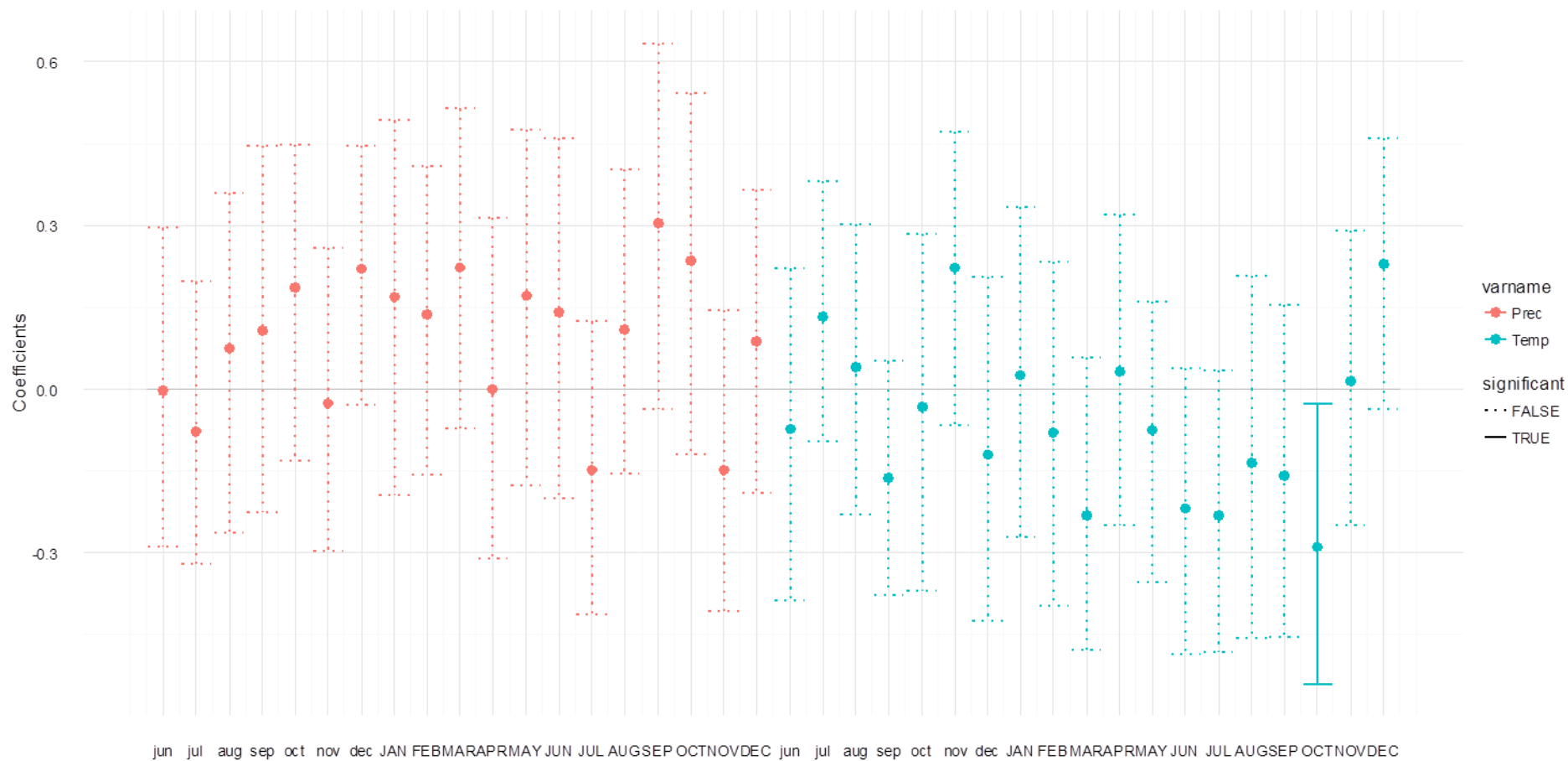


Figura 30 - SITO CAN. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di RW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$) sono indicate da un asterisco Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

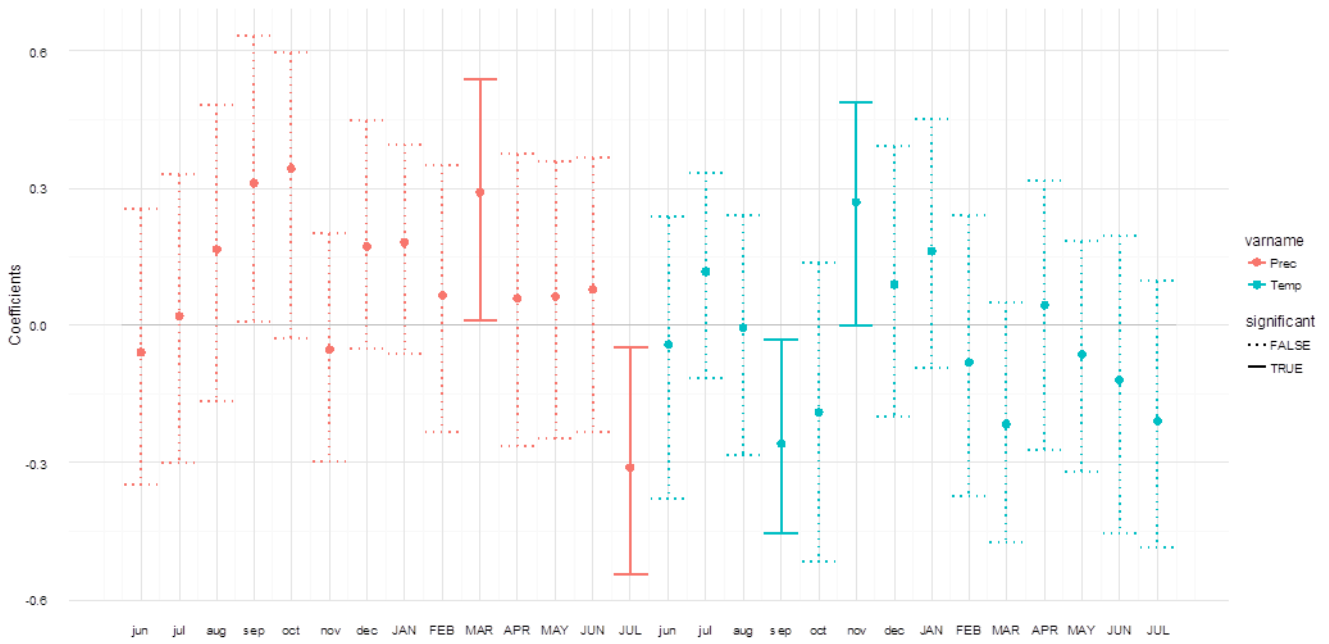


Figura 31 - SITO CAN. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di EW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

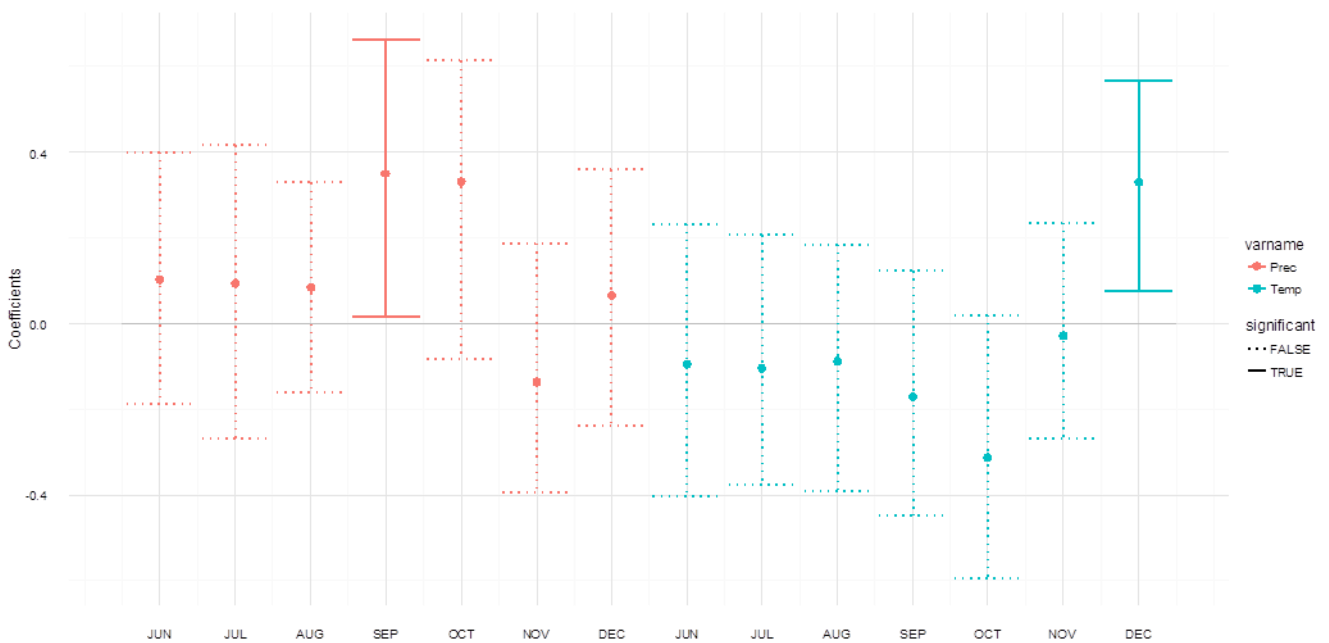


Figura 32 - SITO CAN. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di LW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

