

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO

DIPARTIMENTO DI TECNOLOGIE, INGEGNERIA E SCIENZE
DELL'AMBIENTE E DELLE FORESTE (DAF)

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA

Scienze e Tecnologie per la gestione ambientale e forestale - XVIII CICLO.

**STUDIO PER UNA CLASSIFICAZIONE
FITOCLIMATICA DELLE FAGGETE
ITALIANE SU BASE DENDROECOLOGICA**

SETTORE SCIENTIFICO-DISCIPLINARE AGR/05

Coordinatore: Prof. Gianluca Piovesan

Firma

Tutori: Prof. Bartolomeo Schirone

Firma.....

Prof. Gianluca Piovesan

Firma.....

Cotutore: Prof. Franco Biondi

Dottorando: Alfredo Di Filippo

Firma

INDICE

ABBREVIAZIONI USATE NEL TESTO	3
INTRODUZIONE	5
MATERIALI E METODI	10
La Rete Dendroecologica Nazionale	10
Il campionamento	11
La costruzione delle cronologie individuali e l'interdatazione.....	13
I parametri statistici dendrocronologici	15
La standardizzazione e la cronologia media stagionale	17
L'analisi multivariata.....	19
La calibrazione.....	23
I dati climatici	24
RISULTATI.....	26
DISCUSSIONE	60
CONCLUSIONI	73
BIBLIOGRAFIA	76
RINGRAZIAMENTI.....	82

ABBREVIAZIONI USATE NEL TESTO

A₁	Coefficiente di autocorrelazione di primo ordine
ACBT	Correlazione media fra alberi di un popolamento
ACWM	Correlazione media delle repliche con la media
HCA	Analisi gerarchica agglomerativa
LAR	Percentuale di anelli mancanti
MS	Sensitività media
MW	Ampiezza anulare media
PC1%	percentuale di varianza spiegata dalla prima componente principale estratta dalle repliche di un campione
PC1	Prima componente principale non ruotata
PC2	Seconda componente principale non ruotata
PC3	Terza componente principale non ruotata
PX1n	Prima componente principale ruotata delle faggete alpine
PX2n	Seconda componente principale ruotata delle faggete alpine
PX3n	Terza componente principale ruotata delle faggete alpine
PX1s	Prima componente principale ruotata delle faggete mediterranee
PX2s	Seconda componente principale ruotata delle faggete mediterranee
PX3s	Terza componente principale ruotata delle faggete mediterranee
PX4s	Quarta componente principale ruotata delle faggete mediterranee
PX5s	Quinta componente principale ruotata delle faggete mediterranee
PCA	Analisi delle componenti principali
SD	Deviazione standard

INTRODUZIONE

La dendroecologia si è affermata ormai da diversi anni come branca della dendrocronologia fondamentale nello studio delle dinamiche ambientali passate di ecosistemi forestali (Foster *et al.*, 1996). La misura dell'ampiezza degli anelli di crescita formati dal cambio cribro-vascolare degli alberi nel corso degli anni, che costituisce una serie dendrocronologica, costituisce un codice che, se ben decifrato, può raccontare la storia dell'albero e della foresta in cui esso vive (Swetnam *et al.*, 1999). In particolare, l'informazione anulare viene impiegata in studi ecologici secondo quattro modalità principali (Fritts e Swetnam, 1989): 1) datazione di eventi specifici testimoniati da particolari caratteristiche presenti all'interno della struttura degli anelli; 2) studio del regime di disturbo degli ecosistemi forestali associato a variazione nei tassi di crescita legati a cicli di aduggiamento/rilascio; 3) ricostruzione del clima o del regime idrologico mediante la variabilità delle ampiezze anulari; 4) identificazione delle dinamiche di popolazioni animali le cui fluttuazioni sono associate al clima.

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):

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

dove (G) rappresenta il trend di crescita legato all'aumento dell'età dell'albero e delle dimensioni del fusto; (C) il clima, con la sua variabilità di breve, medio e lungo periodo; (DI) i disturbi endogeni o localizzati, interessanti uno o pochi alberi (per esempio, morte per senescenza); ($D2$) i disturbi esogeni o diffusi, estesi a gran parte del popolamento (ad esempio, tempeste, valanghe, epidemie, incendi, attività antropiche) e, infine, (E) la variabilità interannuale non spiegata dai precedenti fattori. Le a associate a DI 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.

Una branca della dendroecologia che ha interessato i ricercatori fin dagli albori della scienza dendrocronologica è la dendroclimatologia, che utilizza la variabilità contenuta nelle serie dendrocronologiche per studiare il clima presente e passato. In particolare, l'albero è visto come una "finestra climatica" (Fritts, 1976), cioè come uno strumento capace di registrare le variazioni del clima attraverso la formazione di anelli più o meno grandi. Naturalmente non viene registrato tutto ciò che circonda l'albero, ma solo ciò che costituisce il cosiddetto "ambiente operativo", ossia 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 (C) contenuto all'interno delle serie dendrocronologiche può fornire importanti informazioni per comprendere quali siano i fattori climatici maggiormente responsabili della crescita.

In generale, la variabilità del clima sulla superficie terrestre ed i cambiamenti che parallelamente avvengono nella vegetazione hanno da sempre affascinato i naturalisti che, sin dagli inizi della fitogeografia, si sono preoccupati di ricercare il meccanismo mediante il quale il clima riesce a controllare la distribuzione delle specie vegetali e l'estensione geografica dei diversi biomi (Woodward, 1987). Lo stretto legame fra clima e vegetazione è stato di ispirazione e riferimento anche per alcune storiche classificazioni climatiche prodotte per il globo (p.e. Köppen in De Philippis, 1937). La fitoclimatologia, in particolare, è definita come quel campo della bioclimatologia volta ad indagare gli effetti del clima sulla vita delle piante (Pignatti, 1995). Generalmente gli approcci seguiti finora hanno portato ad investigare il legame tra clima e distribuzione di singoli *taxa* vegetali (Woodward, 1987), o le cause climatiche che sottendono la distribuzione geografica dei principali biomi della Terra e della vegetazione in essi contenuta (Walter, 1985); in altri casi ci si è concentrati sullo studio fitosociologico della vegetazione, interpretando le variazioni osservate mediante indici bioclimatici rappresentativi delle condizioni climatiche locali (Rivas-Martinez, 1996).

In Italia la prima proposta di una classificazione fitoclimatica si è avuta nel 1916 ad opera del Pavari che, riadattando il sistema prodotto precedentemente da Mayr, identificava diverse fasce altitudinali di vegetazione, dette “zone”, per mezzo della specie arborea dominante (*Lauretum*, *Castanetum*, *Fagetum*, *Picetum*, *Alpinetum*), associando a ciascuna di esse delle soglie climatiche essenzialmente termiche (De Philippis, 1937). Ciascuna zona poteva essere divisa in “sottozone”, calda o fredda in funzione di ulteriori soglie termiche, e “tipi”, sulla base del regime pluviometrico e della presenza di siccità estiva. Le successive classificazioni hanno preso spunto dalle conoscenze della vegetazione ottenute grazie al metodo fitosociologico per impostare una divisione in zone e fasce fitoclimatiche del nostro Paese: in particolare Pignatti (1979) ha proposto di utilizzare il termine “zona” per unità fitoclimatiche elementari identificate secondo variazioni nel senso della latitudine e il termine “fascia” per unità fitoclimatiche elementari identificate secondo variazioni nel senso dell’altitudine. In questo contesto l’autore ha distinto per l’Italia zone e fasce fitoclimatiche considerando sia le conoscenze fitosociologiche che la fisionomia della vegetazione, ponendo particolare enfasi sul concetto di vegetazione potenziale (Pignatti, 1979). Così facendo si è ottenuta una zonazione della vegetazione del nostro Paese, che ha diviso l’Italia in due zone fitoclimatiche, una mediterranea ed una medioeuropea, e che ha specificato per ognuna di esse una serie di fasce fitoclimatiche dalla pianura fino ai limiti della vegetazione. Un’altro approccio di questo tipo è quello di Blasi (1994) che, riprendendo in maniera simile a Rivas-Martinez, associa alla descrizione fitosociologica della vegetazione degli indici climatici, i cui valori sintetizzano le caratteristiche bioclimatiche dell’area esaminata; anche in questo caso il territorio italiano viene diviso in due zone, una temperata ed una mediterranea, ciascuna suddivisa in diverse fasce altitudinali.

Da quanto finora riportato risulta che l’approccio fitoclimatico classico è stato basato sull’osservazione delle caratteristiche della vegetazione esistente, a cui si associava uno studio della componente climatica con il fine di spiegare le differenze osservate. Negli ultimi anni, però, sono emerse nuove idee che si sono dimostrate di aiuto per inquadrare lo studio dei rapporti pianta – clima come, ad esempio, il concetto di Tipo Funzionale Vegetale (per esempio, Bugmann, 1996): introdotto per indicare un insieme di specie vegetali caratterizzate da simile funzionalità, ha portato

a classificare differenti *taxa* in funzione del loro comportamento nei confronti del clima, in base a differenti attributi vegetali come la fisionomia, il tipo biologico o la fisiologia. Scopo principale di questi studi è quello di individuare gruppi di specie vegetali che dimostrino una simile risposta al clima, in modo da poter diagnosticare i potenziali impatti dei cambiamenti climatici sulla vegetazione del nostro pianeta. Una recente estensione del concetto di Tipo Funzionale è quello di Gruppo di Affinità Bioclimatica (Laurent *et al.*, 2004), in cui specie diverse sono state legate sulla base della loro morfologia, fenologia e, soprattutto, delle loro esigenze climatiche; quest'ultime, desunte dal loro areale di distribuzione, sono servite ad individuare insiemi omogenei di specie con simili esigenze autoecologiche.

In questo studio sono stati analizzati la variabilità della crescita anulare degli alberi ed il segnale climatico che ne è responsabile come metodo alternativo per lo studio fitoclimatico della vegetazione forestale. Questo approccio può portare a definire i Tipi Funzionali Vegetali considerando la differente risposta al clima che hanno specie arboree diverse all'interno dello stesso ambiente (Cook *et al.*, 2001). Allo stesso modo, lo studio della variabilità spaziale ed altitudinale del rapporto clima-accrescimento può consentire di identificare gradienti geografici nelle esigenze climatiche di una stessa specie e/o di specie diverse (per esempio, Biondi, 1992; Watson e Luckman, 2002; Mäkinen *et al.*, 2002; Linderholm *et al.*, 2003). In particolare, qui noi abbiamo voluto identificare le principali modalità di crescita arborea che accomunano popolamenti posti geograficamente distanti ed a quote diverse per metterle in relazione al segnale climatico che le condiziona; così popolamenti forestali distinti sono stati raggruppati in **zone** e **fasce dendroclimatiche**, ossia unità fitoclimatiche rilevate in base al segnale climatico che domina la crescita arborea. I gruppi identificati sulla base dell'omogeneità del segnale possono quindi essere utilizzati per dividere il territorio studiato in aree fitoclimaticamente omogenee (Feliksik e Wilczyński, 2004; Piovesan *et al.*, 2005a) e studiarne i relativi rapporti spaziali ed altitudinali.

In confronto con la metodologia convenzionale, in cui le osservazioni vegetazionali rimangono separate da quelle climatiche ed è il ricercatore che mette in relazione le variazioni osservate nella vegetazione a determinati indici bioclimatici (termici, pluviometrici, di evapotraspirazione, di continentalità/oceanicità), in quella

dendroclimatica è l'albero che registra direttamente il clima nella variabilità della propria serie anulare ed il ricercatore non deve far altro che affiancare per confronto le serie climatiche per far emergere i fattori climatici che ne sono responsabili. Il rapporto clima-accrescimento diventa quindi il nodo centrale di questa classificazione fitoclimatica in cui l'albero costituisce, al tempo stesso, l'espressione climatica della vegetazione e lo strumento di misura del clima. In questo senso si può affermare che la classificazione dendroclimatica è, in un certo senso, "fatta con gli occhi dell'albero".

In questo lavoro è stato utilizzato il faggio (*Fagus sylvatica* L.), che già da alcuni anni è oggetto di indagini dendroecologiche nel nostro Paese (Biondi, 1992 e 1993; Biondi e Visani 1996; Bernabei *et al.*, 1996; Bernabei e Piovesan, 1997; Schirone *et al.*, 2002; Piovesan *et al.*, 2005a) ed in Europa (Eckstein e Frisse, 1982; Dittmar *et al.*, 2003; Lebourgeois *et al.*, 2005). Questa specie ha dimostrato notevole versatilità in questo tipo di studi grazie alla fedeltà con cui registra le variazioni del clima (Schirone *et al.*, 2002), ma anche alla notevole longevità che gli consente di raggiungere i 4-500 anni (Piovesan *et al.*, 2005b): non è difficile, infatti, rinvenire popolamenti di 200 anni o più. Ai fini dello studio fitoclimatico delle faggete italiane è stata fondamentale anche la grande diffusione che questa specie ha sul nostro territorio nazionale, visto che riesce a coprire con formazioni forestali tutte le regioni tranne la Sardegna, estendendosi su di un intervallo altitudinale che va dalla bassa collina fino, in alcuni casi, ai limiti della vegetazione forestale (Hofmann, 1991). In particolare le nostre analisi si sono andate ad inserire nel contesto della Rete Dendroecologica Nazionale (Schirone *et al.*, 2002), sviluppata dal Laboratorio di Dendroecologia del Dipartimento di tecnologie, ingegneria e scienze dell'Ambiente e delle Foreste (DAF) dell'Università degli Studi della Tuscia, costituita da questa specie e, in misura minore, da altri *taxa*.

MATERIALI E METODI

La Rete Dendroecologica Nazionale

Il presente studio è fondato su una rete di studio composta da 39 popolamenti forestali contenenti faggio (*Fagus sylvatica* L.), allo stato puro o associato ad altre specie arboree, che si estende dalle Alpi a Nord fino alla Sicilia Settentrionale a Sud, in un'area compresa tra i 37° 52' ed i 46° 34' N di latitudine e tra i 9° 19' ed i 16° 13' E di longitudine (Figura 1). In ogni area interessata dai rilevamenti si è cercato di campionare popolamenti posti a quote diverse in modo da evidenziare in che modo varia la crescita della specie con l'altitudine: per questo motivo la nostra banca dati presenta un notevole campo di variazione anche per quel che riguarda l'estensione altitudinale delle stazioni campionate, che oscilla tra i 250 ed i 2000 m s.l.m. (Tabella 1).

I dati utilizzati sono il risultato di quasi trenta anni di studi dendrocronologici in Italia ad opera di diversi autori (Tabella 1): la maggior parte di essi fanno parte della Banca Dati del Laboratorio di Dendroecologia dell'Università degli Studi della Tuscia, mentre nove dei popolamenti riportati sono stati studiati da Franco Biondi della University of Nevada (Biondi, 1992) ed uno da Roberta Castorina dell'Università di Catania (Castorina, 2005). Il nucleo originario della Rete è localizzato in Italia Centrale (Lazio - Abruzzo), che infatti rappresenta l'area maggiormente campionata (Figura 1), su cui sono stati effettuate in passato le prime indagini dendroclimatiche (Schirone *et al.*, 2002)

I dati raccolti durante il triennio del Corso di Dottorato hanno contribuito non solo ad intensificare o aggiornare la banca dati preesistente laddove necessario (Oriolo Romano, Monte Fogliano, Valle Cervara alta, Monte Terminillo), ma anche a colmare parzialmente le aree non ancora coperte, come le Alpi e Prealpi Carniche e Giulie in Friuli - Venezia Giulia (nove stazioni) o l'Aspromonte (quattro stazioni di faggio ed una di farnetto) e le Madonie (una stazione) nel Mezzogiorno.

Il campionamento

Il campionamento ha prediletto quelle foreste in cui fossero presenti alberi sufficientemente vecchi ed in cui fosse assente o minimo il disturbo legato all'attività umana. Per questi motivi si è cercato di reperire sul territorio nazionale il maggior numero di foreste vetuste, comunità arboree che hanno raggiunto gli ultimi stadi di sviluppo strutturale e che, oltre ad essere caratterizzate da individui che possono raggiungere i limiti di longevità della specie (e quindi gli alberi di età maggiore), non

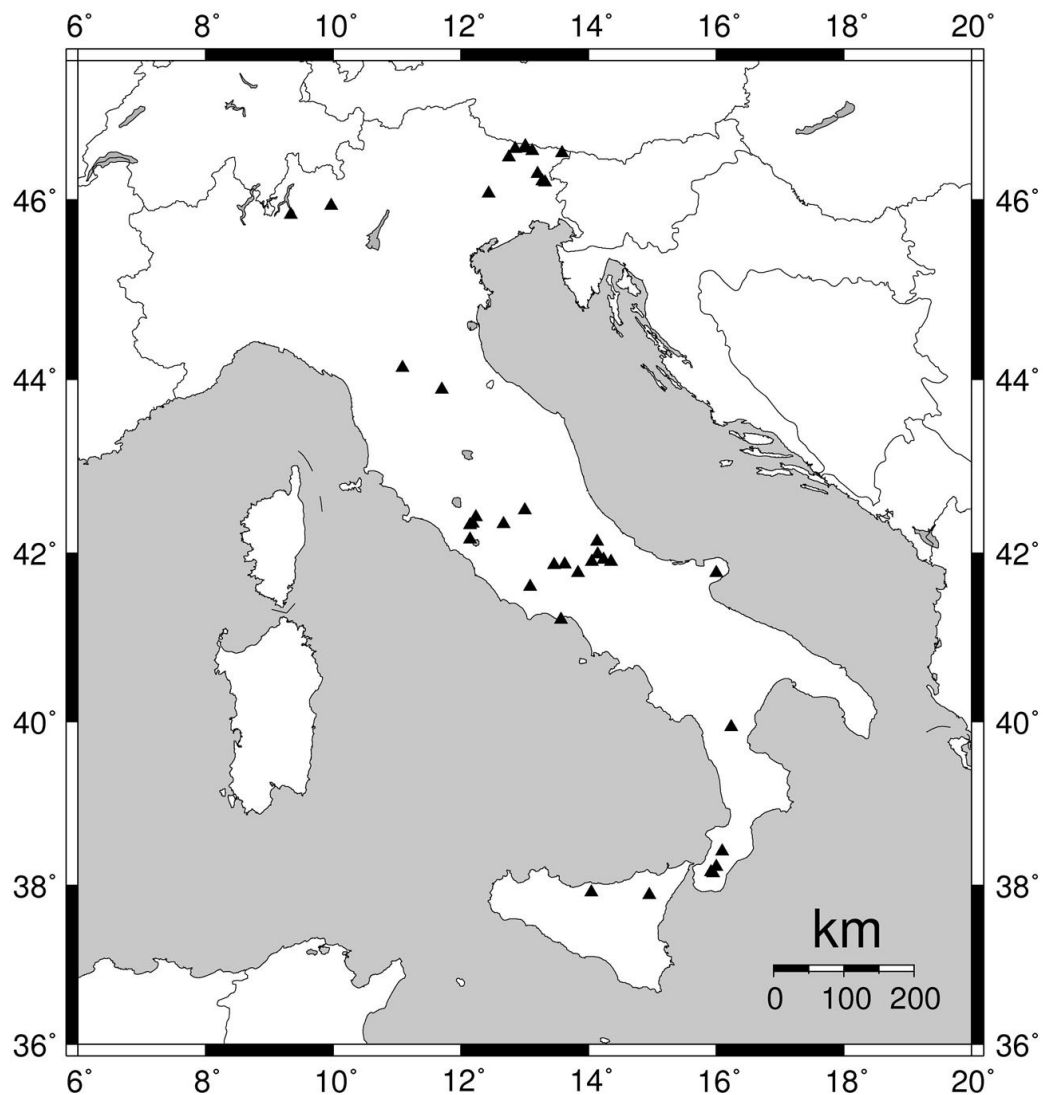


Figura 1. La localizzazione dei 39 popolamenti contenenti faggio utilizzati in questo studio.

sono state interessate da disturbi antropici per un periodo di tempo sufficiente lungo a ristabilire in esse il predominio delle dinamiche naturali (Di Filippo, 2005). Tranne

questi rari esempi di naturalità, però, nella maggior parte dei casi le faggete italiane sono state alterate più o meno pesantemente dalla mano dell'uomo e, di conseguenza, spesso ci si è trovati a campionare anche boschi relativamente giovani (La Motta, Nimis, Pechinie) o cedui invecchiati (Montalto 1900 m); in queste situazioni si è proceduto al campionamento, purché gli ecosistemi presentassero un aspetto forestale non eccessivamente degradato e gli alberi avessero un'età tale da poter sviluppare cronologie anulari utili per le elaborazioni statistiche.

Nel complesso, si sta cercando di creare mediante nuovi campionamenti una rete diffusa quanto più omogeneamente sul territorio nazionale, che tenga in considerazione il gradiente altitudinale su cui si estende la specie in ognuna delle aree indagate.

Una volta selezionato un popolamento, si è proceduto a carotare per mezzo della trivella di Pressler 20-24 individui scelti in quanto miglior compromesso tra età ed integrità del fusto: riguardo all'età, oltre all'informazione portata dalle dimensioni dell'albero, sono stati presi in considerazione anche altri caratteri legati alla senescenza, come lo stato della chioma e dei rami, oppure le caratteristiche della corteccia. In individui annosi la presenza della carie del legno è uno dei maggiori limiti negli studi dendrocronologici, non solo perché causa la perdita di dati preziosi nella parte più vecchia del fusto, ma anche per l'impedimento tecnico che provoca al movimento della trivella.

All'interno di ciascun popolamento, è stata estratta una carota per individuo da alberi dominanti o codominanti, in modo da minimizzare la presenza di anelli formati durante le fasi di aduggiamento, contenenti scarsa informazione climatica (Piutti e Cescatti, 1997); inoltre, gli alberi campionati ricadevano tutti sufficientemente lontano dal limite del bosco per evitare il disturbo dovuto all'effetto margine. La replicazione del campione costituisce uno dei punti cruciali dell'analisi dendroecologica ed il numero di campioni utilizzato è considerato uno standard negli studi dendroclimatici (Cook e Kairiukstis, 1990); nella realtà dei fatti, però, non è stato possibile ottenere una replicazione omogenea per tutte le stazioni della Rete, sia perché diversi autori in diversi momenti hanno avuto esigenze di campionamento diverse in rapporto allo studio che stavano effettuando, sia perché in alcuni casi c'è

stato un vincolo al prelievo – come ad esempio nel caso nella limitazione imposta dai proprietari di boschi di proprietà privata (La Motta, Pechinie, Nimis).

Tabella 1. Caratteristiche stazionali e strutturali dei popolamenti campionati.

SITO	ID CATRAS	CODICE SITO	LATITUDINE (°)	LONGITUDINE (°)	QUOTA (m)	PENDENZA (%)	D _{1.3} (cm)	H (m)	AUTORE
Badia Prataglia	-	BAD	43.8833	11.7000	1150 (991-1316)	20-80	43-136	30	Franco Biondi
Bosco S. Antonio	-	BSA	41.9000	14.0500	1350 (1320-1375)	0-20	59-123	30	Franco Biondi
Cansiglio	-	CAN	46.0667	12.4333	1200 (1160-1265)	40-48	58-63	28	Franco Biondi
Cinquefrondi	8090000F	CFR	38.4180	16.0940	550 (500-600)	20-60	38-83	35	DAF
Monte Cimino	9030000F	CIM	42.4181	12.2350	950	0-35	35-100	41	DAF
Cleulis	8020000F	CLE	46.5584	13.0006	1050 (975-1125)	20-60	35-70	24	DAF
Etna	8006002F	ETN	37.8767	14.9478	1625 (1400-1850)	-	70	25	Roberta Castorina
Monte Fogliano	8028000F	FOG	42.3285	12.1440	750	5-30	45-95	35	DAF
Foresta Umbra	8007001F	FOU	41.7667	16.0000	750 (720-770)	0-15	108-151	31	Franco Biondi
Gracco	8016000F	GRA	46.5514	12.8519	825 (750-900)	70-90	42-72	21	DAF
Lateis	8015000F	LAT	46.4594	12.7489	1450 (1370-1530)	75-110	33-70	28	DAF
Monti Lepini	8007000F	LEP	41.6047	13.0839	1250	20-35	44-65	30	DAF
Madonie	8094000F	MAD	37.9064	14.0397	1775 (1750-1800)	30-70	30-66	25	DAF
Majella	-	MAI	42.1333	14.1333	1150 (1110-1190)	65-70	62-64	13	DAF
Monte Barro	-	MBA	45.8333	9.3333	750 (750-765)	22-71	67-126	35	Franco Biondi
Montalto 1600	8092000F	MO1	38.1483	15.9475	1600	20-40	80	35	DAF
Montalto 1900	8093000F	MO2	38.1598	15.9194	1900 (1850-1950)	40-60	21-77	20	DAF
Morino	9023000F	MOR	41.8639	13.4581	1250	0-50	40-70	37	DAF
La Motta	8024000F	MOT	46.1886	13.3153	250	10-40	39-65	20	DAF
Monte Scoperta	-	MSC	44.1333	11.0833	1200 (1185-1215)	44-68	40-63	21	Franco Biondi
Nimis	8012002F	NIM	46.2006	13.2769	560	45	34-65	27	DAF
Oriolo Romano	8067000F	ORI	42.1583	12.1392	450 (400-500)	5-45	45-90	35	DAF
Paularo	8018000F	PAU	46.5297	13.1172	1400 (1275-1500)	70-90	52-100	27	DAF
Piani di Zervò	8091000F	PDZ	38.2272	16.0021	1200	0-20	45-80	36	DAF
Pechinie	8022000F	PEC	46.2807	13.2027	670	10-30	36-62	20	DAF
Monte Petrella	8001001F	PET	41.2178	13.5681	1375	0-30	41-73	27	DAF
Monti Pizi	9004000F	PIZ	41.9214	14.2372	1400 (1350-1450)	0-60	40-83	30	DAF
Parco d'Abruzzo	-	PNA	41.7667	13.8333	1600 (1290-1895)	0-53	69-261	34	Franco Biondi
Parco del Pollino	-	PPO	39.9333	16.2333	1900 (1800-2000)	20-40	74-121	25	Franco Biondi
Rosello	8013001F	ROS	41.9008	14.3497	1000	10-55	30-61	28	DAF
Sabina	8141501F	SAB	42.3383	12.6697	1050	5-40	40-65	32	DAF
Monte Terminillo	8041001F	TER	42.5000	13.0000	1685 (1550-1820)	5-60	41-83	32	DAF
Timau	8017001F	TIM	46.5817	13.005	1100 (825-1500)	70-90	40-95	25	DAF
Tocchito	8006000F	TOC	41.9842	14.1381	1600	5-30	41-71	24	DAF
Tre Confini	8019000F	TRE	46.5039	13.5831	1100	20-60	35-55	30	DAF
Valzurio	-	VAL	45.9333	9.9667	1450 (1430-1480)	20-27	82-139	24	Franco Biondi
Valle Cervara alta	8012001F	VCH	41.8690	13.6230	1725 (1600-1850)	5-55	55-100	32	DAF
Valle Cervara bassa	8012002F	VCL	41.8690	13.6230	1350 (1200-1500)	0-55	55-102	32	DAF
Monte Venere	8029000F	VEN	42.3434	12.1851	800	5-35	30-85	32	DAF

D_{1.3} = campo di variazione dei diametri a petto d'uomo degli alberi campionati
H = altezza dominante o statura

La costruzione delle cronologie individuali e l'interdatazione

Le carote prelevate sono state portate in laboratorio dove, dopo aver trascorso un periodo di esposizione all'aria esterna per far raggiungere al legno un'umidità in equilibrio con quella ambientale, sono state montate su di un listello di legno

ponendo la loro fibratura perpendicolare 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 rafforzata grazie all'uso di acqua e gesso. Le ampiezze anulari sono state 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). La lettura di un raggio viene definita “serie o cronologia o curva elementare” e corrisponde ad una serie temporale di ampiezze anulari. Quando si prendono più raggi per pianta, la loro media viene detta “cronologia individuale”, in quanto rappresentante della crescita radiale media di quell'albero. Ogni lettura “fluttuante”, ossia ancora priva di una precisa collocazione temporale, viene sottoposta ad un confronto con le altre cronologie elementari ed individuali di quel popolamento in modo da verificare la correttezza della misurazione effettuata o la presenza di eventuali errori e di anelli mancanti. Questo confronto, detto “sincronizzazione”, si effettua in maniera sia visuale che statistica e consente di datare in modo preciso ogni lettura. La sincronizzazione visuale consiste nel confrontare l'andamento generale di due curve e nel verificare la concordanza dei principali minimi e massimi assoluti insieme all'assenza di opposizioni di fase. La sincronizzazione statistica, invece, si basa sui valori forniti dal coefficiente di coincidenza (*G*) e del *t* di Student relativi al confronto fra due o più cronologie calcolati da CATRAS. Il coefficiente di coincidenza (*Gleichläufigkeit* dalla letteratura tedesca) è espresso dalla formula:

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

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

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

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

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

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

Al calcolo del coefficiente di coincidenza si affianca il valore del t di Student:

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

Il valore di t dipende, oltre che dalla correlazione r tra le serie dendrocronologiche, anche dalla loro estensione temporale: tanto più le serie sono lunghe, tanto maggiore è la probabilità di ottenere buoni valori.

Sebbene le analisi statistiche forniscano un importante ausilio al ricercatore, i confronti visuali rimangono essenziali per decidere in maniera definitiva sull'affidabilità della datazione effettuata. Le procedure di sincronizzazione sono alla base dell'interdatazione, che costituisce uno dei punti chiave della scienza dendrocronologica e per mezzo di cui è possibile datare con sicurezza le cronologie fluttuanti (Stokes e Smiley, 1996). 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 nostre serie (Grissino-Mayer, 2001).

I parametri statistici dendrocronologici

Il primo confronto fra le diverse stazioni campionate è stato realizzato comparando i valori medi ed il campo di variazione dei parametri statistici dendrocronologici, grandezze in grado di descrivere in maniera sintetica le caratteristiche della crescita radiale in ogni popolamento. Il primo ad essere 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. Questo parametro sintetizza i diversi fattori che possono influenzare l'entità degli accrescimenti come la specie, l'età, la fertilità stagionale, lo stato di salute del popolamento. In linea di massima accrescimenti sostenuti si ottengono, in relazione alla specie considerata, negli individui più giovani, in quelli che vegetano nelle condizioni ambientali più favorevoli e in quelli che godono di buone condizioni di salute.

La deviazione standard (SD):

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

è un indice di dispersione dei valori indagati intorno al valore medio e può indicare, in una cronologia individuale, la variabilità delle ampiezze anulari.

Il coefficiente di autocorrelazione 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 $n - 1$. Questo parametro esprime la correlazione tra l'anello dell'anno n e quello dell'anno $n - 1$ e misura l'inerzia di accrescimento della pianta dovuta alla dipendenza dell'accrescimento attuale da quello dell'anno precedente, basata soprattutto sull'accumulo autunnale di sostanze di riserva da utilizzare durante lo sviluppo della chioma alla ripresa vegetativa primaverile; esso indica il grado di recettività dell'albero nei confronti delle variazioni climatiche di alta frequenza.

Infine la sensibilità media (MS):

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

parametro impiegato molto frequentemente nelle analisi dendrocronologiche, viene definita come la variazione percentuale di crescita tra due anelli consecutivi ed è una misura della variabilità d'alta frequenza della serie dendrocronologica, che indica la capacità della pianta a reagire a stimoli climatici di breve periodo con immediate variazioni incrementali. L'opposto della sensibilità è la compiacenza, che

si manifesta con una forte inerzia negli accrescimenti della pianta ad indicare una scarsa reattività agli stimoli esterni.

Infine, è stata calcolata per ogni stazione la percentuale di anelli mancanti (LAR da *Locally Absent Ring*), ossia la percentuale di anelli mancanti in rapporto al totale degli anelli misurati nelle letture relative ad una stazione.

I valori medi delle grandezze sopra riportate sono stati messi in relazione attraverso il coefficiente di correlazione di Pearson ai fattori geografici (latitudine, longitudine ed altitudine) ed alle caratteristiche strutturali (diametro massimo campionato, altezza dominante o statura stimata) e all'età del popolamento, in modo da verificare la presenza di legami significativi.

La standardizzazione e la cronologia media stagionale

Le curve elementari datate di ogni stazione sono state standardizzate mediante il programma ARSTAN (Cook, 1985), rimuovendo la variabilità di lungo periodo legata al trend biologico dovuto all'età ed alle dimensioni della pianta. I valori di ampiezza anulare grezzi sono stati dapprima trasformati mediante radice quadrata, poi ad ogni serie è stata interpolata mediante il metodo dei minimi quadrati una curva esponenziale negativa o, nel caso l'asintoto orizzontale risultasse negativo, una retta con coefficiente angolare negativo oppure una retta orizzontale. In ogni serie ciascun valore di ampiezza anulare misurato (x_t) è stato quindi diviso per il rispettivo valore che assume la funzione interpolante nello stesso anno (g_t) secondo la formula:

$$I_t = \frac{x_t}{g_t}$$

Alla fine si ottiene una serie standardizzata di ampiezze anulari indicizzate (I_t) i cui valori indicano la percentuale rispetto al valore stimato in un determinato anno del trend biologico; il procedimento viene completato aggiungendo ad ogni indice annuale una costante per rendere la media uguale ad uno e dare, quindi, un ugual peso a tutte le serie nella cronologia finale.

Le serie individuali standardizzate sono poi mediate aritmeticamente mediante ARSTAN per ottenere la “cronologia media stagionale standardizzata”, anch’essa con media uguale ad 1.