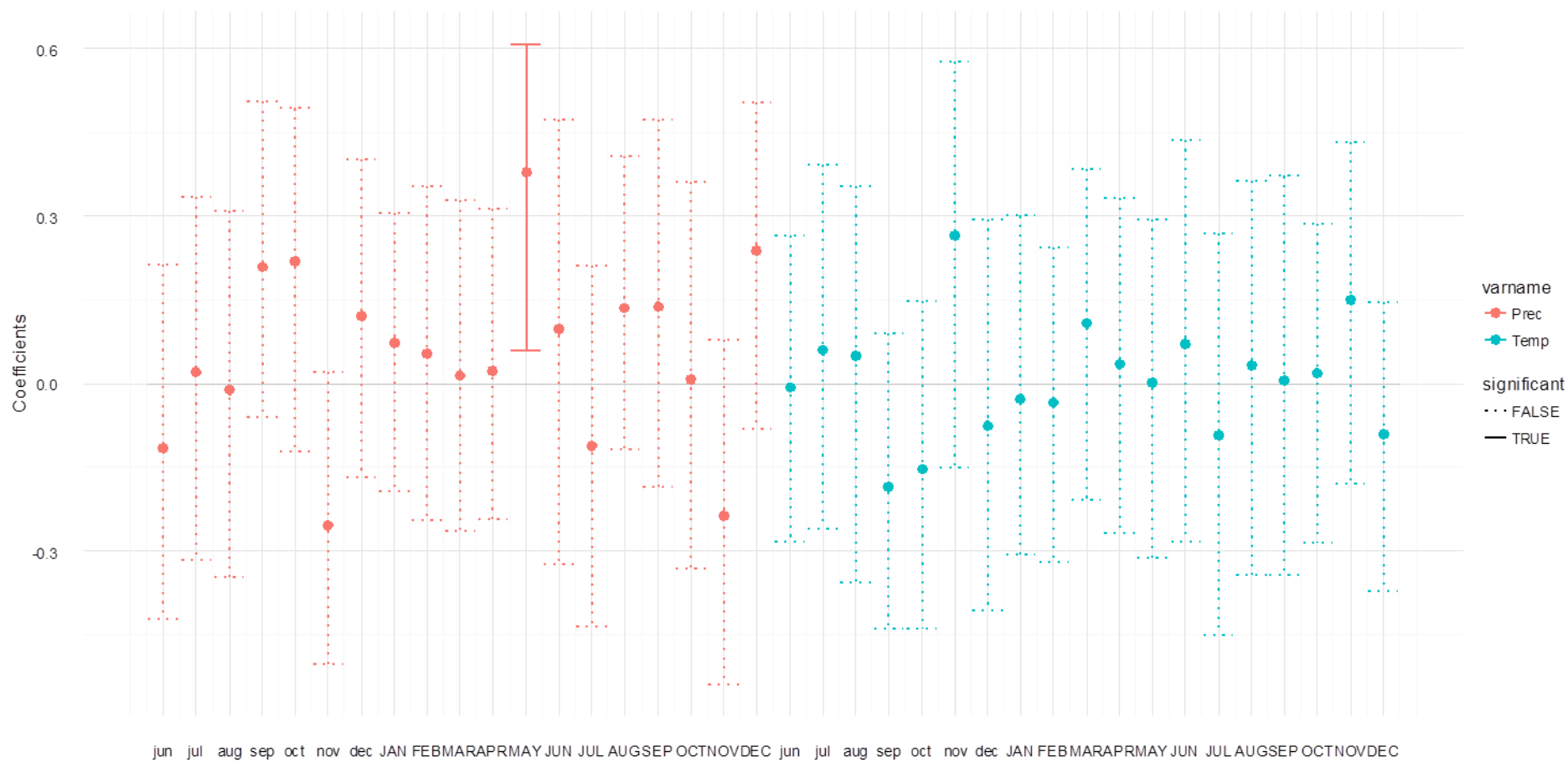


Figura 33 - SITO BAZ. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di RW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$) sono indicate da un asterisco Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

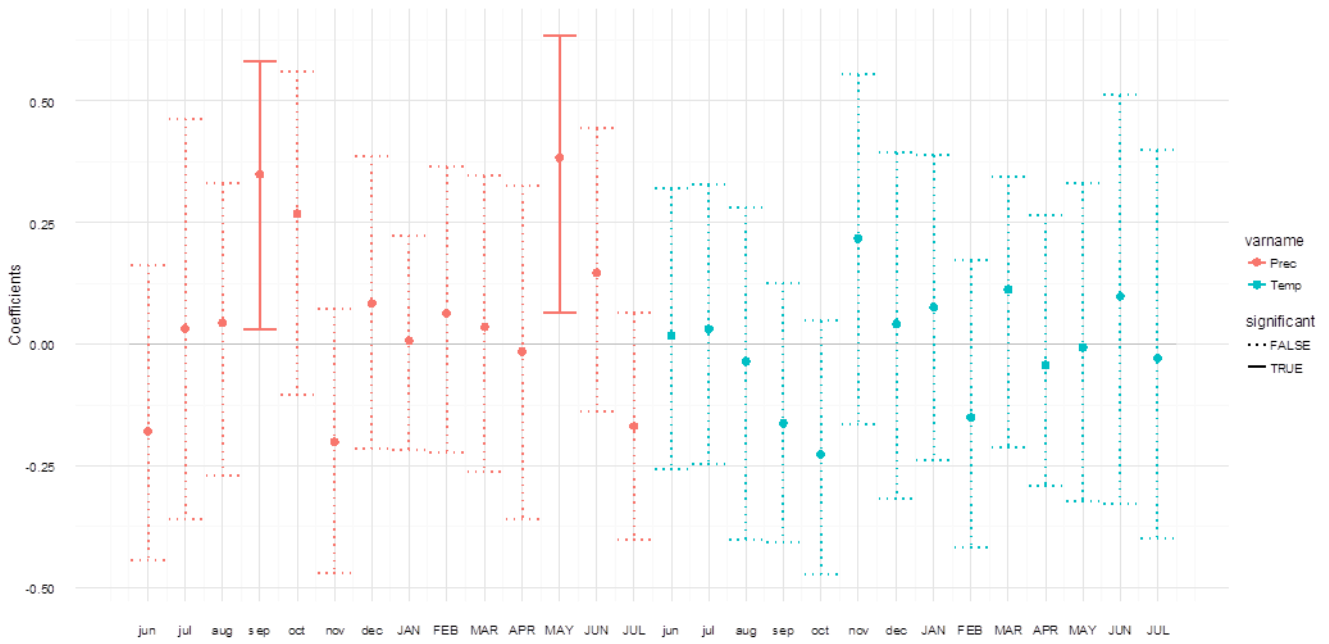


Figura 34 - SITO BAZ. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di EW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

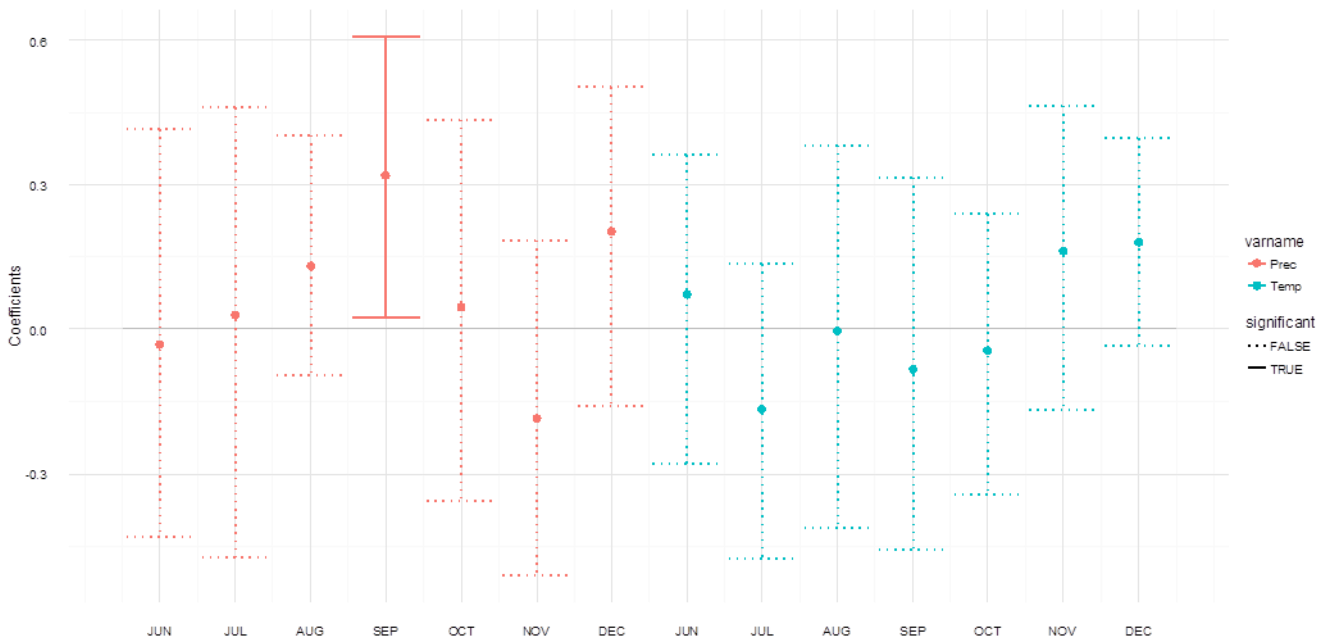


Figura 35 - SITO BAZ. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di LW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