La qualità della cronologia media stagionale è stata valutata per mezzo della sua sensitività media (MS_{med}), che esprime la variabilità posseduta dagli indici che la costituiscono e che rappresenta il grado di sincronizzazione esistente fra le diverse serie elementari mediate. Ad essa sono state associate alcune misure del livello di segnale comune espresso dalle serie individuali che la formano, come la correlazione media fra alberi ($ACBT = \text{Average Correlation Between Trees}$), la percentuale di varianza spiegata dalla prima componente principale estratta dalla matrice delle serie elementari ($PC1\%$) e la correlazione media delle serie elementari con la media ($ACWM = \text{Average Correlation With Mean}$), grandezze fornite dai risultati riportati da ARSTAN. Bisogna sottolineare che in questi casi l’uso del coefficiente di correlazione, pur non essendo formalmente corretto perché le osservazioni non sono totalmente indipendenti finché non si rimuove l’autocorrelazione, è comunemente riportato in studi dendrocronologici e viene preso esclusivamente come misura di confronto fra diverse stazioni.

Come per i parametri dendrocronologici, i valori dei descrittori relativi alla qualità della media ed al livello del segnale comune espresso sono stati messi in relazione ai fattori geografici ed alle caratteristiche del popolamento.

Ogni cronologia stagionale standardizzata è stata considerata valida ai fini delle analisi dendroclimatiche successive esclusivamente nel periodo in cui abbiano contribuito almeno tre raggi alla sua costruzione: questo processo viene detto “validazione” della cronologia media stagionale. Le medie validate sono state, quindi, sottoposte a modellizzazione autoregressiva (AR) mediante il programma FMT (Holmes, 1983) per eliminare il rumore dovuto all’autocorrelazione all’interno delle serie di crescita. L’ordine p del modello autoregressivo è stato scelto in base al Criterio Informativo di Akaike (AIC), scegliendo l’ordine che per primo minimizzava questa statistica (Cook, 1985); a conferma dei risultati ottenuti, sono stati comunque consultati i risultati forniti dai profili di autocorrelazione parziale prodotti dal programma SYSTAT11. L’applicazione del modello autoregressivo

porta ad un'ulteriore indicizzazione della media stagionale, ora costituita da una serie temporale di indici con media uguale ad 1 e priva di autocorrelazione.

L'analisi multivariata

Il trattamento a cui sono state sottoposte le nostre serie dendrocronologiche ha cercato di amplificare quanto più possibile il segnale climatico che condiziona la crescita all'interno di ciascun popolamento, in modo da poterle utilizzare nelle analisi dendroclimatiche successive. Il primo passo è stato quello di confrontare la variabilità anulare delle diverse medie con il fine di mettere in evidenza la presenza di modalità di crescita comuni tra stazioni diverse; l'idea di fondo è quella secondo cui foreste vegetanti a quote diverse in luoghi geograficamente distanti, come quelle rappresentate nella nostra Rete, possano essere accomunate (e quindi correlate) o distinte in base al segnale climatico che ne influenza la crescita: si può così arrivare ad individuare sul territorio zone e fasce fitoclimatiche identificate su base dendroclimatica, o più semplicemente **zone e fasce dendroclimatiche**. A questo proposito la statistica multivariata è stata fondamentale per individuare l'esistenza di affinità auxologiche fra foreste differenti per collocazione spaziale ed altitudinale: dopo aver unito tutte le medie in un'unica matrice si è individuato un intervallo temporale comune in cui fossero tutte rappresentate e, su questo, sono state applicate l'Analisi Gerarchica Agglomerativa (HCA dall'inglese *Hierarchical Cluster Analysis*) e l'Analisi delle Componenti Principali (PCA dall'inglese *Principal Component Analysis*). Entrambe hanno come base di partenza la matrice di correlazione tra le serie esaminate, rappresentativa del segnale climatico comune fra di loro, e da essa procedono per classificare (la prima) ed ordinare (la seconda) le variabili in gruppi omogenei basati sulla loro affinità. In pratica, con questi metodi si può confrontare sinteticamente l'insieme delle teleconnessioni, ossia delle correlazioni fra cronologie costruite per la stessa specie in luoghi geograficamente distinti, esistenti fra ogni serie e tutte le altre rappresentate all'interno della Rete. Bisogna inoltre sottolineare che l'uso del coefficiente r di correlazione di Pearson in

questo caso è legittimato dal fatto che l'autocorrelazione è stata rimossa in tutte le serie e, quindi, le osservazioni risultano tra loro indipendenti.

La matrice delle cronologie è del tipo $m \times n$, dove n (colonne) è il numero di cronologie ed m (righe) il numero di anni compreso nell'intervallo comune; una volta definito il numero di stazioni presenti nella rete, i principali limiti ad m sono imposti dalla lunghezza della cronologia più breve e, come si vedrà nel paragrafo seguente, dal numero di osservazioni minimo richiesto dalle elaborazioni statistiche.

L'HCA contempla diversi indici per misurare la "distanza" tra variabili, intesa come opposto dell'affinità, e diversi algoritmi per raggruppare i risultati ottenuti a formare insiemi omogenei. In questo lavoro abbiamo scelto come misura della distanza $(1 - r)$, ossia uno meno il coefficiente r di correlazione di Pearson, e la media tra le distanze come algoritmo per l'agglomerazione (Stenson e Wilkinson, 2004). In pratica, dalla matrice originaria si elencano gerarchicamente tutte le correlazioni, dalla maggiore alla minore, estraendo in ordine decrescente le coppie a correlazione maggiore, che vanno a formare i primi gruppi: ogni nuova cronologia che successivamente si legherà con una di quelle già accoppiate verrà unita alle altre due, ma posta ad una distanza uguale ad 1 meno la media della correlazione con entrambe, a formare un gruppo di tre. Il processo gerarchico agglomerativo continua fino a raggiungere la correlazione più bassa, separando le variabili in gruppi molto numerosi oppure, nel caso estremo, rappresentati da un'unica stazione, ognuno caratterizzato da un proprio valore medio di affinità interna.

La rappresentazione dell'Analisi Gerarchica Agglomerativa si realizza attraverso un dendrogramma, le cui ramificazioni riproducono la strutturazione delle variabili in base al loro segnale comune e che rappresenta la classificazione fitoclimatica delle foreste esaminate. Infatti, i gruppi formati saranno interpretati sulla base della loro posizione geografica e della quota a cui vegetano.

La stessa matrice è stata poi sottoposta all'Analisi delle Componenti Principali, la quale estrae dalla matrice iniziale $m \times n$ un numero pari a m componenti, combinazioni lineari di tutte le variabili esaminate, in ordine decrescente rispetto alla percentuale della varianza originale spiegata da ciascuna (Jolliffe, 1986). Ogni componente principale (PC), infatti, rappresenta una frazione della variabilità totale in comune a più cronologie stazionali alla cui origine c'è, evidentemente, un comune

segnale di tipo climatico. Inoltre, le componenti vengono estratte in modo che tra di loro siano ortogonali, ossia non correlate. 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. Dal punto di vista della rappresentazione grafica, ogni componente viene raffigurata come un asse cartesiano (spesso, nella discussione, componenti ed assi possono essere usati come sinonimi), su cui il peso di ciascuna variabile assume un coordinata.

Per sintetizzare, mentre l’HCA separa in maniera discreta le stazioni in funzione del grado di correlazione che ognuna di esse ha con una piuttosto che con un’altra serie, andando ad identificare in maniera netta i rapporti fitoclimatici fra diversi popolamenti (procedimento detto “classificazione”), la PCA costituisce un modo più fine di guardare ai rapporti tra cronologie, perché individua delle componenti di variabilità comune ed il legame che ciascuna serie ha con ognuna di esse (procedimento detto “ordinamento”). E’ quindi possibile che una stazione sia legata strettamente ad una sola o a più componenti.

Il numero di componenti scelto nelle analisi dipende dal numero minimo capace di spiegare coerentemente i dati originali: in pratica, piuttosto che cercare delle regole statistiche per giudicare la confidenza degli assi estratti, si valuta di quanto aumenti la capacità descrittiva del modello prodotto dalla PCA aggiungendo progressivamente un asse (Jolliffe, 1986). L’unica restrizione seguita nel corso delle analisi è la regola di Kaiser (Guttman, 1954). In questo modo si sfruttano le enormi potenzialità descrittive del metodo mantenendo il quadro esplicativo il più semplice possibile, nel rispetto del “principio di parsimonia”, necessario per interpretare razionalmente la complessità dei dati iniziali senza rischiare di perdere importanti informazioni o aggiungere “rumore” (Fabbris, 1997).

Il passo seguente è stato quello di effettuare la rotazione degli assi identificati dalla PCA per consentire un migliore interpretabilità dei risultati (Jolliffe, 1986): in questo studio abbiamo utilizzato la rotazione VARIMAX, mediante la quale gli assi vengono ruotati in modo da massimizzare la varianza tra le variabili, con la condizione che sia conservato il vincolo dell’ortogonalità (Stenson e Wilkinson,

2004). Scopo di questa tecnica è quello di ottenere, nella situazione ideale, che i pesi su ogni componente siano prossimi a 1 oppure 0, in modo che ogni variabile abbia correlazione elevata con un'unica PC. Il numero minimo di assi capaci di “spiegare” coerentemente i dati originali viene scelto, come nella PCA non ruotata, valutando l'aumento della capacità descrittiva del modello modificato dalla progressiva aggiunta di un asse.

L'ordinamento finale della Rete si ottiene combinando le informazioni della PCA non ruotata, che evidenzia ciò che accomuna le stazioni della Rete, insieme a quelle della PCA ruotata, che accentua ciò che le distingue: nel primo caso si riconosce l'effetto comune di un macroclima regionale, legato alla presenza di una o più zone fitoclimatiche, mentre nel secondo caso si distinguono le diverse fasce altitudinali che caratterizzano ciascuna zona.

Il quadro descrittivo finale deriva dal confronto dell'ordinamento della PCA con la classificazione operata dall'HCA, verificando l'estensione spaziale ed altitudinale delle unità fitoclimatiche individuate. La classificazione fitoclimatica fornita dall'analisi multivariata è stata quindi confrontata con altre classificazioni fitoclimatiche presentate per il nostro Paese, come la classificazione fitoclimatica di Pavari (Tabella 2), verificando la coincidenza spaziale ed altitudinale delle unità individuate. A questo proposito, bisogna segnalare che Pavari ha assegnato al termine “zona” una connotazione altitudinale, che va differenziata dalla terminologia impiegata in questo lavoro, che attribuisce questo nome ad unità bioclimatiche identificate in senso latitudinale e quello di “fascia” per quelle identificate in senso altitudinale.

L'estensione geografica della classificazione effettuata al di fuori dei confini nazionali è stata operata correlando i punteggi ottenuti con la PCA con altre cronologie stazionali di faggio, standardizzate e private dell'autocorrelazione come quelle utilizzate in questo studio, realizzate sulle Alpi Giulie, Alpi Dinariche e colline sud-orientali in Slovenia (autori: Katarina Čufar e Martin de Luis) e sulle Alpi Settentrionali e colline dell'Austria (autore: Michael Grabner). Le rappresentazioni grafiche delle teleconnessioni ottenute sono state effettuate mediante il programma GMT (Wessel e Smith, 1998).

Tabella 2. Caratteristiche climatiche ed estensione altitudinale delle zone e sottozone del Pavari in cui è presente il faggio in Italia.

Zona	Sottozona	T _{med} (°C)	T _f (°C)	m (°C)	Sud Italia (A) (m s.l.m.)	Italia Centrale (B) (m s.l.m.)	Appennino Settentrionale (C) (m s.l.m.)	Alpi (D) (m s.l.m.)
<i>Castanetum</i>	Calda	10 - 15	> 0	> -12	da 600 a 900	da 300-500 a 600-800	da 200-300 a 500-600	-
	Fredda	10 - 15	> -1	> -15	da 800 a 1200	da 700 a 900	da 500 a 900	da 300-400 a 700-900
<i>Fagetum</i>	Calda	7 - 12	> -2	> -20	da 1000-1200 a 1700	da 800-1000 a 1500	da 700-900 a 1200	da 700-900 a 1200
	Fredda	6 - 12	> -4	> -25	da 1700 a 2000	da 1500 a 1800	da 1200 a 1600	da 800-1200 a 1500-1600

T_{med} = temperatura media annua
T_f = temperatura media delle mese più freddo
m = media dei minimi

La calibrazione

Il grande contributo che la PCA dà al nostro studio risiede anche nella possibilità di confrontare i punteggi di ogni componente con dati climatici di riferimento per identificare il segnale climatico che ne provoca la variabilità e che sta alla base dell'organizzazione fitoclimatica in zone e fasce delle faggete studiate. In dendroclimatologia si dice “calibrazione” lo studio del rapporto esistente fra accrescimento arboreo e fattori climatici. In questo caso, lo studio non avviene considerando un'unica cronologia stazionale, ma il segnale comune a più alberi che crescono in foreste appartenenti alla stessa zona e/o fascia dendroclimatica. Grazie al programma Dendroclim2002 (Biondi e Waikul, 2004) sono state condotte le funzioni di correlazione e le funzioni di risposta tra le serie di punteggi ed i dati climatici: le prime consistono nel calcolo del coefficiente di correlazione di Pearson tra punteggi ed ogni singola variabile climatica mensile, mentre le seconde corrispondono a regressioni multiple tra la serie di punteggi (la variabile dipendente) e tutte le variabili climatiche mensili prese in considerazione (i predittori o variabili indipendenti). Ai fini delle nostre indagini le variabili climatiche mensili sono state organizzate in modo da coprire l'intervallo di tempo che va da giugno dell'anno precedente a quello di formazione dell'anello fino ad ottobre dell'anno in corso, per un totale di 17 mesi: così facendo si può valutare l'effetto che ha il clima delle stagioni precedenti sulla formazione dell'anello e si evita di prendere in considerazione i mesi dell'autunno ed inverno in corso, in cui la crescita legnosa è ormai terminata. Ogni elaborazione ha quindi coinvolto una matrice climatica

formata da precipitazioni e temperature minime ed una formata da precipitazioni e temperature massime, entrambe composte da 34 variabili climatiche (17 per le precipitazioni e 17 per le temperature).

I calcoli sono effettuati secondo il metodo *bootstrap* (Efron e Tibshirani, 1986) ed i risultati forniti dal programma consistono nei coefficienti, di correlazione o di regressione, significativi al 95%, dove l'intervallo di confidenza viene calcolato sulla base delle stime effettuate su 1000 sub-intervalli. Poiché Dendroclim2002 richiede che il numero di anni da elaborare sia almeno uguale a 1.5 volte il numero di variabili climatiche scelte per le analisi, nel nostro caso (34 variabili) l'estensione temporale della matrice (il numero m di righe) deve essere maggiore o uguale a 51 anni.

I dati climatici

I dati climatici utilizzati sono stati elaborati nell'ambito del progetto CLIMAGRI (Maugeri *et al.*, 2002). Essi sono organizzati in una griglia di $1^\circ \times 1^\circ$ che copre l'intero territorio nazionale e consistono in valori di temperature minime e massime, rappresentate come anomalie rispetto alla media del periodo di riferimento, e di precipitazioni, rappresentate come rapporto rispetto alla media del periodo di riferimento. Ogni cella della griglia è centrata sull'intersezione delle linee di meridiano e parallelo e contiene i valori mensili delle citate variabili, ottenuti dalla media dei valori delle stazioni meteorologiche presenti entro un raggio pari a due volte la distanza media tra nodi, pesati in relazione alla loro distanza dal nodo centrale; l'estensione temporale di ogni serie climatica varia a seconda delle stazioni utilizzate ed è compresa generalmente tra i 130 e i 250 anni circa per le precipitazioni ed i 100 e i 230 anni per le temperature.

La superficie di ogni cella, pari quella di un quadrato di circa 100×100 km, fa sì che i relativi valori perdano parte dell'individualità delle stazioni di origine ed acquistino caratteristiche meno locali e più "regionali", il che ben si adatta al confronto con le nostre componenti, che rappresentano unità bioclimatiche e non più

singoli popolamenti; inoltre, il procedimento di mediazione contribuisce ad un miglior rapporto segnale-rumore nelle serie climatiche (Maugeri *et al.*, 2002).

La cella climatica scelta per le funzioni di correlazione e risposta è stata quella in cui ricadeva la media stagionale con il peso maggiore sulla componente interessata, in modo da utilizzare un'area in cui quel segnale climatico fosse ben rappresentato.

RISULTATI

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, perché ad essa vanno aggiunti gli anni necessari a raggiungere l'altezza di carotaggio (1.3 m da terra) e gli anelli non presenti sulla carota (nel caso in cui non si sia centrato il midollo o a causa della presenza di carie), dà importanti informazioni di carattere ecologico. In particolare è stata considerata l'età massima osservata in ciascun popolamento (N_{max}), che costituisce un indice della longevità realizzata in ogni stazione e che fornisce importanti informazioni sulla storia (sociale ed ecologica) del bosco considerato. All'interno della nostra Rete si è osservato un notevole campo di variazione di questa variabile, che oscilla tra i 77 anni di La Motta ed i 503 anni della faggeta sommitale di Valle Cervera (AQ) (Tabella 3); la sua variabilità si è dimostrata legata significativamente alla quota ($r = 0.55$, $p < 0.001$) (Figura 2). Si può ammettere, quindi, che le faggete di quota siano maggiormente longeve e che questa proprietà sia da attribuire essenzialmente alla maggiore durabilità conferita al legno dalla crescita più lenta ed alla minore accessibilità di questi siti al limite altitudinale dell'areale. Al contrario, i popolamenti posti a quote inferiori non solo sono stati sottoposti da tempi remoti al notevole impatto delle diverse attività antropiche, grazie alla loro accessibilità ed alla vicinanza ai centri abitati, ma, soprattutto nel caso delle faggete collinari (ORI, PEC, NIM, MOT) e di quelle montane prossime alla linea di costa (PET), sono anche caratterizzate da una stagione vegetativa più lunga che porta ad anelli di dimensioni maggiori e, quindi, ad un legno meno durabile.

Non è stato trovato alcun legame con la latitudine e la longitudine a livello nazionale: infatti faggete di età ragguardevole (superiore a 300 anni) sono state incontrate indistintamente in tutto il paese, dalle Alpi all'Appennino Meridionale (Figura 2), la cui vetustà è stata condizionata, oltre che dalla quota, anche da fattori di tipo stazionale e storico. Le faggete della Carnia (Lateis, Timau, Gracco, ma anche

Cleulis, che raggiungono, rispettivamente, 380, 348, 318 e 260 anni) fanno parte dei cosiddetti “boschi banditi”, per molti secoli risparmiati all’uso delle popolazioni

Tabella 3. Numero di repliche, caratteristiche della curva media standardizzata e descrittori della variabilità comune agli alberi di ciascun campione.

SITO	CODICE SITO	ALBERI	RAGGI	ESTENSIONE TEMPORALE*	N _{max}	MS _{med}	p	A	R	ACBT	PC1 %	ACWM
Badia Prataglia	BAD	13	25	1785-1988	335	0.10	1	12	23	0.22	32.0	0.52
Bosco S. Antonio	BSA	9	17	1879-1988	210	0.16	3	9	17	0.48	53.7	0.72
Cansiglio	CAN	5	12	1885-1988	122	0.09	1	5	10	0.19	31.7	0.55
Cinquefrondi	CFR	12	12	1907-2003	100	0.14	1	11	11	0.42	49.2	0.68
Monte Cimino	CIM	70	101	1813-2000	193	0.09	3	35	38	0.33	38.1	0.59
Cleulis	CLE	23	23	1804-2003	260	0.08	1	22	22	0.26	34.3	0.54
Etna	ETN	28	48	1842-2003	162	0.12	1	47	47	0.44	47.7	0.67
Monte Fogliano	FOG	20	26	1869-2002	198	0.11	3	18	23	0.31	36.9	0.58
Foresta Umbra	FOU	7	10	1816-2003	188	0.14	4	7	10	0.47	53.8	0.73
Gracco	GRA	20	20	1714-2002	318	0.08	1	19	19	0.43	48.4	0.67
Lateis	LAT	24	28	1626-2004	380	0.10	5	24	24	0.32	38.3	0.59
Monti Lepini	LEP	21	21	1827-2001	181	0.11	3	21	21	0.55	58.2	0.76
Madonie	MAD	15	15	1844-2004	318	0.15	1	12	15	0.19	38.6	0.50
Majella	MAI	4	7	1901-1988	140	0.11	1	3	4	0.28	47.5	0.63
Monte Barro	MBA	12	26	1855-1988	191	0.11	1	12	21	0.22	35.5	0.50
Montalto 1600	MO1	22	22	1763-2003	428	0.12	3	18	18	0.38	46.3	0.64
Montalto 1900	MO2	19	19	1808-2003	272	0.12	1	17	17	0.27	35.0	0.55
Morino	MOR	20	25	1766-1997	288	0.10	3	15	23	0.24	32.2	0.53
La Motta	MOT	19	19	1940-2004	77	0.11	2	4	4	0.58	68.5	0.78
Monte Scoperta	MSC	8	17	1901-1989	90	0.12	2	16	16	0.44	48.7	0.68
Nimis	NIM	12	12	1903-2003	120	0.10	1	9	9	0.34	42.1	0.62
Oriolo Romano	ORI	26	26	1905-2002	106	0.11	3	21	21	0.31	36.5	0.58
Paularo	PAU	20	20	1824-2002	261	0.12	1	18	18	0.27	35.5	0.56
Piani di Zervò	PDZ	21	21	1864-2003	159	0.12	1	17	17	0.41	47.1	0.66
Pechinie	PEC	14	15	1930-2004	79	0.08	1	5	6	0.76	79.8	0.87
Monte Petrella	PET	22	23	1925-2000	84	0.08	1	17	17	0.44	48.4	0.68
Monti Pizi	PIZ	32	32	1901-2001	107	0.11	1	32	32	0.35	38.8	0.60
Parco d'Abruzzo	PNA	22	48	1670-1988	319	0.11	4	17	31	0.29	44.9	0.55
Parco del Pollino	PPO	4	8	1783-1988	299	0.11	2	3	6	0.21	39.8	0.61
Rosello	ROS	11	11	1876-1997	136	0.12	3	10	10	0.28	39.3	0.58
Sabina	SAB	25	45	1784-1995	227	0.11	3	25	42	0.48	51.5	0.71
Monte Terminillo	TER	41	41	1656-2003	416	0.15	1	41	41	0.44	46.3	0.67
Timau	TIM	21	27	1676-2002	348	0.10	1	22	22	0.26	36.8	0.54
Tocchito	TOC	21	21	1875-2001	138	0.12	1	21	21	0.53	55.8	0.74
Tre Confini	TRE	12	12	1850-2002	172	0.09	2	11	11	0.33	44.0	0.62
Valzurio	VAL	8	16	1810-1988	197	0.14	2	8	12	0.27	37.1	0.57
Valle Cervara alta	VCH	32	37	1523-2002	503	0.13	3	32	37	0.40	44.0	0.65
Valle Cervara bassa	VCL	21	21	1581-2001	435	0.12	2	21	21	0.40	44.8	0.65
Monte Venere	VEN	36	38	1871-1996	133	0.10	1	34	34	0.33	37.4	0.59

* = riferito alla porzione validata contenente 3 o più repliche

N_{max} = numero di anelli massimo contati su un raggio

MS = sensibilità media

p = ordine AR

A = numero di alberi ricadenti nel periodo comune 1941-1988

R = numero di raggi campionati ricadenti nel periodo comune 1941-1988

ACBT = correlazione media fra alberi

PC1 = % di varianza spiegata dalla prima componente principale

ACWM = correlazione media dei raggi con la media

locali per consentire l’approvvigionamento legnoso della Repubblica di Venezia ed in seguito conservati come boschi di protezione dei centri abitati (a monte dei quali

sono collocati) dalle valanghe e dal rotolamento di massi. Non da meno sono i popolamenti appenninici, che dal nord (Badia Prataglia) fino al sud (Montalto 1600 m) superano spesso i 3-400 anni fino a raggiungere i 503 anni della Valle Cervara: i fattori che sono responsabili di tale longevità possono essere riconducibili, oltre che alla quota (dove elevata), anche ad altre cause. In particolare, tra le faggete da noi campionate: Montalto 1600 m (428 anni) è posta in un sito particolarmente remoto dell'Aspromonte in un piccolo compluvio esposto a nord sopravvissuto ai frequenti incendi che periodicamente devastano la zona; anche l'età delle faggete di Pizzo Carbonara sulle Madonie (318 anni) e di Morino (288 anni) è da relazionare alla scarsa accessibilità dell'area; Valle Cervara alta (503 anni), oltre ad essere remota, è messa a protezione di una fonte d'acqua ed è stata salvata dai tagli da botanici, forestali e dal Parco Nazionale d'Abruzzo che ne avevano intuito il valore; infine, la faggeta del Monte Terminillo (416 anni) è al limite della vegetazione, spesso confinante direttamente con ghiaioni e circondata da piste da valanga, con funzione protettiva e meno accessibile rispetto ai boschi sottostanti.

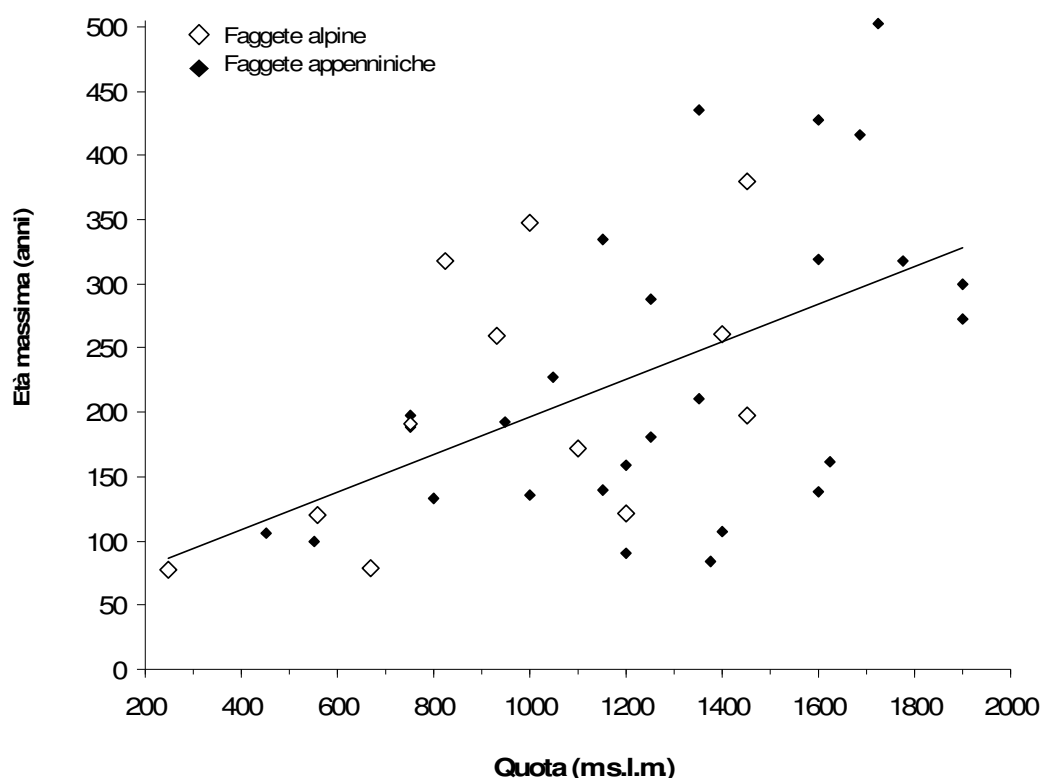


Figura 2. Relazione tra età massima rilevata in ciascun popolamento e quota media.

Dividendo le faggete appenniniche da quelle alpine, è emerso che in quest'ultime la longevità è inversamente proporzionale alla latitudine ($r = 0.57$, $p < 0.05$): infatti le faggete carniche raggiungono età maggiori sia di quelle delle Prealpi Giulie, che vegetano a quote inferiori, ma anche rispetto a popolamenti posti a quote simili alle loro in Veneto e Lombardia (Cansiglio e Valzurio): probabilmente le cause di queste differenze risiedono nel minor vincolo di protezione a cui questi ultimi sono sottoposti.

Sono stati poi analizzati i valori medi e gli estremi del campo di variazione di ciascun parametro dendrocronologico all'interno di ogni campione, in modo da valutare le principali caratteristiche dell'accrescimento anulare in ogni stazione (Tabella 4); si è inoltre analizzata la dipendenza di ciascun parametro dai fattori geografici (latitudine, longitudine e quota), dalle caratteristiche strutturali (diametro massimo campionato, altezza dominante o statura del popolamento) e dalla età del popolamento considerando il periodo comune a tutte le cronologie medie 1941 - 1988 (Tabelle 5 a, b, c).

L'ampiezza anulare media (MW) varia tra il minimo di circa 1 mm/anno delle faggete poste alle quote maggiori, sia alpine che appenniniche (in ordine crescente TER, LAT, VCH, MAD), al massimo di circa 4 mm/anno delle faggete collinari prealpine orientali (MOT) e laziali (ORI), passando per le faggete a quote intermedie (montane), che generalmente oscillano intorno ai 2 mm/anno. All'interno di quest'ultime raggiungono i 3 mm/anno quelle stazioni in cui maggiore fertilità è apportata dal calore legato alla bassa quota e/o al potere termoregolante e all'umidità apportati dalla vicinanza al mare o ad un lago di sufficiente dimensione (PEC, NIM, FOG, CFR, PET). Oltre che dalla quota stazionale, MW dipende dalla vetustà delle foreste campionate, secondo cui alberi più vecchi crescono più lentamente; solo nel caso delle foreste alpine sembra diminuire d'importanza la quota ed emerge una lieve proporzionalità inversa con la latitudine, perché le faggete più settentrionali, che sono anche le più interne (mesalpiche) tra le alpine, hanno accrescimento più lento. In effetti CAN e VAL crescono in media il doppio delle faggete carniche poste a quote simili.

Bisogna anche considerare l'interrelazione esistente tra diverse variabili, perché le stazioni di quota sono generalmente le più vecchie, così come quelle alpine più

Tabella 4. Media e campo di variazione dei parametri dendrocronologici delle serie individuali di ogni campione e percentuale di anelli mancanti (LAR).

SITO	CODICE SITO	MW	SD	MS	A1	LAR
Badia Prataglia	BAD	2.60 (0.76-4.14)	1.08 (0.32-1.84)	0.24 (0.15-0.34)	0.72 (0.43-0.89)	0.067
Bosco S. Antonio	BSA	2.64 (1.48-3.72)	1.40 (0.72-2.21)	0.32 (0.21-0.40)	0.73 (0.50-0.88)	0.000
Cansiglio	CAN	2.44 (1.02-3.36)	1.08 (0.62-1.72)	0.25 (0.19-0.30)	0.75 (0.40-0.92)	0.000
Cinquefrondi	CFR	3.18 (2.33-4.04)	1.70 (1.00-2.21)	0.38 (0.27-0.59)	0.65 (0.39-0.82)	0.000
Monte Cimino	CIM	2.21 (1.19-5.23)	1.17 (0.53-2.09)	0.31 (0.21-0.52)	0.76 (0.40-0.91)	0.067
Cleulis	CLE	1.37 (0.40-3.19)	0.50 (0.19-0.90)	0.19 (0.13-0.26)	0.79 (0.60-0.91)	0.000
Etna	ETN	2.03 (1.15-4.32)	1.01 (0.53-2.21)	0.31 (0.20-0.48)	0.70 (0.41-0.94)	0.045
Monte Fogliano	FOG	2.84 (1.35-4.77)	1.29 (0.65-2.88)	0.28 (0.16-0.41)	0.71 (0.43-0.88)	0.000
Foresta Umbra	FOU	2.33 (1.74-2.79)	1.22 (0.92-1.63)	0.34 (0.27-0.40)	0.66 (0.40-0.82)	0.000
Gracco	GRA	1.43 (0.74-2.59)	0.70 (0.41-1.29)	0.24 (0.19-0.29)	0.78 (0.52-0.87)	0.099
Lateis	LAT	1.05 (0.50 - 2.08)	0.49 (0.23-1.00)	0.25 (0.16-0.36)	0.77 (0.48-0.89)	0.163
Monti Lepini	LEP	1.73 (0.94-3.02)	1.09 (0.66-1.80)	0.33 (0.26-0.41)	0.76 (0.59-0.91)	0.149
Madonie	MAD	1.09 (0.41-1.88)	0.70 (0.23-1.07)	0.35 (0.23-0.49)	0.72 (0.35-0.89)	0.045
Majella	MAI	2.05 (1.35-3.27)	1.19 (0.90-1.56)	0.32 (0.22-0.47)	0.71 (0.36-0.85)	0.000
Monte Barro	MBA	2.47 (1.24-4.09)	1.03 (0.51-1.78)	0.26 (0.18-0.35)	0.70 (0.47-0.89)	0.068
Montalto 1600	MO1	1.73 (0.65-3.95)	0.94 (0.36-1.86)	0.29 (0.17-0.46)	0.74 (0.52-0.90)	0.163
Montalto 1900	MO2	1.33 (0.68-2.17)	0.68 (0.35-1.43)	0.31 (0.21-0.40)	0.70 (0.55-0.93)	0.000
Morino	MOR	1.90 (0.97-4.79)	1.07 (0.48-3.46)	0.30 (0.22-0.37)	0.74 (0.35-0.89)	0.066
La Motta	MOT	4.05 (1.70-5.44)	1.75 (1.10-2.49)	0.26 (0.18-0.44)	0.70 (0.44-0.94)	0.000
Monte Scoperta	MSC	2.74 (1.71-3.56)	1.03 (0.69-1.27)	0.31 (0.23-0.37)	0.52 (0.24-0.68)	0.099
Nimis	NIM	3.09 (1.46-4.34)	1.44 (0.75-1.89)	0.26 (0.20-0.34)	0.76 (0.53-0.88)	0.000
Oriolo Romano	ORI	4.17 (2.05-7.09)	1.92 (0.91-3.80)	0.27 (0.21-0.35)	0.74 (0.57-0.90)	0.000
Paularo	PAU	2.11 (0.88-4.08)	0.80 (0.47-1.44)	0.27 (0.16-0.35)	0.61 (0.14-0.85)	0.110
Piani di Zervò	PDZ	2.21 (1.46-3.33)	1.21 (0.70-1.76)	0.34 (0.25-0.53)	0.70 (0.42-0.90)	0.086
Pechinie	PEC	3.11 (2.11-5.77)	1.40 (0.62-2.47)	0.22 (0.13- 0.40)	0.72 (0.39-0.91)	0.000
Monte Petrella	PET	3.60 (2.72-5.21)	1.46 (0.80-2.07)	0.21 (0.13-0.28)	0.75 (0.44-0.93)	0.000
Monti Pizi	PIZ	2.47 (1.71-3.47)	1.02 (0.56-1.80)	0.29 (0.19-0.43)	0.58 (0.32-0.82)	0.000
Parco d'Abruzzo	PNA	1.60 (0.62-1.97)	0.82 (0.29-1.97)	0.32 (0.17-0.46)	0.70 (0.35-0.91)	0.081
Parco del Pollino	PPO	1.72 (0.75-2.77)	0.81 (0.35-1.28)	0.28 (0.23-0.35)	0.71 (0.54-0.86)	0.000
Rosello	ROS	2.29 (1.25-2.85)	1.11 (0.68-1.72)	0.31 (0.22-0.40)	0.60 (0.29-0.86)	0.145
Sabina	SAB	1.97 (0.83-4.07)	1.15 (0.43-3.19)	0.35 (0.20-0.55)	0.71 (0.47-0.86)	0.071
Monte Terminillo	TER	0.96 (0.50-1.63)	0.52 (0.20-1.09)	0.38 (0.28-0.47)	0.65 (0.42-0.87)	0.456
Timau	TIM	1.28 (0.70-3.79)	0.72 (0.36-1.33)	0.26 (0.16-0.33)	0.77 (0.23-0.96)	0.231
Tocchito	TOC	1.89 (1.33-3.30)	0.77 (0.54-1.07)	0.30 (0.24-0.39)	0.61 (0.38-0.85)	0.074
Tre Confini	TRE	1.64 (0.85-2.81)	0.71 (0.41-1.00)	0.24 (0.16-0.30)	0.74 (0.58-0.86)	0.195
Valzurio	VAL	2.03 (1.03-3.61)	0.99 (0.42-1.41)	0.35 (0.22-0.49)	0.61 (0.40-0.85)	0.439
Valle Cervara alta	VCH	1.06 (0.38-1.97)	0.57 (0.27-1.33)	0.37 (0.26-0.49)	0.68 (0.51-0.89)	0.338
Valle Cervara bassa	VCL	1.04 (0.61-1.88)	0.62 (0.38-0.92)	0.34 (0.26-0.43)	0.73 (0.48-0.89)	0.074
Monte Venere	VEN	2.08 (0.86-3.82)	1.17 (0.42-2.57)	0.32 (0.22-0.44)	0.76 (0.57-0.90)	0.164