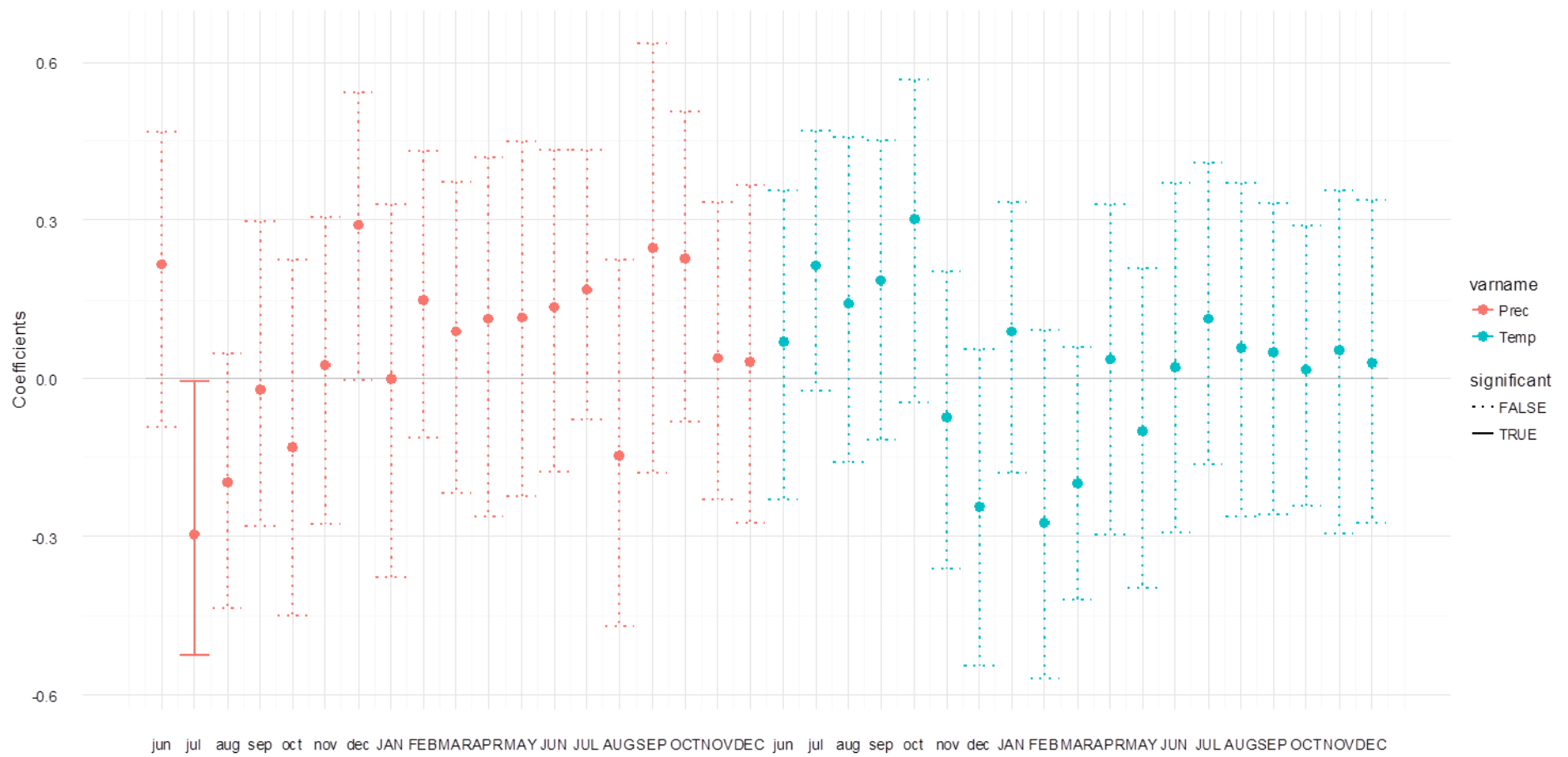


Figura 36 - SITO CLM. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di RW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$) sono indicate da un asterisco Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

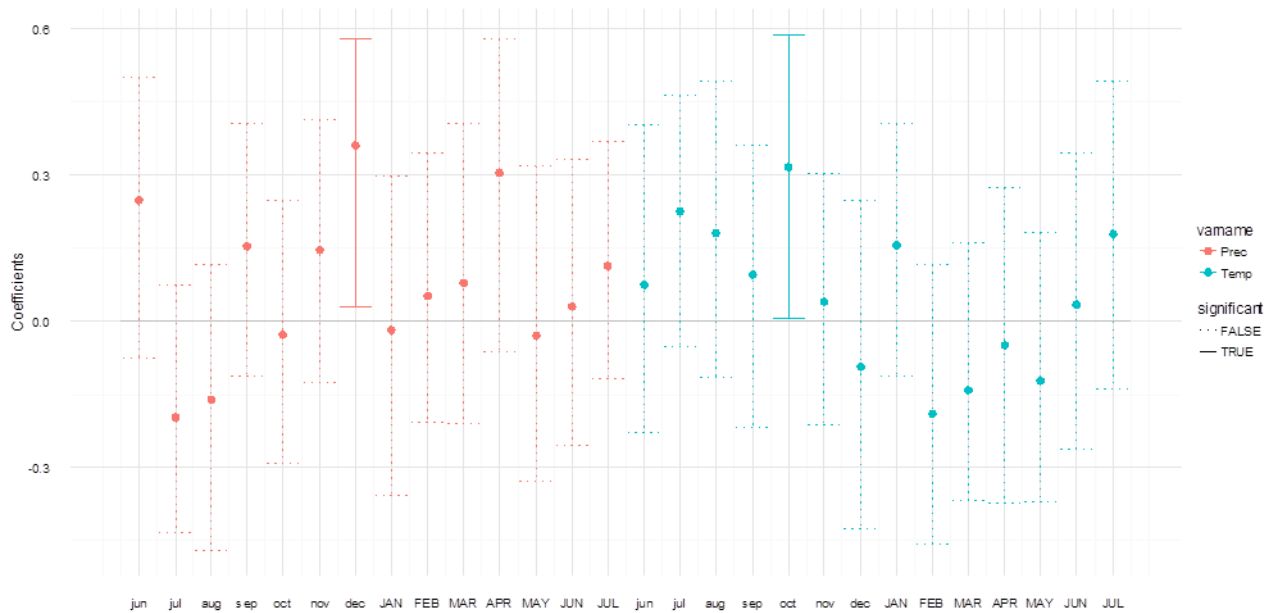


Figura 37 - SITO CLM. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di EW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

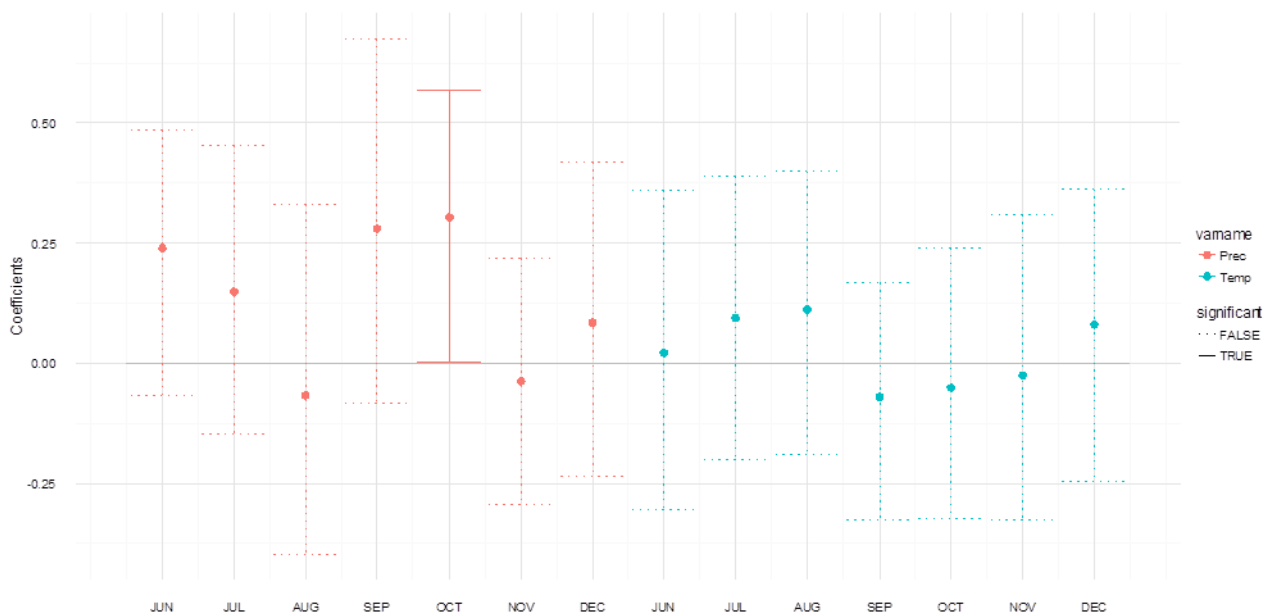


Figura 38 - SITO CLM. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di LW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