MW = ampiezza anulare media

SD = deviazione standard

MS = sensitività media

A₁ = coefficiente di autocorrelazione di primo ordine

LAR = % di anelli mancanti

settentrionali sono più vecchie in quanto “boschi banditi”. Il comportamento osservato in MW si riscontra anche per il valore massimo di ampiezza media (MW_{max}) presentato dalle serie individuali di ogni stazione, considerato come indicatore della potenzialità produttiva stazionale: in effetti, oltre ai fattori quota ed

età, è emerso il suo legame con l'altezza dominante o la statura del soprassuolo, a loro volta indicatori della fertilità stazionale. Anche per questo parametro gli alberi delle faggete a quote superiori mostrano i valori minori, non oltrepassando i 2 mm/anno di incremento radiale medio, mentre le faggete collinari e sub-montane si aggirano intorno ai 5-6 mm/anno e raggiungono il valore più alto a Oriolo Romano, dove un albero ha raggiunto il valore di 7 mm/anno. Le faggete montane arrivano in genere fino a 3-4 mm/anno, ma valori maggiori possono essere raggiunti nelle stazioni dove la fertilità stazionale sia aumentata dal particolare topoclima o dalle caratteristiche litologiche e geomorfologiche: infatti, la vicinanza al mare è forte per il Monte Petrella e, in maniera minore, per ETN e MO1; quest'ultima e MOR godono di una bassa pendenza media del versante; infine, alcune di loro crescono su suoli di origine marnoso-arenacea o vulcanica, capaci di una maggiore ritenzione idrica o più ricchi di sostanze nutritive (MO1, BAD, PAU, ETN).

Tabella 5. Correlazione dei parametri statistici dendrocronologici e delle caratteristiche della media stazionale standardizzata con i fattori geografici e strutturali e con l'età del popolamento, calcolati sul periodo comune 1941 - 1988 per: a) tutta la Rete, b) Appennini, c) Alpi. Per il significato dei simboli vedi le Tabelle 3 e 5.

a)	MW	SD	MS	A1	MW _{max}	MS _{max}	LAR	MS _{med}	ACBT	PC1%	ACWM	p
Latitudine	0.00	-0.11	-0.49	0.09	-0.09	-0.45	0.17	-0.48	0.00	-0.01	-0.03	-0.05
Longitudine	-0.13	-0.02	0.24	-0.09	-0.19	0.02	-0.30	0.25	0.16	0.23	0.25	0.03
Quota	-0.57	-0.62	0.08	-0.33	-0.46	0.06	0.33	0.35	-0.24	-0.24	-0.22	0.02
Lunghezza	-0.64	-0.65	-0.06	-0.30	-0.49	0.03	0.55	0.10	-0.13	-0.22	-0.20	0.35
N _{max}	-0.69	-0.67	-0.08	-0.22	-0.52	0.00	0.48	0.19	-0.27	-0.30	-0.32	0.26
D _{max}	-0.13	-0.17	0.14	-0.19	-0.01	0.20	0.08	0.19	-0.21	-0.14	-0.25	0.34
H	0.21	0.13	0.14	-0.07	0.41	0.42	0.11	0.00	-0.09	-0.28	-0.17	0.41
b)	MW	SD	MS	A1	MW _{max}	MS _{max}	LAR	MS _{med}	ACBT	PC1%	ACWM	p
Latitudine	0.13	-0.08	-0.17	-0.32	0.06	-0.05	0.18	-0.26	0.11	-0.04	0.08	0.29
Longitudine	-0.22	-0.10	0.21	-0.02	-0.25	-0.12	-0.21	0.33	0.00	0.22	0.15	-0.11
Quota	-0.65	-0.70	-0.09	-0.10	-0.63	-0.18	0.28	0.20	-0.09	0.04	-0.09	-0.24
Lunghezza	-0.59	-0.60	0.15	-0.36	-0.48	0.20	0.61	0.15	0.00	-0.06	-0.08	0.28
N _{max}	-0.65	-0.62	0.07	-0.20	-0.55	0.10	0.55	0.24	-0.19	-0.18	-0.24	0.20
D _{max}	-0.15	-0.22	-0.01	-0.10	-0.12	0.02	-0.08	-0.02	-0.16	-0.03	-0.20	0.45
H	0.27	0.31	0.12	0.06	0.42	0.46	0.18	-0.22	0.16	-0.13	0.00	0.46
c)	MW	SD	MS	A1	MW _{max}	MS _{max}	LAR	MS _{med}	ACBT	PC1%	ACWM	p
Latitudine	-0.58	-0.50	-0.54	0.04	-0.61	-0.66	-0.06	-0.47	0.09	0.00	0.06	0.09
Longitudine	-0.02	0.03	-0.26	0.14	-0.38	-0.52	-0.42	-0.56	0.39	0.34	0.43	0.03
Quota	-0.54	-0.70	-0.14	-0.71	-0.20	-0.02	0.64	0.34	-0.58	-0.64	-0.57	0.37
Lunghezza	-0.80	-0.77	-0.51	-0.15	-0.58	-0.40	0.44	-0.04	-0.33	-0.42	-0.40	0.49
N _{max}	-0.82	-0.83	-0.55	-0.21	-0.49	-0.40	0.40	0.00	-0.43	-0.52	-0.51	0.37
D _{max}	-0.10	-0.12	0.34	-0.36	0.46	0.60	0.63	0.77	-0.42	-0.39	-0.48	-0.10
H	-0.01	-0.34	-0.31	-0.19	0.24	-0.06	0.09	0.12	-0.70	-0.65	-0.71	0.10

La deviazione standard (SD) è controllata sostanzialmente dagli stessi fattori di MW,

a cui è direttamente correlata a causa della eteroscedasticità delle serie dendrocronologiche (Cook e Kairiukstis, 1990). Il suo campo di variazione oscilla tra il valore di 0.49 a Lateis e quello di 1.70 a Cinquefrondi, pur presentando un'ampia variabilità individuale all'interno di ciascun campione.

La sensitività media (MS) si mantiene sempre al di sopra del valore di 0.2, ma mostra valori crescenti scendendo verso sud: questo fatto è da mettere in relazione all'aumento della sensitività del faggio man mano che ci si avvicina al limite meridionale dell'areale, dove aumenta l'effetto dell'aridità estiva mediterranea su questa specie oceanica. I valori più alti (0.37 - 0.38) si rilevano nelle faggete di quota peninsulari (TER e VCH) e in CFR, faggeta collinare meridionale, a confermare che questo parametro aumenta sia verso i limiti altitudinali superiori e inferiori dell'areale di distribuzione, sia verso quelli latitudinali. Il gradiente latitudinale di MS è osservabile anche all'interno delle sole cronologie delle Alpi, in cui i popolamenti mesalpici, più settentrionali, hanno minore sensitività rispetto a quelli esalpici. Infine, la sensitività massima rilevata in singoli individui all'interno di ciascun campione, invece, può raggiungere valori notevoli, fino a sfiorare 0.6 a Cinquefrondi. Questa grandezza, oltre a confermare il trend latitudinale riportato per MS, mostra come la maggiore variabilità nelle ampiezze anulari sia presente nei popolamenti con individui di dimensioni maggiori, più dipendenti per la loro sopravvivenza dalle condizioni esterne.

Il coefficiente di autocorrelazione di primo ordine (A_1) presenta in genere valori medi pari a 0.6 – 0.7, con singole piante che possono raggiungere i 0.9; questo parametro sembra inversamente legato alla quota, particolarmente tra le faggete alpine dove i valori maggiori sono presenti a bassa quota.

L'ultima grandezza esaminata è stata la percentuale di anelli mancanti (LAR), che è nulla nelle faggete collinari e presenta valori crescenti con l'aumentare dell'altitudine, fino a raggiungere valori di 0.3 – 0.4% sul totale degli anelli contati nelle stazioni al limite superiore di vegetazione del faggio sugli Appennini e sulle Alpi: in effetti, è logico pensare che l'anello venga omesso tanto più frequentemente quanto più le condizioni ecologiche diventino ostili. Anche l'età è determinante, perché in individui vetusti il vigore vegetativo è minore ed è più probabile che in annate difficili l'albero non riesca a formare l'anello; invece, la correlazione inversa

con il diametro massimo (soprattutto sulle Alpi), può trovare spiegazione nel fatto che piante di notevoli dimensioni possono trovare maggiore difficoltà in anni sfavorevoli a trovare le risorse sufficienti per la crescita diametrica di tutto il fusto. Bisogna infine considerare che sia l'età che le dimensioni sono legate anche alla vetustà del popolamento, fase strutturale avanzata in cui sono frequenti i fenomeni di aduggiamento, che causano spesso l'omissione della formazione dell'anello da parte del faggio. Ad esempio la faggeta sommitale di Montalto d'Aspromonte e la faggeta del Pollino, nonostante la loro quota, non presentano anelli mancanti perché sono cedui matricinati invecchiati.

Passando ora alle statistiche relative alla qualità della cronologia media standardizzata ottenuta per ogni popolamento, la sensibilità media della curva stazionale (MS_{med}), oltre ad essere correlata (come nel caso di MS e MS_{max}) inversamente alla latitudine e direttamente al diametro massimo, mostra un legame diretto con la quota (Tabella 4). Le faggete meridionali hanno generalmente presentato i valori maggiori di questo parametro, fornendo serie stazionali standardizzate con sensibilità pari a 0.14 – 0.15 (Tabella 5). La maggiore sensibilità delle medie delle faggete poste a quote superiori può essere spiegata considerando che queste spesso si trovano al limite altitudinale dell'areale del faggio e che, parallelamente al limite meridionale, se il clima diventa più limitante gli accrescimenti di piante diverse saranno maggiormente sincronizzati e si produrrà una curva più sensitiva.

Comunque né la correlazione media fra alberi (ACBT) né la percentuale di varianza spiegata dalla prima componente principale (PC1%) hanno mostrato trend geografici significativi, non necessariamente perché questi non esistano, ma probabilmente perché il livello di segnale comune fra alberi spesso risente dell'effetto di vari disturbi che interferiscono sul segnale climatico: nel nostro caso è da citare soprattutto la ceduzione, in particolare se consideriamo che il decennio iniziale del periodo comune utilizzato in queste analisi (1942 - 2001) copre gli anni della seconda guerra mondiale e quelli immediatamente successivi, in cui molti dei nostri boschi sono caduti al taglio.

Solamente nelle faggete alpine si nota una correlazione inversa con la quota di ACBT e PC1, che indica il maggior grado di variabilità comune posseduto dalle

faggete basali prealpine e, quindi, che queste sono maggiormente limitate dal clima. In effetti, però, questi boschi hanno dato notevoli problemi nel corso della datazione delle singole carote, mostrando di fatto bassa sincronizzazione ed una certa compiacenza: questa contraddizione può essere spiegata considerando che questi soprassuoli sono mediamente molto giovani ed hanno ricolonizzato negli ultimi 40-50 anni coltivi abbandonati, mentre i faggi più vecchi di questi campioni, gli unici che rientravano nel nostro periodo comune, sono sopravvissuti esclusivamente nelle zone non coltivate più marginali e rocciose. Nelle nostre elaborazioni risultano così solo gli individui più sensitivi, cresciuti nei siti più ostili, poco rappresentativi dell'intero campione. Inoltre in queste faggete è presente un'azione negativa sulla crescita comune dovuta all'altezza del popolamento, indicando che stazioni più fertili fanno sì che ci sia una minore pressione del clima sugli accrescimenti.

La correlazione dei raggi con la media (ACWM) ha fornito, con poche eccezioni, valori generalmente pari a 0.6 – 0.7, dimostrando che le medie stazionali prodotte rappresentano bene il segnale climatico contenuto nelle singole piante indipendentemente dalla loro collocazione geografica. Questa grandezza è correlata negativamente all'età massima. Nei popolamenti alpini, l'ACWM ha rappresentato fedelmente il comportamento già osservato per ACBT e PC1, correlandosi negativamente alla quota ed alla fertilità del popolamento.

Per finire, l'ordine del modello di autoregressione (p) applicato a ciascuna media oscilla tra 1 e 5, risultando direttamente proporzionale all'età ed all'altezza del popolamento. Nelle foreste più vecchie e di maggiori dimensioni, quindi, l'ordine p sembra spostarsi verso valori superiori, indicando nel primo caso che con la vetustà (come nel caso di VCH, PNA, LAT) la crescita diventa meno legata all'anno precedente ed emergono delle ciclicità di ordine maggiore, e nel secondo che la fertilità rende meno dipendenti gli alberi dalle sostanze di riserva accumulate durante la stagione precedente.

L'analisi multivariata è stata effettuata sull'intervallo temporale 1908 - 1988, limitato superiormente da alcune cronologie più vecchie (Biondi, 1992) e non ancora aggiornate: sebbene la lunghezza minima richiesta per la calibrazione dovesse essere di 51 anni, si è scelto di utilizzare un periodo di 81 anni sia perché è auspicabile

avere un rapporto osservazioni/variabili elevato (alcuni autori suggeriscono 3:1; vedi Jackson, 1993), sia per considerare un periodo di tempo sufficientemente lungo tale da evitare l'effetto di variazioni climatiche di medio periodo. La matrice finale è risultata così formata da 36 faggete, con l'esclusione di Monte Petrella, La Motta e Pechinie che, a causa della loro brevità, verranno analizzate singolarmente.

La classificazione prodotta dall'HCA mostra una chiara strutturazione all'interno della Rete dendroclimatica dovuta alla maggiore o minore affinità tra cronologie, dettata principalmente dalla vicinanza geografica e dall'altitudine dei siti (Figura 3). La prima cosa che risalta nel dendrogramma è la distinzione di due grandi raggruppamenti, quello delle faggete centro-meridionali e quello delle faggete dell'Appennino Settentrionale e delle Alpi. All'interno di ciascuno di essi c'è un popolamento, Montalto 1900 (MO2) nel primo e Nimis (NIM) nel secondo, che rimane nettamente isolato dagli altri a causa delle sue peculiarità stazionali: la faggeta della cima di Montalto d'Aspromonte, appartenente al *Fagetum* freddo, gode di un particolare regime pluviometrico, caratterizzato da abbondanti precipitazioni annue, mentre quella di Nimis (*Castanetum* freddo) è una faggeta collinare delle Prealpi Giulie posta a quota inferiore rispetto alle altre stazioni alpine. Al di là di queste singolarità, la Rete si struttura molto bene in accordo alle correlazioni fra cronologie, che raggiungono il valore massimo fra i due siti di quota centro-appenninici VCH e PNA ($r = 0.85$): l'ordinamento gerarchico fa sì che si possano identificare diverse classi di raggruppamento caratterizzati da successivi livelli di distanza.

Nel raggruppamento centro-meridionale il primo gruppo che si incontra è formato dalle stazioni vegetanti tra i 1600 ed i 1850 m in Aspromonte e Sicilia (MO1, MAD e ETN), che rappresentano i popolamenti posti a quote abbastanza alte (pur non raggiungendo i limiti della vegetazione) in questo settore sud-occidentale del Mezzogiorno, in cui ricade il limite meridionale dell'areale della specie. Il primo ed il terzo vegetano nel *Fagetum* caldo, il secondo nel *F.* freddo; tutti sono accomunati dal fatto di essere posti ad una notevole vicinanza al mare e di appartenere alla sub-regione climatica sud-occidentale, distinta dal resto della Penisola per il suo regime pluviometrico (Brunetti *et al.*, in stampa). Per le loro peculiarità i membri di questo

gruppo sono definiti, quindi, come “faggete montane sud-occidentali” e rimangono separate dai gruppi successivi.

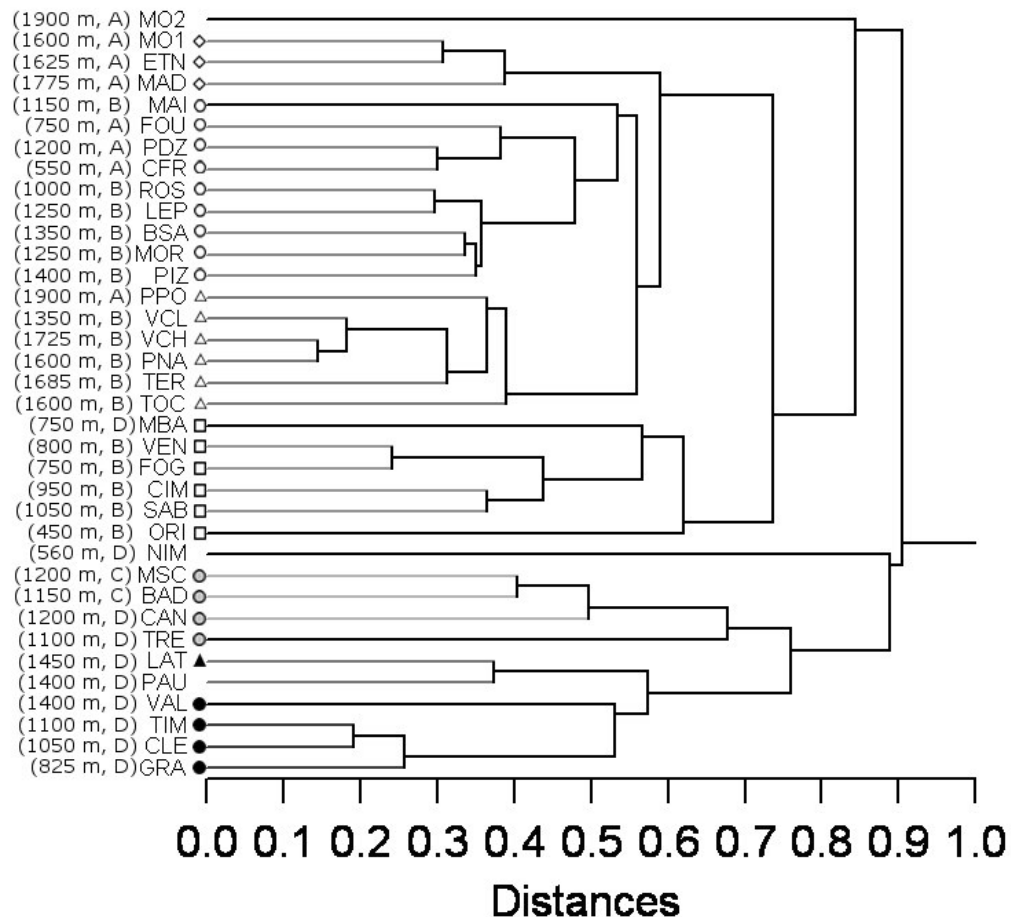


Figura 3. Dendrogramma dell’Analisi Gerarchica Agglomerativa (HCA) effettuata sulla matrice delle medie stazionali (per i codici vedi tabella 1) sul periodo 1908 – 1988. A sinistra di ogni codice sono riportati, in parentesi, la quota media e la regione di appartenenza (per le lettere, vedi tabella 2). I simboli alla destra dei codici rappresentano il gruppo di appartenenza.

Il secondo gruppo è costituito da faggete presenti nella porzione centro-meridionale della penisola tra i 500 ed i 1450 m s.l.m.; al suo interno, si nota una maggiore affinità tra i siti più strettamente meridionali (CFR, PDZ e FOU) e tra quelli dell’Italia centrale (ROS, LEP, BSA, MOR, PIZ), mentre rimane un po’ isolato MAI. Nel complesso, in questo gruppo troviamo le “faggete montane centro-meridionali”, tipiche della fascia altitudinale compresa fra i 1000 ed i 1400 m ed ascrivibili al *Fagetum* caldo; fanno eccezione le faggete meridionali che, tranne PDZ che si trova in transizione tra il *Fagetum* caldo ed il *Castanetum* freddo, vegetano nel

Castanetum caldo ed il cui legame a questo gruppo può essere ricondotto alle peculiarità stazionali di ognuna. Infatti sia CFR che FOU sono caratterizzate da un notevole atlantismo causato dalla vicinanza alla linea di costa e dalla presenza di correnti aeree provenienti dal mare: in particolare, per Cinquefrondi bisogna ricordare sia l'abbondanza delle precipitazioni dell'Aspromonte (già riportate a proposito di MO2) sia la presenza di correnti fresche marine provenienti da NO ed interessanti i versanti tirrenici dell'Appennino Calabrese, mentre la Foresta Umbra gode del benefico effetto di correnti provenienti da N che, cariche di umidità dopo aver attraversato l'Adriatico, contribuiscono al bilancio idrico dei faggi posti sul versante settentrionale del promontorio del Gargano, permettendone l'espansione a quote molto basse (Hofmann, 1991). Bisogna anche ricordare che FOU, grazie alla sua posizione, è particolarmente esposta ai venti freddi orientali, soprattutto se si considera il minor potere termoregolante del Mar Adriatico. Infine, è da notare che le faggete aspromontane sotto i 1200 m appartengono a questo gruppo piuttosto che a quello delle faggete montane sud-occidentali, alle quali va aggiunto quindi, oltre al discorso legato al regime pluviometrico, l'effetto della quota.

Nel terzo gruppo ci sono quelle che possono definirsi "faggete di quota o altomontane", tutte attribuite da Pavari al *Fagetum* freddo, estese tra i 1600 ed i 2000 m fino a raggiungere il locale limite superiore della vegetazione forestale (PPO, VCH, PNA, TER, TOC); unica eccezione è VCL, che essendo a 1350 m appartiene al *F.* caldo, ma che si lega a questo gruppo sia per la vicinanza con VCH sia, soprattutto, per il fatto di spingersi con alcuni campioni al limite inferiore della fascia soprastante. E' importante notare che scendendo verso sud le fasce fitoclimatiche, così come i limiti altimetrici del faggio, si innalzano: mentre la faggeta del Pollino raggiunge i 2000 m, le altre cronologie in Italia Centrale portano lo stesso segnale climatico pur essendo a quote più basse (1600 - 1850 m). Per spiegare questo fenomeno, oltre al graduale aumento delle temperature con il procedere verso l'equatore, bisogna ricordare che le popolazioni laziali e abruzzesi vegetano in stazioni appartenenti alla dorsale appenninica o preappenninica, caratterizzate da una maggiore continentalità, mentre il Massiccio del Pollino può godere di un maggior livellamento termico grazie alla vicinanza del Mar Tirreno e del Mar Ionio. Sebbene quest'ultima caratteristica accomuni PPO alle faggete montane sud-occidentali

precedentemente citate, essa rimane separata dal gruppo delle faggete sud-occidentali, innanzitutto perché non appartiene alla sub-regione climatica sud-occidentale, poi perché è posta circa 200 km più a nord ed a quota leggermente superiore, con posizione più orientale che la espone, come nel caso della Foresta Umbra, all'effetto diretto dei venti freddi provenienti da est.

Dalle stazioni fin qui citate si distinguono quelle che formano il gruppo di faggete collinari (ORI) e basso-montane (VEN, FOG, CIM, SAB, MBA), la cui quota oscilla tra i 300 ed i 1050 m e che nel complesso possono essere definite “faggete basali”. Tutti i membri di questo gruppo appartengono al Lazio, tranne MBA che cresce in Lombardia nei pressi del Lago di Como, il cui legame a questo gruppo è sicuramente dovuto alla mitezza del clima dell'Insubria, che dona caratteri di mediterraneità alla vegetazione in essa presente (Pignatti, 1995) ed alla sua altitudine non eccessivamente elevata. Anche le stazioni laziali di bassa quota (ORI, VEN e FOG) sono tutte collocate nei pressi di laghi, di origine vulcanica, in stazioni caratterizzate da nebbie e da buona umidità atmosferica. Mentre queste ultime fanno parte del *Castanetum* caldo, MBA insieme alle rimanenti due stazioni laziali basso-montane (SAB, CIM) oscillano tra il *C.* freddo ed il *Fagetum* caldo. E' da sottolineare ancora che, nonostante la quota, il topoclima di FOU e CFR le spinge verso la fascia dendroclimatica superiore rispetto a queste stazioni che, anche se poste più in alto, godono meno delle correnti marine umide e termicamente livellate; il tutto è enfatizzato se consideriamo che CFR è la stazione collinare più meridionale.

Passando al raggruppamento delle faggete settentrionali (appenniniche ed alpine), troviamo al suo interno un primo gruppo formato dalle cronologie dell'Appennino tosco-romagnolo (BAD e MSC) a cui va a legarsi la faggeta del Cansiglio; tutte queste stazioni sono comprese tra i 1000 ed i 1300 m circa. Ad esse si associa, ma tenendosi a debita distanza, Tre Confini, stazione prossima a Tarvisio, al confine tra Italia, Austria e Slovenia, che fa parte di un bacino idrografico tributario del Danubio e caratterizzata da notevoli freddi invernali. Questo gruppo, costituito da faggete del *Fagetum* caldo e definibili come “transitorie” tra l'Appennino Settentrionale e le Alpi, riveste particolare importanza dal punto di vista fitogeografico, perché secondo alcuni autori nell'Appennino Settentrionale ricade il limite tra il bioma mediterraneo e quello medioeuropeo (Pignatti, 1979). In particolare, qui emerge che queste faggete

dell'Appennino Tosco-Romagnolo sono legate maggiormente a quelle alpine, come il Cansiglio, piuttosto che ai popolamenti vegetanti a quote simili più a sud nella penisola.

Un'altro gruppo è formato dalle due faggete di quota carniche, LAT e PAU (1300 – 1500 m s.l.m.), ascritte al *Fagetum* freddo e poste al limite altitudinale superiore del faggio, il che evidenzia l'esistenza di una fascia di “faggete altomontane alpine”. Infine, l'ultimo gruppo è composto dalle stazioni comprese tra i 750 ed i 1300 m nelle Alpi Carniche (nonostante il campo di variazione di altitudine, la maggior parte degli alberi campionati a Timau risiedeva tra gli 800 ed i 1300 m, da cui la quota media riportata di 1100 m) appartenenti tutte al *Fagetum* caldo tranne Valzurio, 1430 - 1480 m nelle Alpi Centrali (*Fagetum* freddo), che nel complesso formano la fascia delle “faggete montane alpine”. Nel confronto con le faggete carniche Valzurio rimane legata alla fascia montana invece che avvicinarsi alle stazioni di quota, sottintendendo un cambiamento nell'organizzazione fitoclimatica procedendo da est a ovest nelle Alpi, probabilmente in relazione a variazioni nel regime pluviometrico e nella continentalità del clima.

Dalla classificazione dendroclimatica effettuata dall'HCA emerge chiaramente la separazione spaziale delle nostre faggete in due zone fitoclimatiche, una centro-meridionale ed una settentrionale, che porta ad una divisione fra popolamenti anche se posti a quote simili ed appartenenti alle stesse zone fitoclimatiche di Pavari. All'interno di ciascuna zona le cronologie sono state distinte in fasce altitudinali in base alla loro quota. La nostra classificazione fitoclimatica, comunque, rispecchia in via generale quella di Pavari, associando tra loro popolamenti appartenenti alla stessa zona e sottozona; però, al tempo stesso, vi aggiunge ulteriori importanti informazioni che forniscono una maggiore risoluzione a questo metodo. In particolare, oltre alla distinzione in zone, emerge come fattore aggiuntivo determinante l'oceanicità stazionale, dipendente soprattutto dalla lontananza dalla linea di costa e dal moto delle correnti marine portatrici di umidità, capace di alterare localmente i rapporti altitudinali fra fasce o creando dei veri e propri gruppi autonomi all'interno di una determinata zona. Inoltre sono state isolate alcune singolarità presenti nell'organizzazione della Rete, che non hanno trovato posto in nessuna delle unità individuate.

La classificazione prodotta è stata poi affiancata dall'Analisi delle Componenti Principali per identificare i principali modi di variabilità della crescita all'interno della nostra matrice ed i segnali climatici che ne sono responsabili. Innanzitutto, si è deciso di non utilizzare in questa analisi della varianza comune MO2 e NIM che, non mostrando alcuna affinità sostanziale con le altre serie, sono state studiate separatamente. In questo modo si è cercato di mantenere il più puri possibile i segnali che accomunano i diversi popolamenti, evitando il rumore potenzialmente apportabile da queste due singolarità.

Le prime tre componenti estratte dalle rimanenti 36 cronologie stazionali, che nel complesso spiegano il 55.5% della varianza totale originale, sono state ritenute sufficienti per descrivere le principali modalità di crescita presenti all'interno della Rete. La correlazione di ogni cronologia con ciascuna componente è stato rappresentato mediante dei grafici in cui gli assi sono le componenti ed i valori i relativi pesi; ad ogni serie è stato associato un simbolo relativo alla zona e fascia dendroclimatica di appartenenza individuata in base ai gruppi differenziati dall'HCA (Figura 3).

Il primo fatto che emerge è che rispetto alla prima componente (PC1), responsabile del 33% della varianza spiegata, che generalmente accomuna tutte le variabili (Jolliffe, 1986) e che in questi studi generalmente sottende l'effetto del macroclima regionale, la quasi totalità dei popolamenti alpini ha punteggio prossimo allo zero (Figura 4a); gli stessi sono invece molto ben correlati alla seconda componente (PC2, 13.7% della varianza originaria), su cui i popolamenti appenninici hanno punteggio pressoché nullo. Questa situazione è ben rappresentata in Figura 4a dalla contrapposizione delle cronologie centro-meridionali (in bianco) appartenenti alle fasce montana centro-meridionale, montana sud-occidentale e altomontana, con quelle alpine (in nero) appartenenti alle fasce montana ed altomontana. Questo fatto è particolarmente interessante perché costituisce un'ulteriore dimostrazione della separazione esistente tra faggete peninsulari e faggete alpine e, nel contesto della PCA, sta a significare che esiste un fattore climatico che influenza la crescita di tutte le faggete centro-meridionali, da quelle di quota a quelle basali, ma che non tocca le