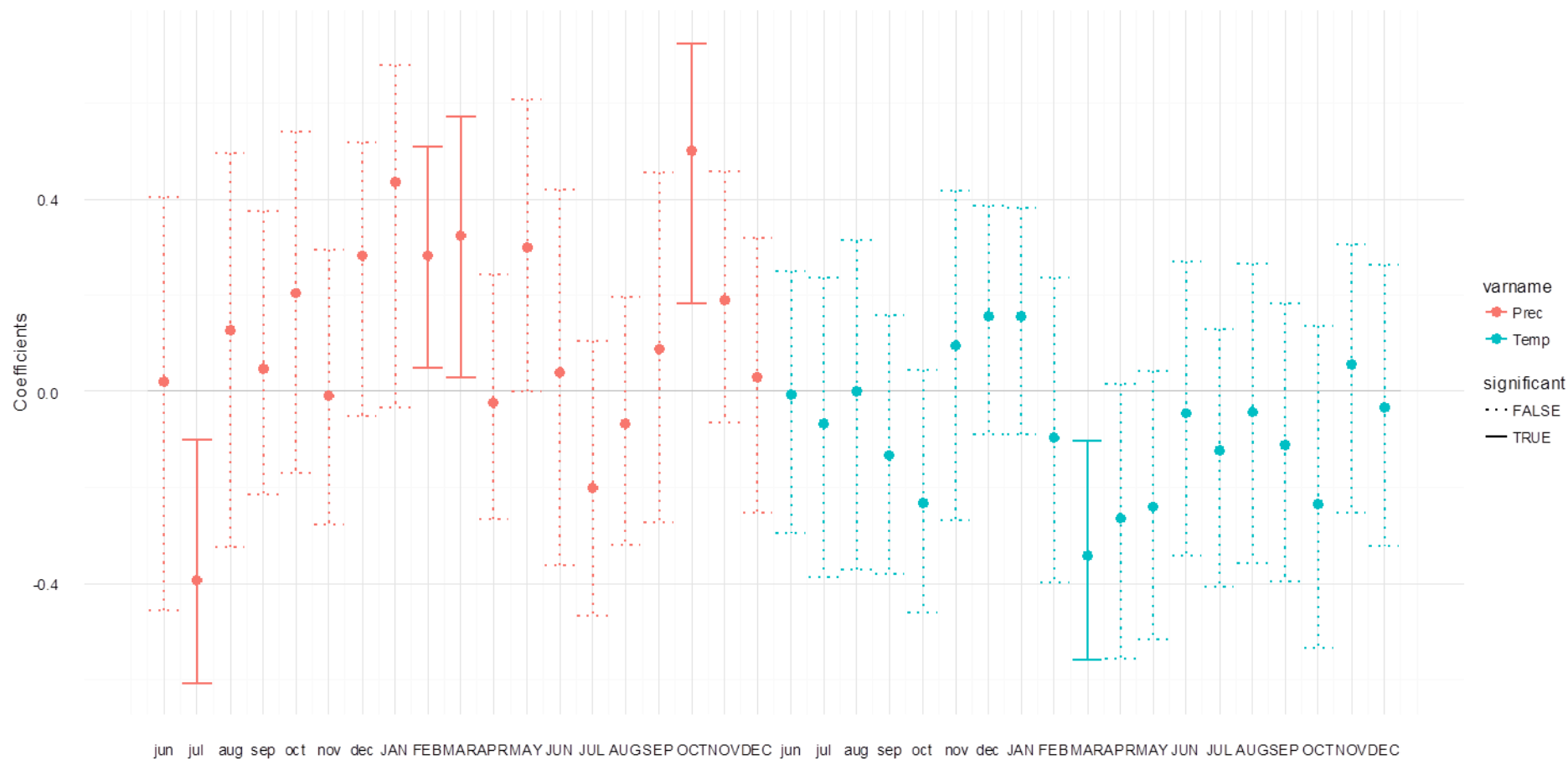


Figura 39 - SITO CRO. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di RW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$) sono indicate da un asterisco Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello



Figura 40 - SITO CRO. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di EW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

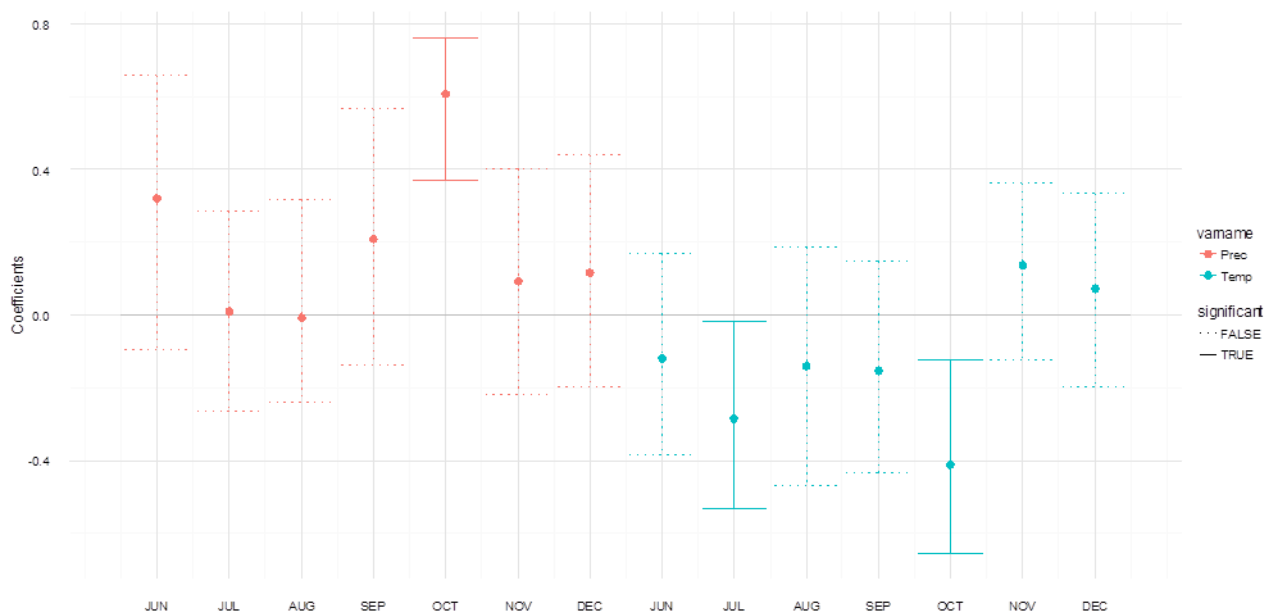


Figura 41 - SITO CRO. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di LW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

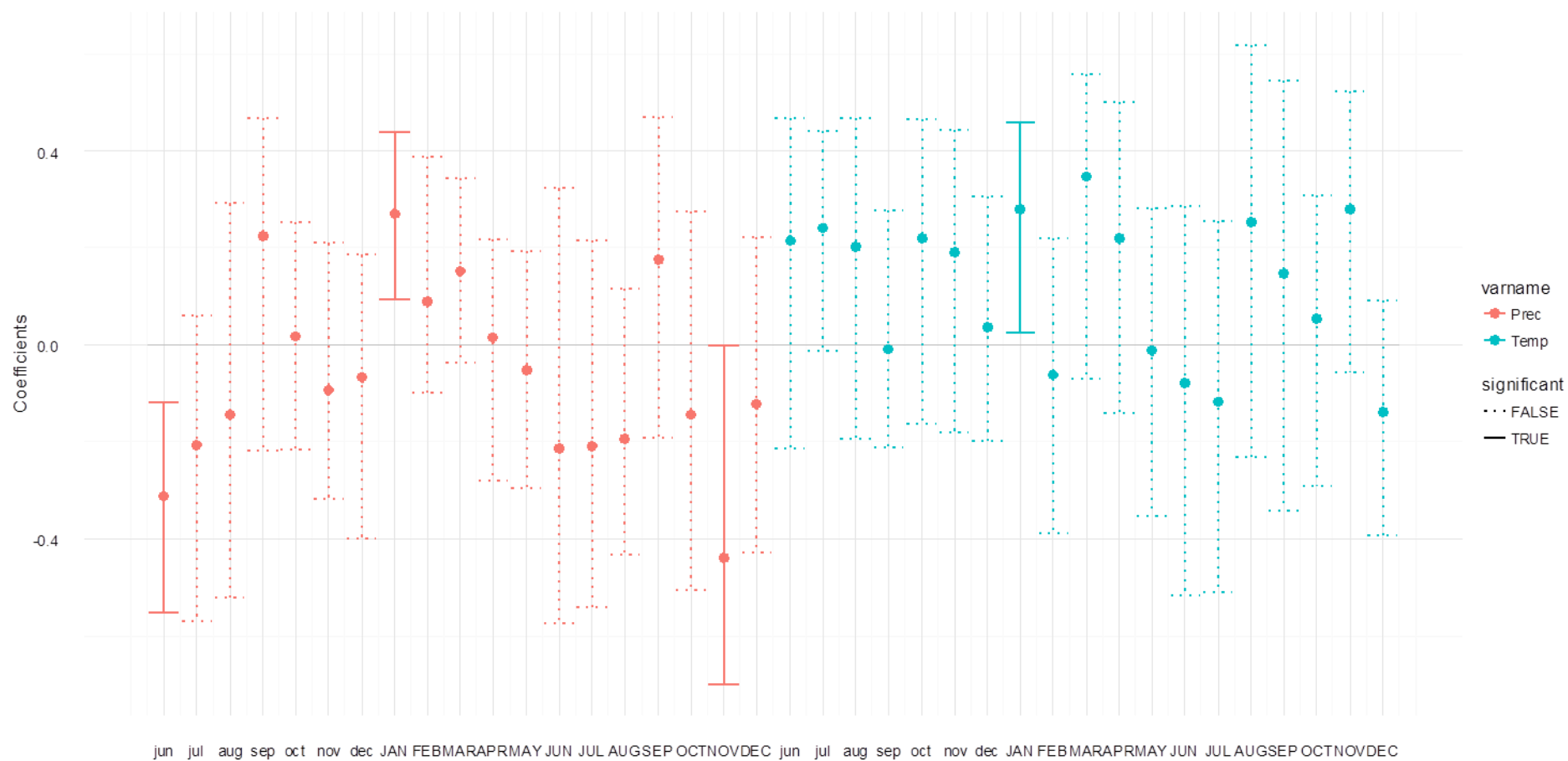


Figura 42 - SITO ZIR. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di RW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$) sono indicate da un asterisco Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

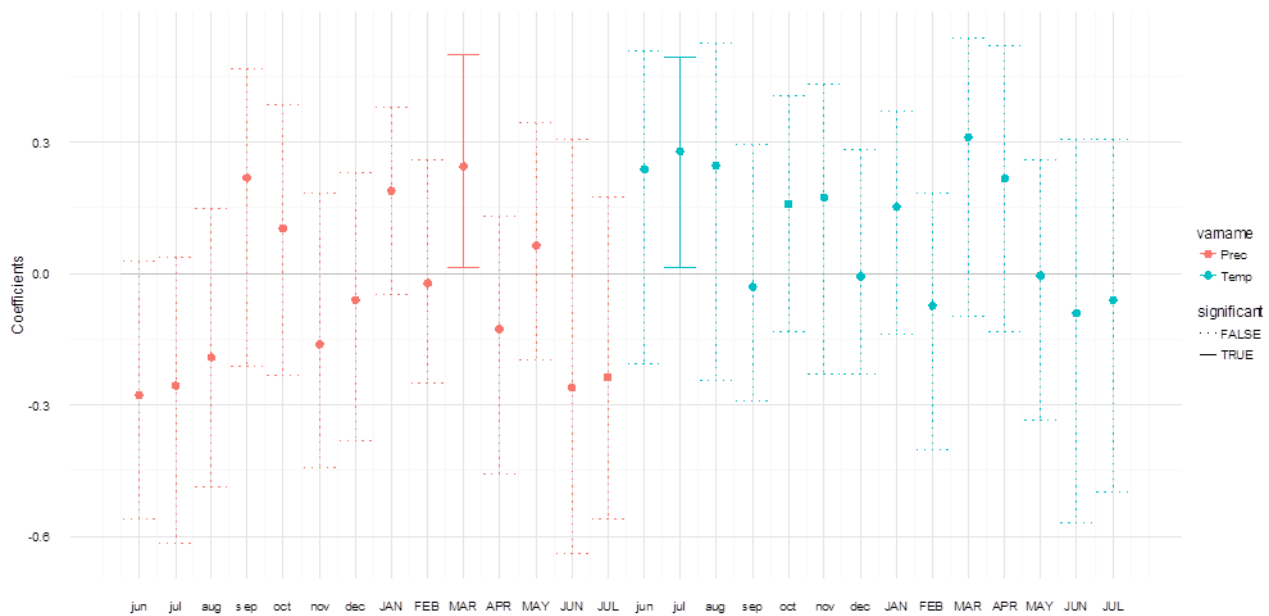


Figura 43 - SITO ZIR. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di EW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

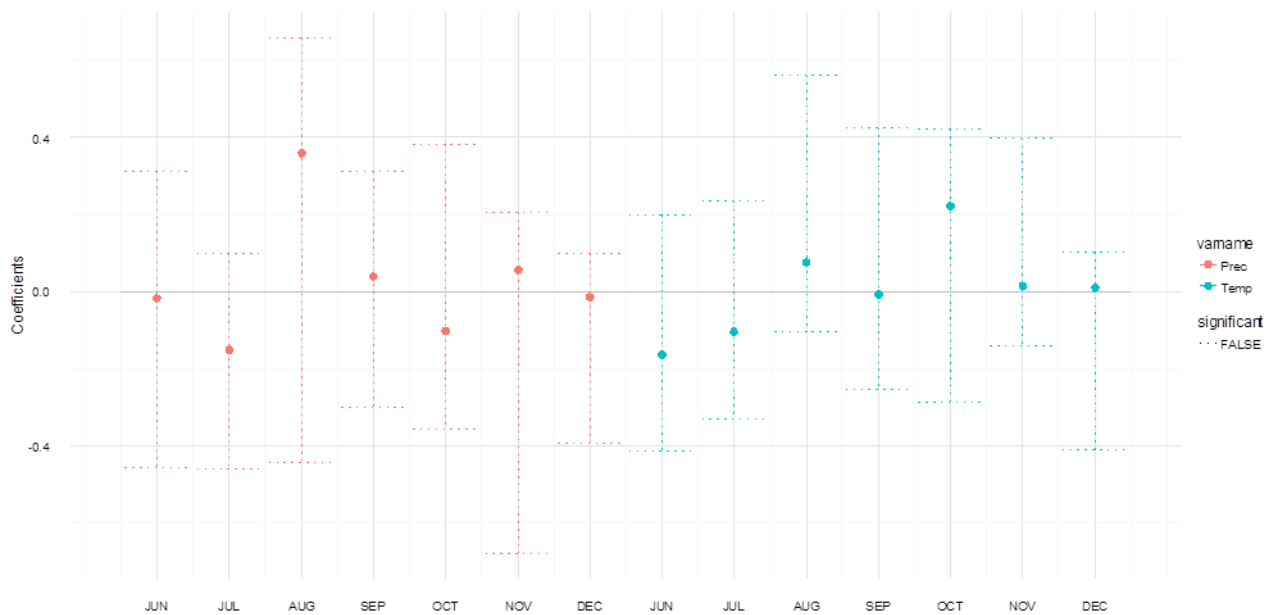


Figura 44 - SITO ZIR. Funzioni di correlazioni bootstrap tra cronologia di alta frequenza di LW e precipitazioni (Prec., rosso), temperature (Temp., blu) della rete di pino domestico per il periodo comune 1974-2014. Le barre con margine spesso evidenziano i mesi con coefficienti significativi ($p < 0.05$). Asse x: in minuscolo sono riportati i mesi precedenti l'anno di formazione dell'anello

Mean RW Chronology NIC

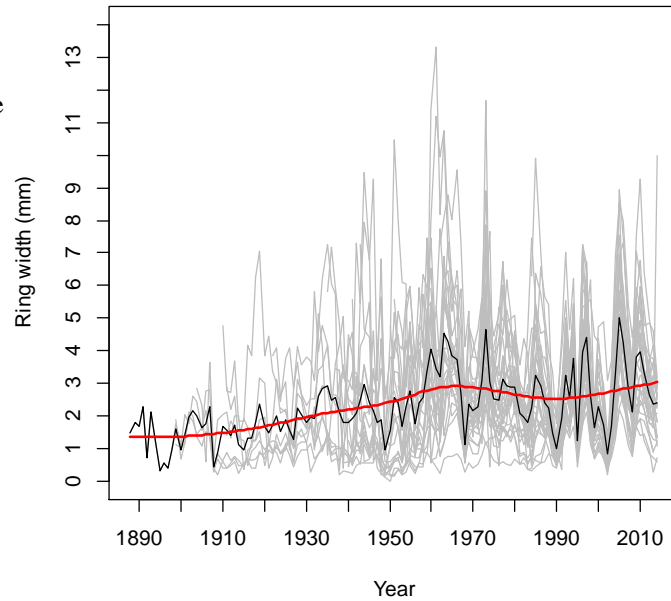


Figura - 45
Cronologia stagionale
media di Nicosia

Mean RW Chronology CAN

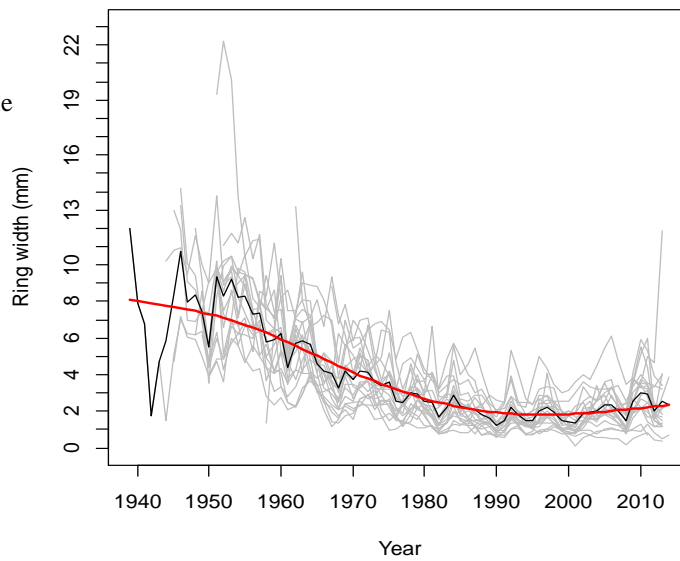


Figura - 47
Cronologia stagionale
media di Candelara

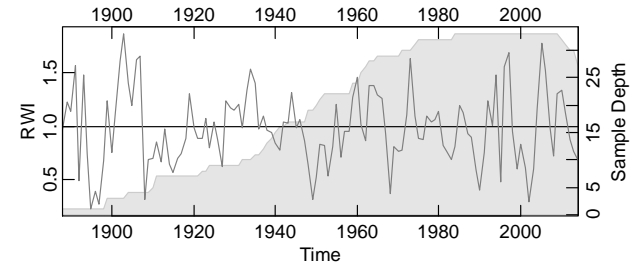


Figura - 46
Cronologia
standardizzata
(sopra); cronologia
indicizzata (sotto)
di Nicosia

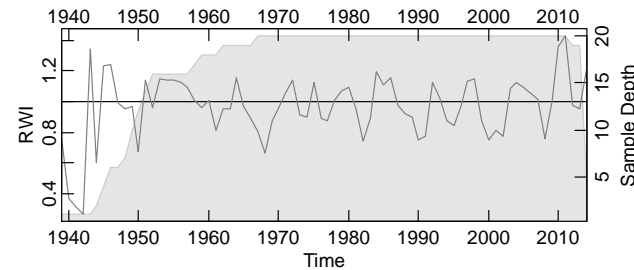
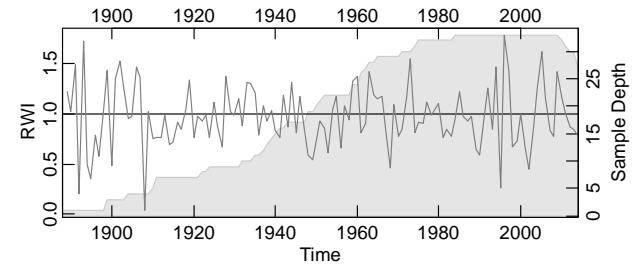


Figura - 48
Cronologia
standardizzata
(sopra); cronologia
indicizzata (sotto)
di Candelara