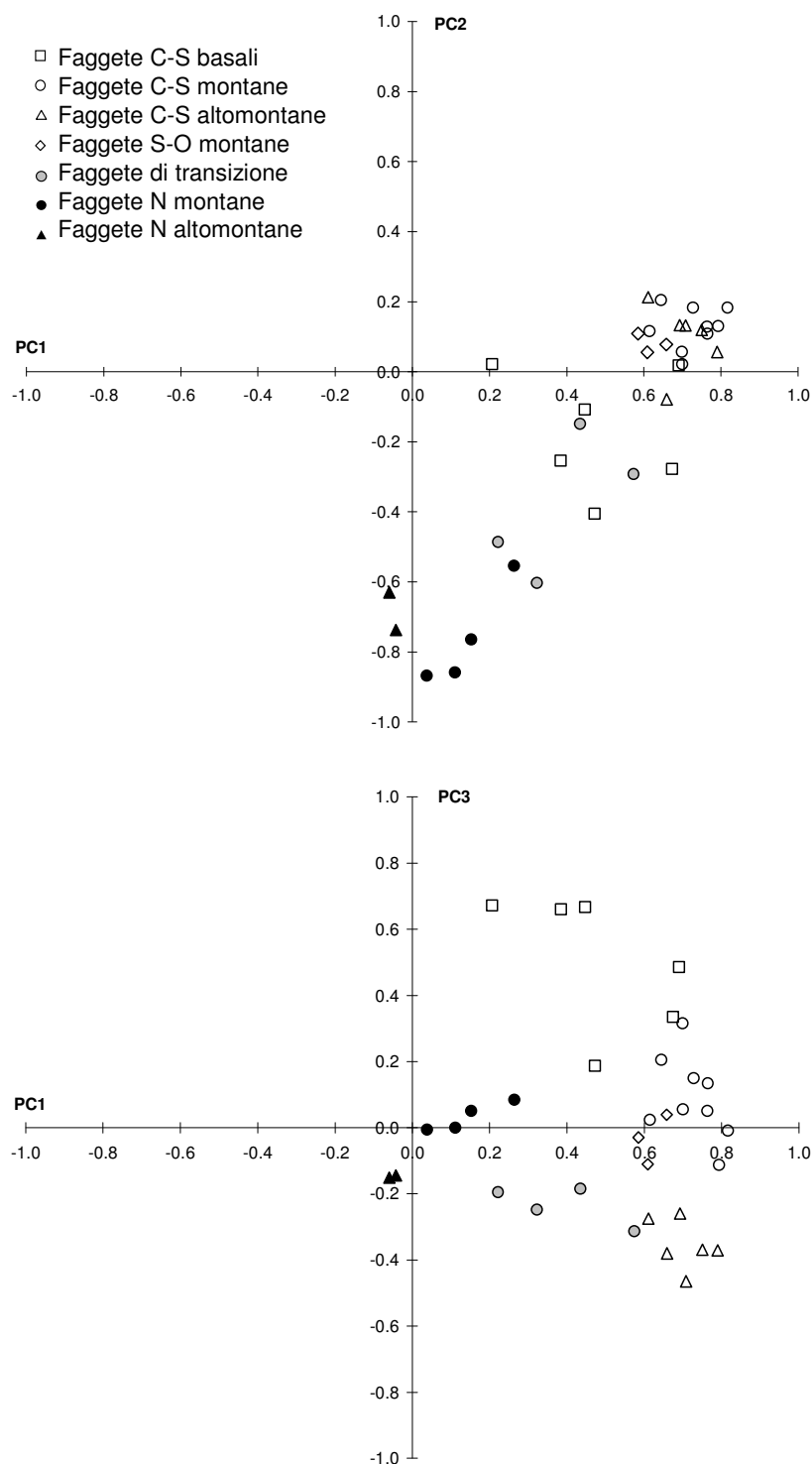


Figura 4. Pesì delle medie stazionali su ciascuna delle prime tre componenti principali estratte dalla matrice del periodo comune 1908 - 1988, rappresentati confrontando a) la prima e la seconda componente e b) la prima e la terza componente. I simboli, riportati in figura3, si riferiscono alla classificazione effettuata dall'HCA.

faggete alpine (e viceversa). I due raggruppamenti sono legati dal gruppo di transizione che in questa analisi (più che nell'HCA) mostra dei veri e propri caratteri di transitorietà, legandosi sia alla PC1, con le due faggete montane dell'Appennino Settentrionale, sia alla PC2, con Cansiglio e Tre Confini; è da notare che nella PCA, diversamente dall'HCA, le faggete dell'Appennino Tosco-Romagnolo si legano a quelle centro-meridionali piuttosto che alle alpine.

Nel quadro delineato si colloca come perfetto punto di congiunzione fra le due zone la stazione insubrica di Monte Barro, correlato in maniera simile alla prima ($r = 0.47$) ed alla seconda ($r = 0.41$) componente, a significare la presenza di entrambi i segnali nella serie di ampiezze anulari. Le altre stazioni collinari e basso-montane laziali, invece, sono legate solo con la prima componente, in maniera forte CIM e SAB ma indebolendosi con la diminuzione della quota, fino a raggiungere la stazione collinare di Oriolo Romano, che non trova un sufficiente punteggio su nessuno dei primi due assi. Da qui l'esigenza di un terzo asse (PC3, 8.8% della varianza totale) per completare l'interpretazione della Rete, il quale esprime un segnale che interessa principalmente le stazioni poste a quote più basse presso i laghi laziali (ORI, FOG, VEN), con effetto minore su quelle appartenenti allo stesso gruppo ma poste a quota superiore (CIM e SAB), che possono quindi essere considerate intermedie tra la prima e la terza componente (Figura 4b). La faggeta della Foresta Umbra tende ad essere influenzata in parte ($r = 0.32$) da questo segnale, che rimane però debole, ma il peso maggiore di PC1 fa sì che nell'HCA essa ricada nella fascia montana. Contrariamente a quanto osservato nell'HCA, dove era legata alle faggete basali laziali, MBA mostra ora scarso legame con questa componente ($r = 0.19$), preferendole PC1. Il resto delle serie non è minimamente interessato dalla PC3, tranne le faggete altomontane mediterranee che hanno con essa una lieve relazione inversa, a dimostrare un comportamento opposto nei confronti degli stessi fattori climatici rispetto ai popolamenti basali.

Nel complesso, la separazione delle principali modalità di crescita effettuata con la PCA mette in luce ancora una volta l'esistenza di due zone dendroclimatiche, una alpina ed una centro-meridionale, con i popolamenti basali di quest'ultima che necessitano di un ulteriore asse per raggiungere un'interpretazione esauriente. Esiste inoltre un'area di transizione tra le due, formata essenzialmente dalle faggete

dell'Appennino Settentrionale, che contengono soprattutto il segnale centro-meridionale ma che mostrano legami con siti di entrambe le zone, a cui si uniscono le faggete del Cansiglio e di Tre Confini, legate principalmente alla PC2 che hanno solo rari e flebili rapporti con le faggete mediterranee. Poiché queste serie sono prima di tutto correlate fra di loro (particolarmente BAD, MSC e CAN, com'è evidente nell'HCA), si può presupporre che esista un vero e proprio “segnale di transizione”.

L'analisi delle funzioni di correlazione e risposta è servita a mettere in luce i fattori climatici che influenzano la variabilità di ciascuna componente e che rappresentano il principale segnale responsabile della crescita nelle unità bioclimatiche individuate. In particolare, la PC1 è correlata direttamente alle precipitazioni ed inversamente alle temperature dei mesi estivi e mostra, inoltre, un fabbisogno di pioggia durante il luglio dell'anno precedente la formazione dell'anello (Tabella 6): appare evidente che il segnale che emerge è essenzialmente legato allo stress idrico del periodo estivo, con legame particolarmente forte con le precipitazioni di giugno. Le precipitazioni del luglio precedente sono connesse al fenomeno dell'induzione fiorale, la cui entità è direttamente correlata alla siccità estiva, e che può provocare durante la stagione vegetativa seguente ingenti sottrazioni di fotosintetati alla crescita per alimentare la pasciona del faggio (Piovesan e Adams, 2001). La zona dendroclimatica centro-meridionale può, essere definita quindi “zona mediterranea”, poiché tutti le faggete che crescono al suo interno, dalla collina fino al limite della vegetazione, risentono dello stress idrico estivo.

L'analisi delle teleconnessioni mostra come questo segnale di mediterraneità interessi soprattutto le faggete peninsulari centro-meridionali fino all'Appennino Settentrionale, dove comincia a diminuire, mostrando ancora la sua presenza nella regione insubrica, non influenzando sulla crescita dei popolamenti alpini (Figura 5). Oltre i confini nazionali, esso è ancora ben presente nelle faggete collinari e montane delle Alpi Dinariche e nelle faggete collinari del sud-est della Slovenia, sparendo nei popolamenti austriaci.

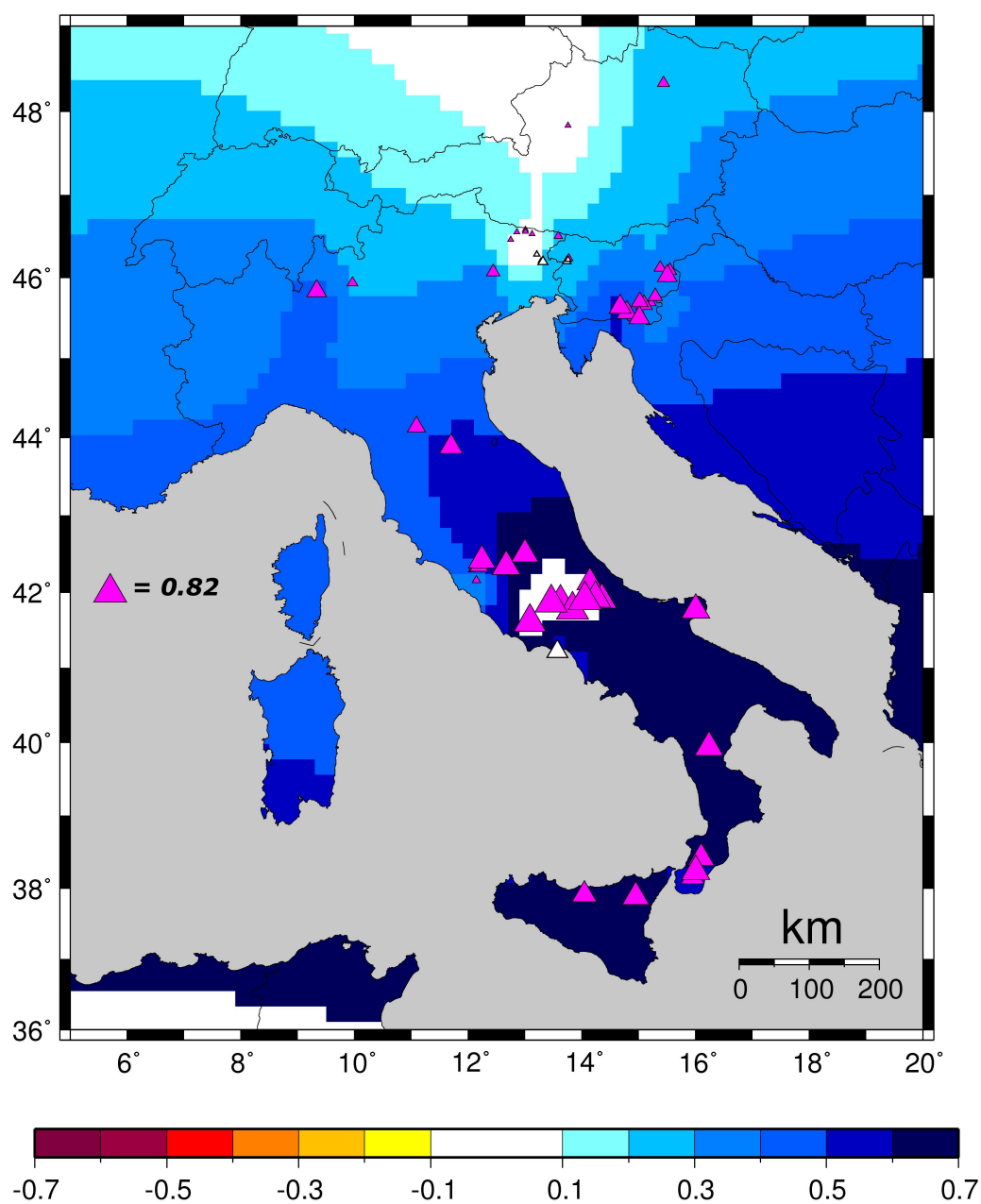


Figura 5. Estensione geografica del segnale climatico contenuto nella PC1. Le dimensioni dei triangoli indicano il grado di correlazione tra i punteggi della PC1 e le cronologie di faggio della Rete Nazionale (ossia il loro peso sulla componente) e quelli oltre confine; in bianco sono riportate le serie più brevi del periodo di confronto 1908-1988. Ai punti è stata interpolata una superficie in cui le tonalità di colore servono a rappresentare la distribuzione spaziale delle correlazioni.

Tabella 6. Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione (a) e di risposta (b) tra i punteggi delle prime tre componenti principali e le variabili climatiche mensili calcolate sul periodo 1908 - 1988.

a		Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
		GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
PC1	P		0.21											0.41	0.32	0.32		
	Tmax													-0.29	-0.30	-0.35		
	Tmin														-0.22	-0.26		
PC2*	P		0.28															
	Tmax		-0.34				0.26				-0.33							
	Tmin		-0.32	-0.23							-0.21							
PC3	P												0.32					
	Tmax											0.21	-0.49	-0.36	-0.36	-0.24		
	Tmin												-0.35	-0.30	-0.28			0.25

b		Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
		GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
PC1	P														0.20			
	Tmax																	
	P														0.23			
	Tmin																	
PC2*	P																	
	Tmax		-0.20				0.23				-0.27							
	P										0.19							
	Tmin		-0.24								-0.21							
PC3	P																	
	Tmax												-0.35	-0.16	-0.20			
	P																	
	Tmin												-0.26					

* = poiché i pesi su questa componente erano negativi, a questi coefficienti è stato cambiato il segno per semplificare la spiegazione nel testo

I popolamenti alpini (PC2), invece, sembrano essere poco influenzati direttamente dal clima della stagione vegetativa in corso, essendo una correlazione inversa con le temperature di marzo l'unica ad apparire durante l'anno di formazione dell'anello (Tabella 6): questo fattore può essere collegato al rischio di subire un danno da gelate tardive sui getti formati precocemente in caso di un insolito calore in questo mese. Anche in questo caso troviamo l'effetto del luglio precedente sulla pasciona, a cui si unisce il ruolo delle temperature (anche di agosto) in opposizione a quello delle precipitazioni; inoltre, c'è un legame diretto con le temperature del novembre precedente la crescita, il che potrebbe essere dovuto ad un fabbisogno di calore autunnale per i processi relativi alla formazione ed all'accumulo delle sostanze di riserva da utilizzare l'anno seguente.

Questo segnale climatico alpino, caratterizzato fondamentalmente da fattori termici precedenti l'inizio della stagione vegetativa e dall'induzione fiorale, rimane localizzato nelle nostre cronologie alpine e prealpine raggiungendo il massimo nelle Alpi Orientali, non si espande verso sud ed è ancora presente nel versante sloveno delle Alpi Giulie e nelle faggete di quota sulle Alpi Calcareae Settentrionali in Austria (Figura 6).

Nelle funzioni relative alla terza componente (PC3), caratteristica delle faggete collinari e basso-montane laziali, troviamo ancora l'influenza negativa delle temperature dei mesi estivi, a cui si aggiunge una correlazione diretta con le precipitazioni di maggio ed una inversa con le temperature dello stesso mese (Tabella 6): scendendo di quota, quindi, rimane l'effetto della siccità estiva, che però viene anticipata di un mese per effetto delle temperature medie maggiori. Infatti, i popolamenti a quote inferiori entrano in vegetazione prima e già a maggio hanno chiome ben sviluppate, cosa che li rende più dipendenti dal bilancio idrico stagionale. La correlazione positiva con le temperature di aprile sottintende invece il fabbisogno di calore in primavera per effettuare una crescita vigorosa, mentre il legame con ottobre indica che se le temperature minime si mantengono abbastanza elevate questi popolamenti possono prolungare la crescita radiale anche fino all'inizio dell'autunno. Nel complesso, maggio rimane il mese più importante per queste faggete, mostrando valori elevati soprattutto nei confronti delle temperature massime, ed è questo

probabilmente il vero fattore differenziale rispetto alla PC1 che rappresenta, quindi, una modulazione mediata dall'altitudine dello stesso segnale di mediterraneità.