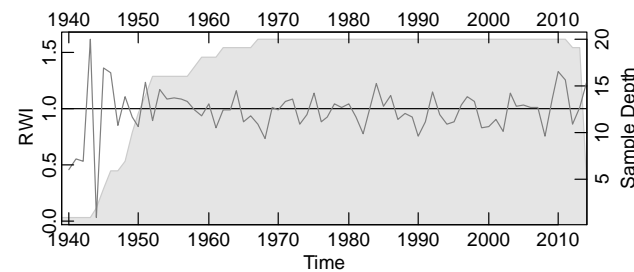


Figura - 49
Cronologia stagionale
media di Badiazza

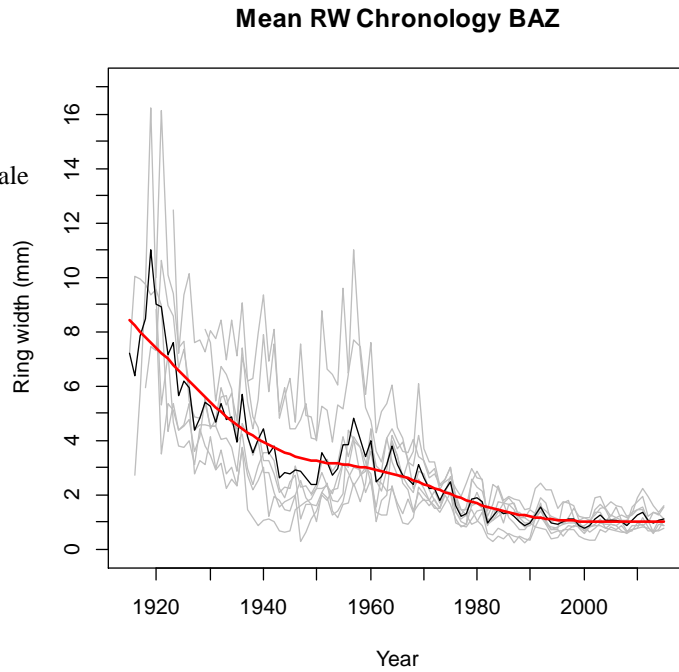


Figura - 51
Cronologia stagionale
media di Colamaio

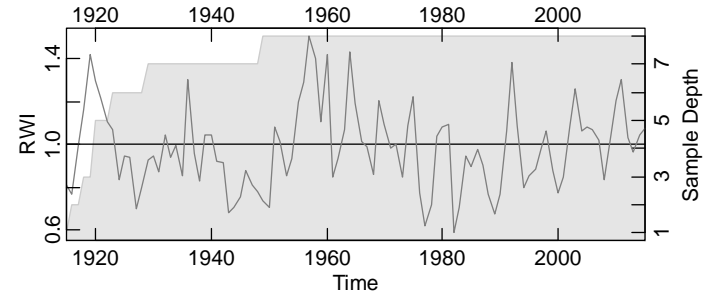
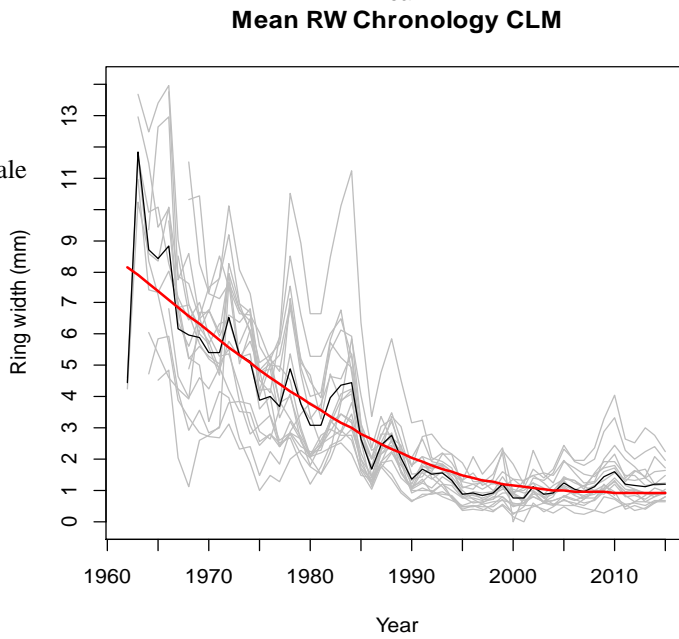


Figura - 50
Cronologia
standardizzata
(sopra); cronologia
indicizzata (sotto)
di Badiazza

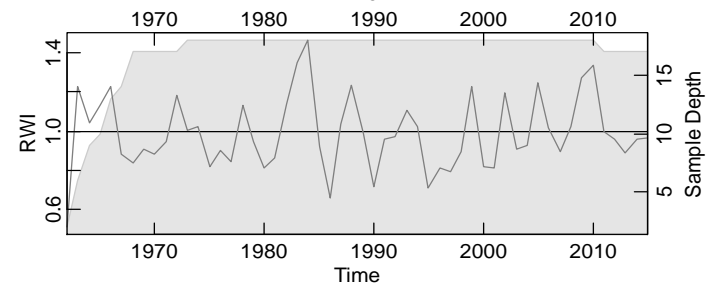
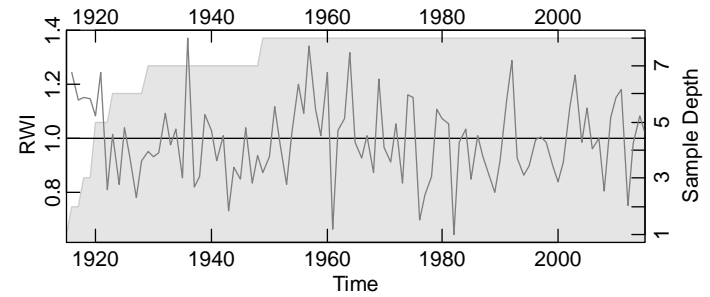
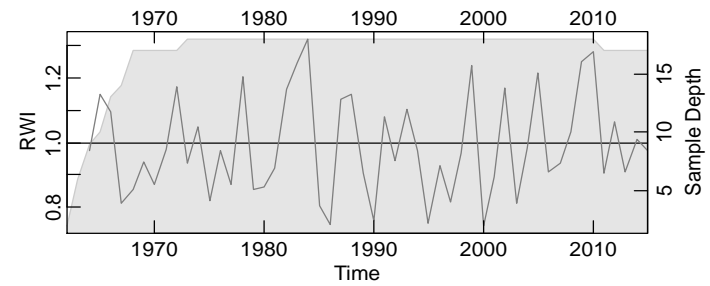


Figura - 52
Cronologia
standardizzata
(sopra); cronologia
indicizzata (sotto)
di Colamaio



Mean Ring Width Chronology CRO

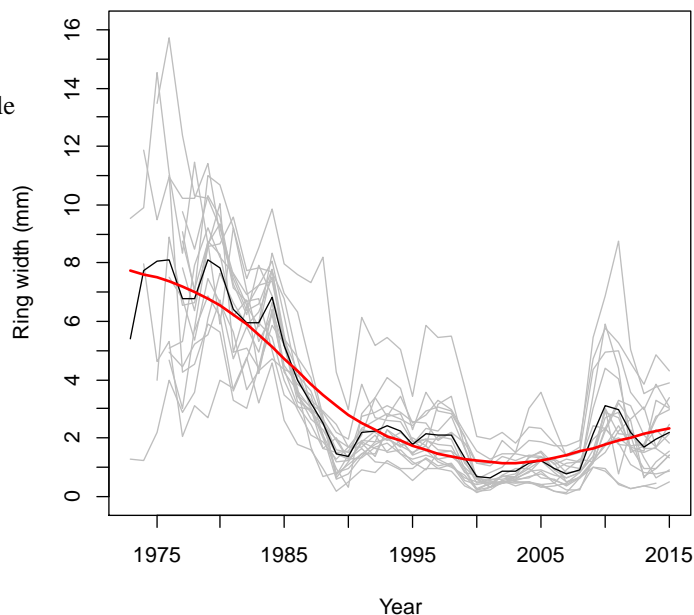


Figura - 53
Cronologia stagionale
media di Cropani

Mean Ring Width Chronology ZIR

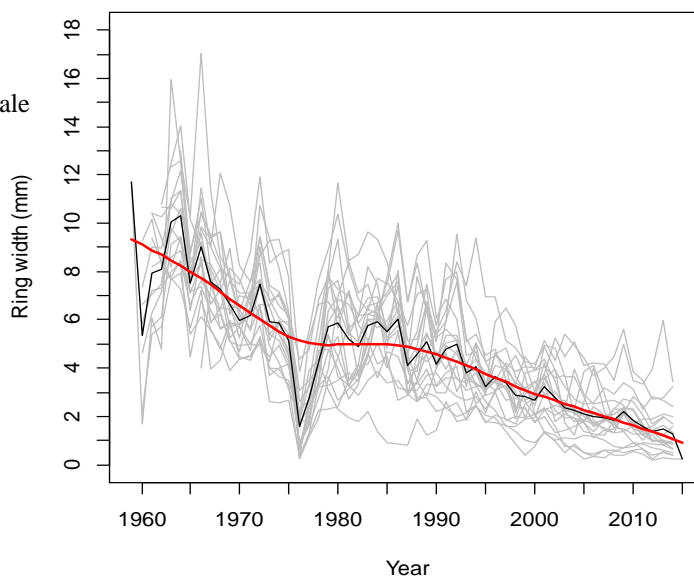


Figura - 55
Cronologia stagionale
media di Ziriò

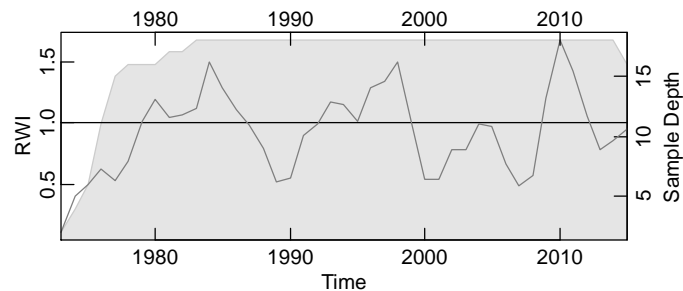


Figura - 54
Cronologia
standardizzata
(sopra); cronologia
indicizzata (sotto)
di Cropani

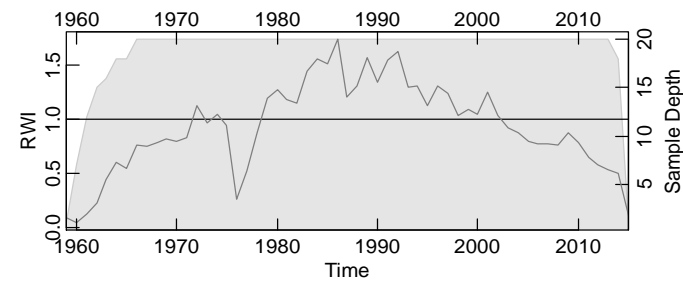
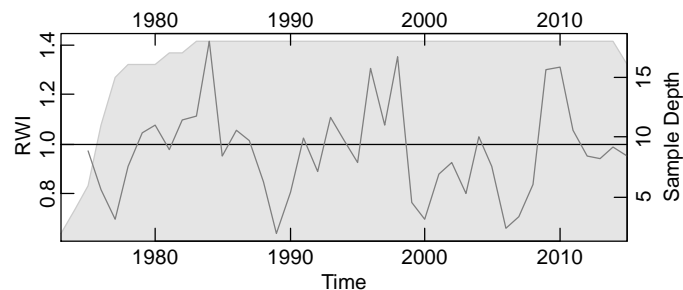


Figura - 56
Cronologia
standardizzata
(sopra); cronologia
indicizzata (sotto)
di Ziriò

Figura - 57
Spaghetti plot
di Nicosia

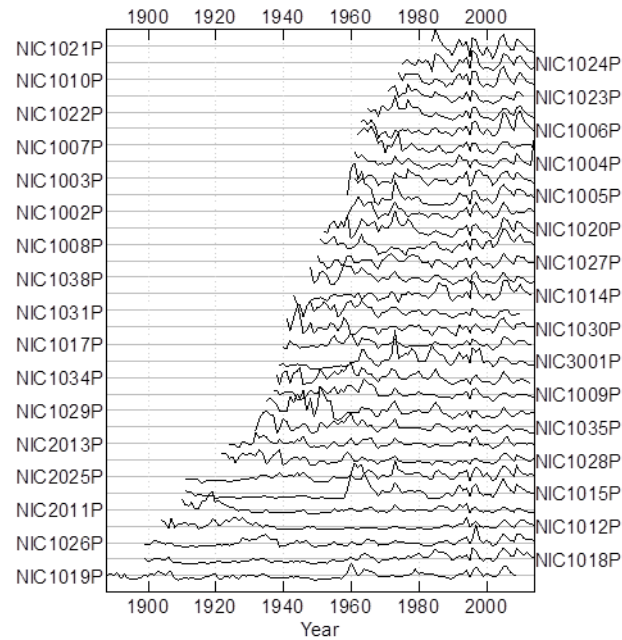


Figura - 59
Spaghetti plot
di Badiazza

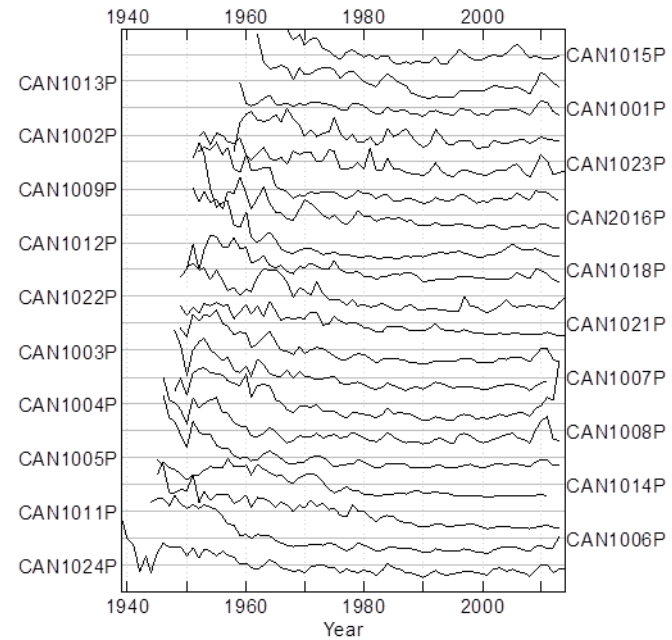
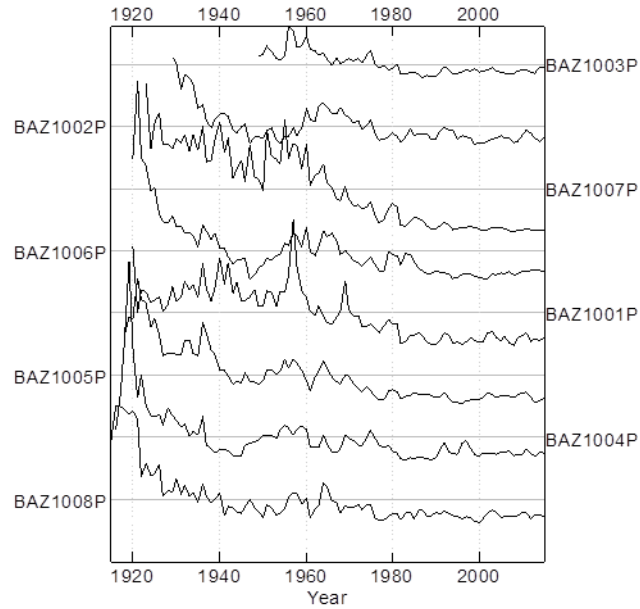


Figura - 58
Spaghetti plot
di Candelara

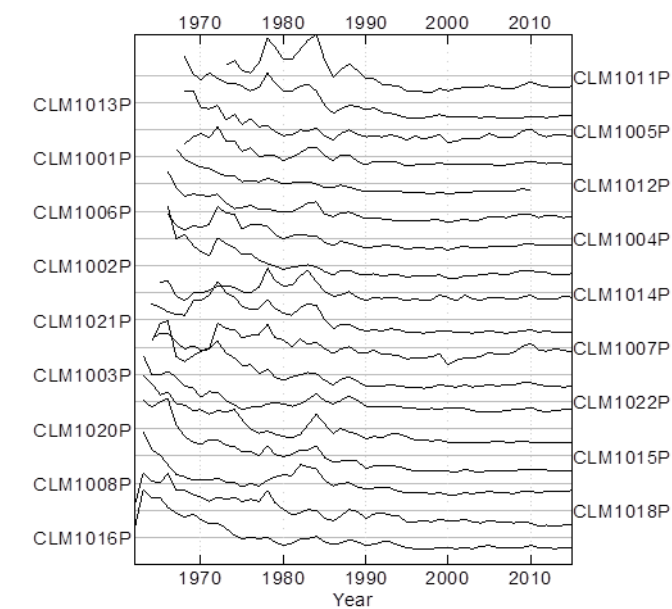


Figura - 60
Spaghetti plot
di Badiazza

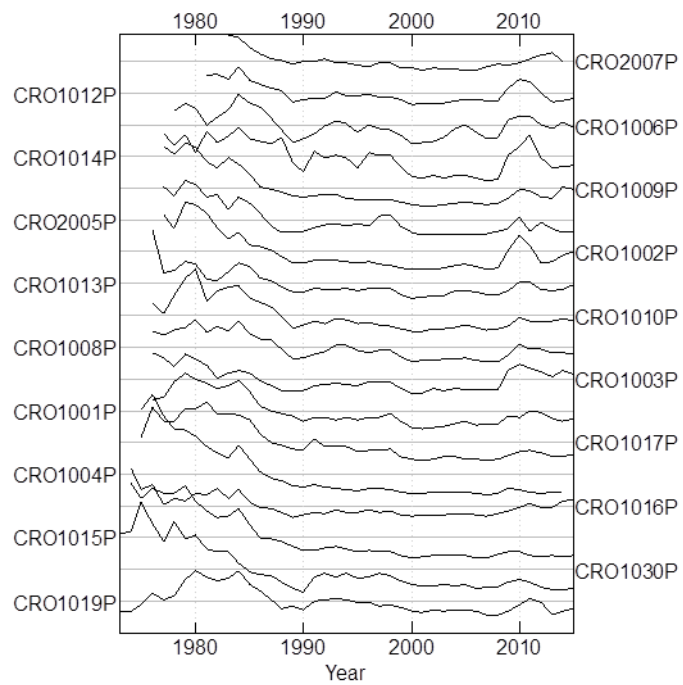


Figura - 61
Spaghetti plot di Cropani

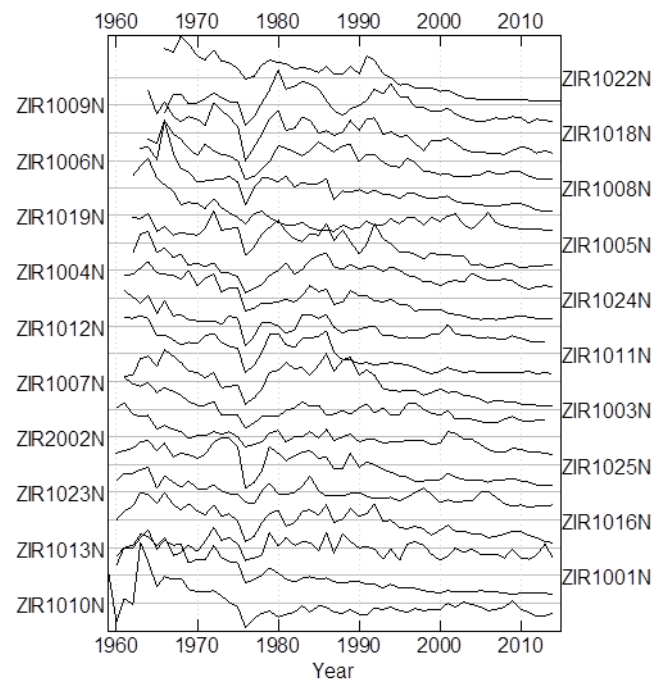
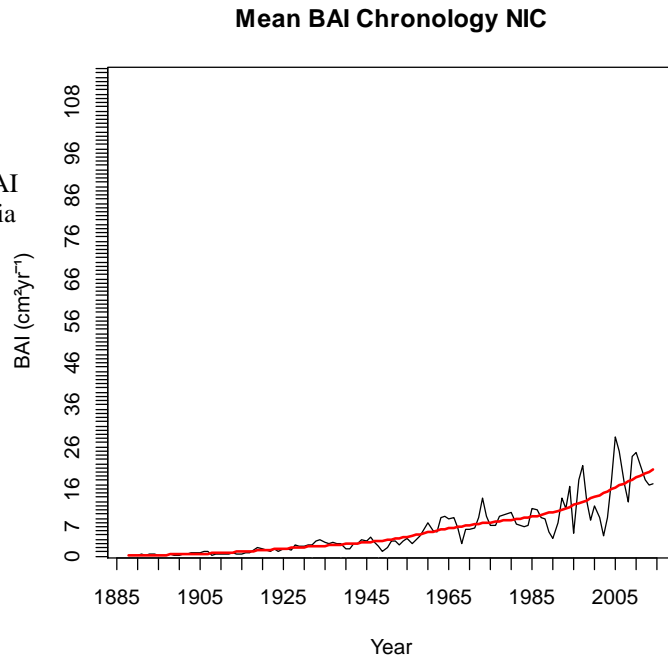


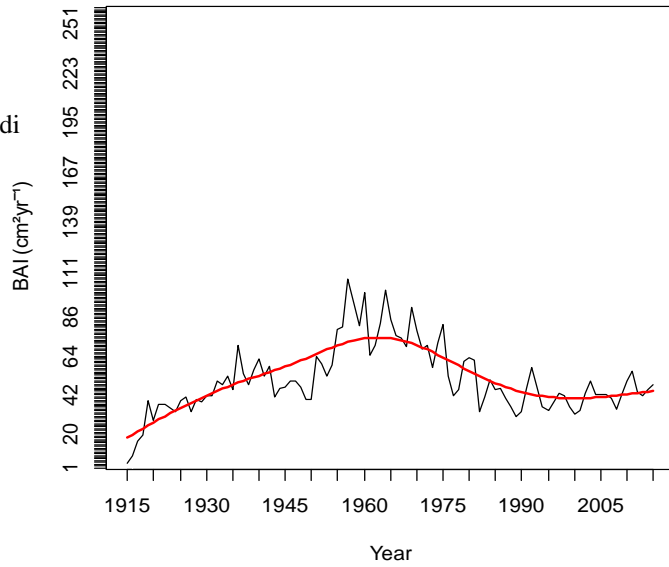
Figura - 62
Spaghetti plot di Ziriò

Figura - 63
Cronologia BAI
media di Nicosia

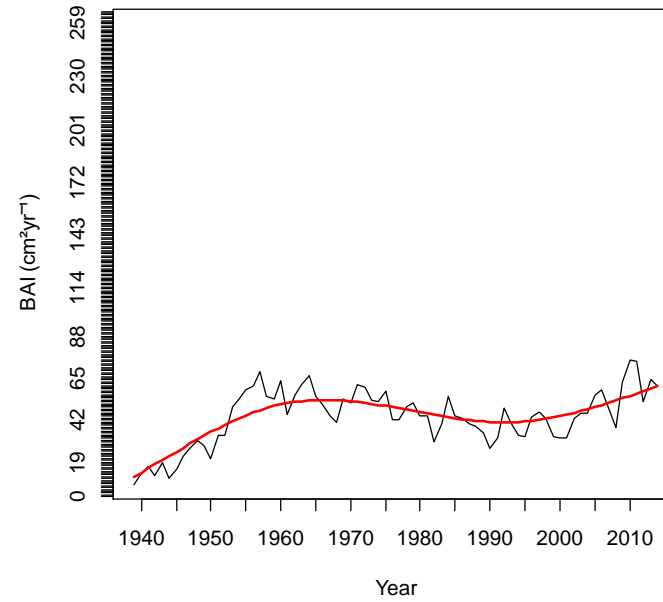


Mean BAI Chronology BAZ

Figura - 65
Cronologia BAI
media di
Badiazza



Mean BAI Chronology CAN



Mean BAI Chronology CLM

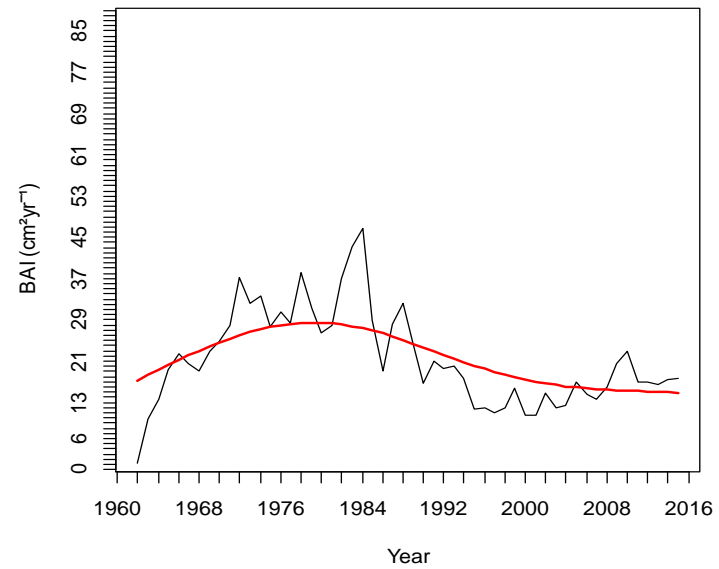


Figura - 64
Cronologia BAI
media di
Candelara

Figura - 66
Cronologia BAI
media di
Colamaio

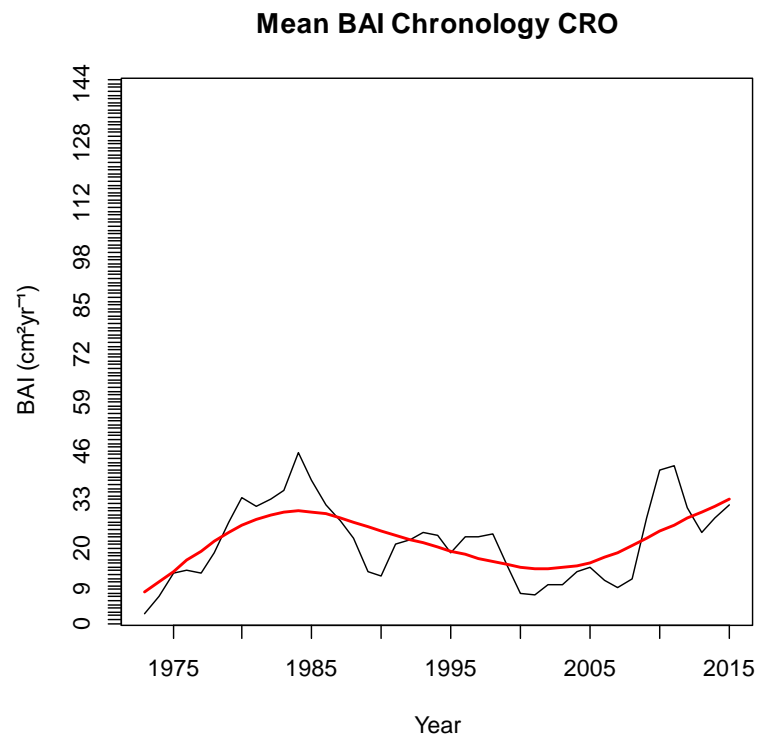


Figura - 67
Cronologia BAI media di Cropani

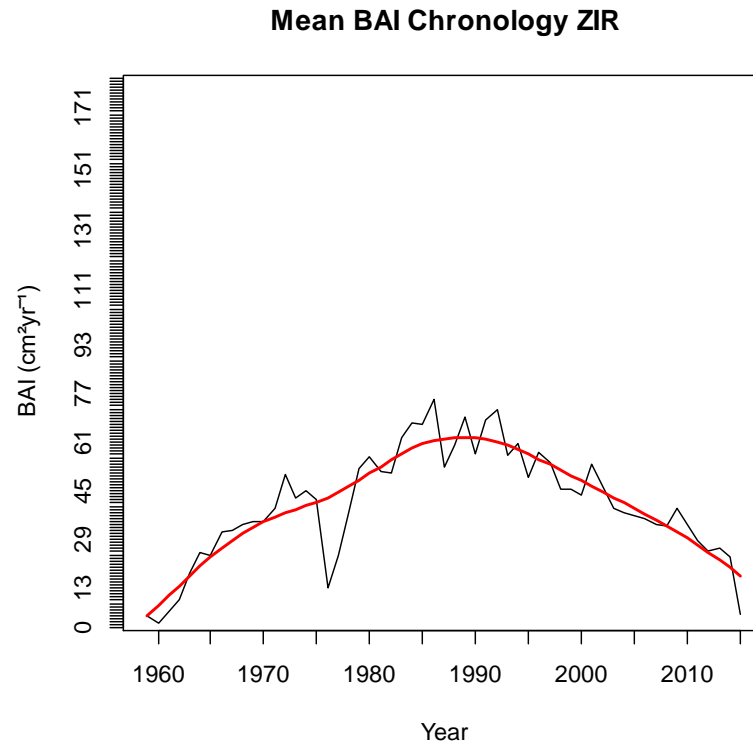


Figura - 68
Cronologia BAI media di Ziriò