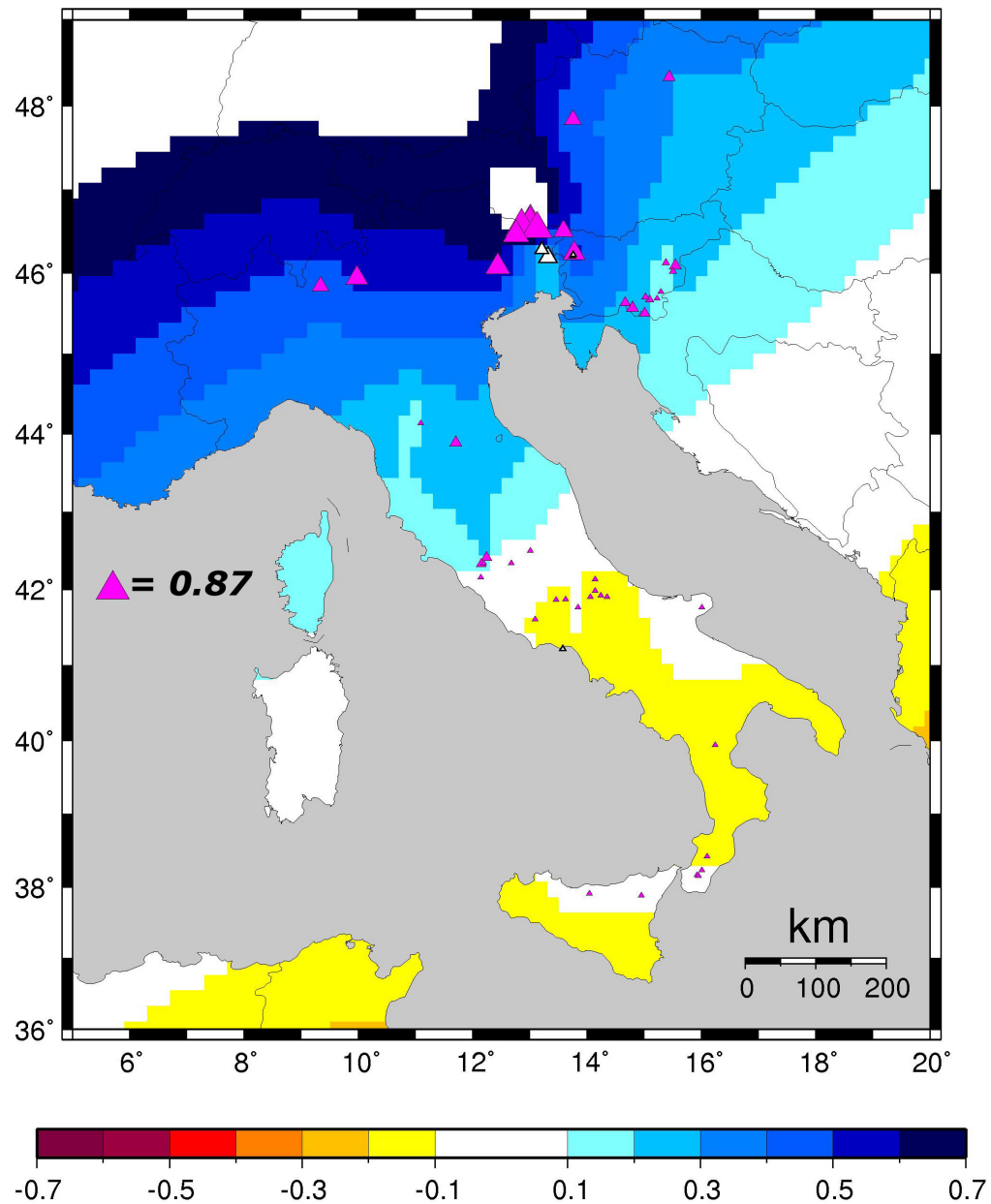


Figura 6. Estensione geografica del segnale climatico contenuto nella PC2. Le dimensioni dei triangoli indicano il grado di correlazione tra i punteggi della PC2 e le cronologie di faggio della Rete Nazionale (ossia il loro peso sulla componente) e quelli oltre confine; in bianco sono riportate le serie più brevi del periodo di confronto 1908-1988. Ai punti è stata interpolata una superficie in cui le tonalità di colore servono a rappresentare la distribuzione spaziale delle correlazioni.

Questa analisi ha fatto emergere i segnali differenziali delle due zone, mettendo in evidenza che la crescita dei popolamenti mediterranei è strettamente limitata dalla siccità estiva, e che quella dei popolamenti alpini non ha particolari vincoli durante la stagione di crescita, ma è condizionata dalle condizioni termiche dei mesi precedenti la crescita.

Dopo aver identificato mediante la PCA e le funzioni di correlazione e risposta le zone dendroclimatiche proprie del territorio coperto dalla nostra Rete Dendroecologica ed i relativi segnali climatici, il secondo passo è stato quello di studiare le fasce altitudinali esistenti all'interno di ciascuna zona e la relativa estensione in quota, come già fatto con l'HCA, aggiungendo a questa lo studio dei fattori climatici. A questo proposito si è deciso di effettuare la rotazione VARIMAX su due matrici distinte: una per tutte le serie legate alla PC1 e alla PC3 (appartenenti alla zona mediterranea), ed una con le serie legate alla PC2 (appartenenti alla zona alpina). MBA, con punteggio simile su entrambe le componenti è stato inserito in entrambe le matrici per studiarne il comportamento; le quattro faggete di transizione hanno preso parte interamente alla matrice alpina, mentre solo i due popolamenti dell'Appennino Settentrionale hanno partecipato alla matrice mediterranea, essendo gli unici a correlarsi con la PC1. La scelta di dividere la banca dati iniziale è stata dettata dall'esigenza di enfatizzare quanto più possibile grazie alla VARIMAX le diversità presenti all'interno di ciascuna zona dendroclimatica, in modo da poter isolare al meglio i segnali differenziali di ogni fascia altitudinale trascurando i rapporti con serie che non hanno alcun legame con l'insieme considerato.

Questo passo ha portato alla separazione di cinque fasce dendroclimatiche all'interno della zona mediterranea (responsabili del 71.5% della varianza totale) e tre fasce per quella alpina (69.6% della varianza totale); integrando questa informazione con quella portata dalla PCA, si può confrontare e spiegare la classificazione operata dall'HCA. Nella zona mediterranea il primo asse corrisponde alla fascia dendroclimatica delle faggete altomontane, il secondo a quella delle faggete basali, il terzo alle faggete montane sud-occidentali, il quarto alle faggete montane dell'Appennino Settentrionale ed il quinto alle faggete montane centro-meridionali (Tabella 7). Viene quindi confermata la classificazione fatta dall'HCA

per i popolamenti centro-meridionali; inoltre la separazione di un'area di transizione suggerisce che, come sospettato, essa possiede un proprio segnale climatico che la distingue dalle altre fasce.

Tabella 7. Pesi delle medie stazionali appartenenti alla zona mediterranea sulle componenti principali estratte mediante rotazione VARIMAX (periodo 1908 - 1988).

	1	2	3	4	5
VCH	0.86	-0.06	0.31	0.03	0.21
PNA	0.83	0.08	0.24	0.14	0.28
TER	0.83	0.14	0.13	0.10	0.13
TOC	0.74	0.08	-0.08	0.04	0.34
VCL	0.71	-0.02	0.32	0.19	0.32
PPO	0.68	0.12	0.32	0.15	0.19
FOG	0.07	0.90	0.02	-0.07	0.10
VEN	0.06	0.85	0.15	-0.11	0.18
CIM	0.25	0.67	0.14	0.26	0.32
ORI	-0.30	0.64	0.14	0.12	0.15
MBA	0.37	0.61	-0.12	0.23	0.08
MO1	0.24	0.07	0.85	-0.03	0.15
ETN	0.15	0.14	0.79	0.21	0.26
MAD	0.22	0.03	0.69	0.30	0.21
PDZ	0.25	0.12	0.54	-0.02	0.51
MSC	0.05	0.04	0.22	0.81	0.17
BAD	0.37	0.08	-0.01	0.76	0.25
LEP	0.23	0.19	0.14	0.24	0.77
ROS	0.20	0.15	0.23	0.07	0.77
BSA	0.42	0.15	0.23	0.22	0.66
MAI	0.24	0.09	0.01	0.27	0.65
SAB	0.08	0.50	0.23	0.01	0.65
PIZ	0.27	0.17	0.30	0.31	0.61
MOR	0.47	0.10	0.18	0.27	0.61
CFR	0.15	0.16	0.48	-0.13	0.60
FOU	0.23	0.37	0.43	-0.19	0.55
Varianza spiegata (%)	19.0	13.0	12.8	7.7	18.9

Rispetto all'HCA fanno eccezione PDZ, che qui è legato alle faggete montane sud-occidentali piuttosto che alle montane centro-meridionali, e SAB, qui più vicina alle faggete montane centro-meridionali che a quelle basali; in effetti, quel che si nota è che, sebbene lo scopo della rotazione VARIMAX sia quello di ottenere componenti tra loro ortogonali con punteggi o molto alti oppure prossimi allo zero, in modo da vincolare ogni singola variabile ad un unico asse, qui qualche sito ha

punteggio su due componenti, mostrando ancora una volta l'esistenza di stazioni con caratteristiche intermedie. Ad esempio, oltre a PDZ anche FOU e CFR hanno un legame con il gruppo sud-occidentale, pur mantenendo una correlazione maggiore con le faggete montane centro-meridionali, a suggerire che esiste una sottozona (nel senso di regione inclusa in una zona dendroclimatica, non in quello attribuitogli da Pavari) meridionale, che accomuna faggete poste a quote molto diverse, con l'esclusione di PPO. Allo stesso tempo FOU ha qualche debole legame con le faggete basali, come ci si aspetta considerando la quota a cui è posta e, allo stesso modo, SAB si avvicina più alle faggete della fascia superiore. In effetti, le variazioni ora osservate si riscontrano anche nel dendrogramma considerando il livello medio di correlazione fra elementi di uno stesso gruppo e della conseguente omogeneità delle fasce. La classificazione rimane, comunque, valida e fondamentale per ripartire nettamente i popolamenti in base al segnale dominante che portano, sebbene la PCA ruotata consenta di "purificare" i segnali differenziali, affinando il livello di analisi facendo emergere oltre alla distinzione fra fasce le caratteristiche intermedie di alcune stazioni.

A questo punto va specificata la differenza precedentemente introdotta fra comportamento "intermedio" e comportamento "di transizione": mentre il primo esprime l'influenza su di una stessa cronologia stazionale di più segnali identificati in diverse unità fitoclimatiche, il secondo implica l'esistenza di un proprio segnale differenziale posseduto da un gruppo di cronologie stazionali correlate a diverse unità fitoclimatiche.

Anche in questo caso sono state analizzate le funzioni di correlazione e risposta alla ricerca dei fattori climatici differenziali di ciascuna fascia (Tabella 8). Le faggete mediterranee altomontane (PX1s), pur mantenendosi legate a fattori connessi alla siccità estiva, come il fabbisogno di precipitazioni invernali (febbraio) e l'induzione florale (correlazione diretta con le precipitazioni di giugno e agosto precedenti ed inversa con le temperature di luglio ed agosto precedenti), mostrano una correlazione negativa con le temperature di aprile e positiva con quelle di maggio. Appare quindi evidente come la temperatura acquisti importanza salendo in quota, soprattutto all'inizio della stagione vegetativa: in particolare un aprile freddo può ritardare l'entrata in vegetazione, minimizzando il rischio di danno da gelata tardiva a cui il

faggio, specie oceanica, è sensibile, mentre a maggio è importante che ci sia calore sufficiente per sostenere al massimo il metabolismo in questo periodo di risveglio e vigore vegetativo.

Le faggete basali (PX2s), come visto per PC3, sono caratterizzate dall'effetto negativo di temperature elevate durante il periodo tardo primaverile - estivo, con particolar enfasi nel mese di maggio in cui anche le precipitazioni sono gradite, che rappresenta il segnale differenziale di questa fascia; appare in marzo, inoltre, un legame inverso con le temperature di marzo, perché troppo caldo in questo periodo può comunque sottoporre questi boschi al rischio di gelate tardive. Anche la faggeta insubrica di Monte Barro è collegata a questo segnale, sebbene nella PCA non ruotata fosse legata alla PC1 piuttosto che alla PC3.

Le faggete sud-occidentali (PX3s), invece, sono correlate solo con le precipitazioni di giugno in maniera positiva: questo singolo fattore emergeva come l'unico o il più forte anche nelle funzioni di risposta individuali di queste cronologie (dati non mostrati) e potrebbe suggerire che l'aumento delle temperature e la diminuzione della quantità di pioggia che si osserva scendendo verso il meridione sottopongono il faggio ad uno stress idrico estivo crescente, per cui le condizioni meteorologiche di luglio ed agosto rimangono generalmente ostiche e possono influenzare meno la crescita, soprattutto in rapporto alle faggete montane centrali (che infatti sono più correlate alla PC1). In questo contesto giugno potrebbe costituire un mese chiave per realizzare una parte importante della crescita radiale oppure per ostacolarla in caso di estati già precocemente siccitose.

Passando alle faggete di transizione (PX4s), sono presenti diversi segnali che riguardano il fabbisogno di calore, a settembre per prolungare la stagione vegetativa o a gennaio per stimolare la crescita o per sfuggire ai danni da freddo. Correlazione diretta c'è anche con l'ottobre ed il novembre precedenti, che potrebbero essere legati, come già visto per la PC2, alla movimentazione delle sostanze di riserva, e con il luglio dell'anno precedente. Quest'ultimo fattore, in particolare, si oppone a quanto osservato finora circa il legame tra induzione fiorale, siccità estiva della stagione precedente: questo fabbisogno di calore nell'estate precedente la formazione dell'anello non ha ancora una spiegazione definitiva, ma potrebbe essere legato all'attivazione di particolari cicli biogeochimici oppure alla movimentazione di

Tabella 8. Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione (a) e di risposta (b) tra i punteggi delle prime 5 componenti principali ruotate estratte dalla matrice delle faggete mediterranee e le variabili climatiche mensili calcolate sul periodo 1908 - 1988.

a		Anno precedente la crescita								Anno di crescita								
		GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
PC1	P	0.21		0.26						0.23								
	Tmax			-0.22								-0.25	0.26					
	Tmin		-0.21	-0.21								-0.30					-0.20	
PC2	P												0.28					
	Tmax									-0.20			-0.40	-0.27	-0.34	-0.29		
	Tmin													-0.26	-0.24			
PC3	P													0.26				
	Tmax																	
	Tmin																	
PC4	P																	
	Tmax		0.23				0.27		0.23								0.21	
	Tmin		0.20			0.22			0.24								0.18	
PC5	P													0.50	0.62	0.33		
	Tmax													-0.40	-0.41	-0.32		
	Tmin													-0.30	-0.30			

b		Anno precedente la crescita								Anno di crescita								
		GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
PC1	P												0.19					
	Tmax																	
	Tmin												0.19					
PC2	P																	
	Tmax									-0.21			-0.27					
	Tmin																	
PC3	P					0.27								0.22				
	Tmax																	
	Tmin													0.23				
PC4	P																	
	Tmax						0.22											
	Tmin								0.19	-0.19								
PC5	P													0.24	0.37			
	Tmax													-0.16	-0.16			
	Tmin													0.27	0.40	-0.15		

sostanze i riserva, che può cominciare parallelamente alla crescita nel periodo estivo.

Per concludere con la zona mediterranea rimangono le faggete montane centro-meridionali (PX5s) che, come già visto per la PC1, con cui sono altamente correlate, sono direttamente legate alle precipitazioni e inversamente alle temperature dei mesi estivi, con legame particolarmente forte con le piogge di giugno e luglio.

Nel complesso la siccità estiva, che è il segnale caratterizzante la zona mediterranea, viene avvertita diversamente a quote differenti, dando vita a queste fasce dendroclimatiche: mentre nelle faggete montane interessa il periodo giugno-agosto, scendendo di quota verso le faggete basali viene anticipato facendosi sentire già a maggio, e nei popolamenti altomontani diviene meno forte lasciando il passo a segnali termici più legati alla quota, come il fabbisogno di caldo primaverile e la necessità di sfuggire alle gelate tardive. Anche la differenziazione delle faggete montane in centro-meridionali e sud-occidentali è probabilmente dovuta a due diverse espressioni del bisogno di precipitazioni nel periodo estivo.

Passando ora alle fasce dendroclimatiche della zona alpina, troviamo un asse per le faggete montane, a cui si uniscono VAL (come nel dendrogramma) e MBA, uno per le faggete di transizione ed uno per le faggete di quota (Tabella 9); TRE si divide equamente tra le faggete di transizione e quelle di quota, probabilmente a causa della sua esposizione alle correnti fredde provenienti da est, mentre TIM si divide fra quelle montane e quelle altomontane, sicuramente perché questa cronologia è stata costruita utilizzando anche campioni vegetanti intorno ai 1400 m.

Le funzioni di correlazione e risposta delle faggete montane (PX1n) mostrano che questi popolamenti sono ancora legati, come nella PC2, al fenomeno della pasciona, che qui diventa il segnale più forte, ed alle temperature di marzo (Tabella 10); si aggiungono, inoltre, una correlazione inversa con le temperature massime di luglio, a testimoniare che a queste quote sulle Alpi può ancora esistere un effetto negativo di temperature estive troppo elevate, ed una con le temperature del settembre dell'anno precedente la crescita, forse perché l'abbassamento di temperatura in questo mese è importante per favorire l'indurimento della pianta e renderla più resistente ai danni da freddo invernale. Compare anche un legame diretto con le minime di Ottobre dell'anno in corso.

Tabella 9. Pesi delle medie stazionali appartenenti alla zona alpina sulle componenti principali estratte mediante rotazione VARIMAX (periodo 1908 - 1988).

	1	2	3
GRA	0.85	0.20	0.21
CLE	0.76	0.10	0.49
MBA	0.72	0.32	-0.22
VAL	0.63	-0.09	0.31
TIM	0.62	0.13	0.60
BAD	0.24	0.85	-0.04
MSC	-0.11	0.85	0.06
CAN	0.31	0.67	0.35
LAT	0.06	0.12	0.86
PAU	0.28	0.03	0.82
TRE	0.14	0.44	0.45
Varianza spiegata (%)	26.0	20.7	22.9

Le faggete di transizione, a cui ora si uniscono anche CAN e TRE e che sono rappresentate sul secondo asse (PX2n), mostrano ancora una volta l'importanza del fattore termico, in particolare la correlazione diretta con le temperature del luglio precedente (a cui qui si associa l'effetto negativo delle piogge) e con le minime dell'ottobre precedente l'inizio della crescita già riportate per PX4s, a cui si aggiunge un fabbisogno di minime elevate in maggio. Questo bisogno di calore primaverile, riscontrato nelle funzioni di correlazione individuali solo per la faggeta del Cansiglio, serve a sostenere la crescita nelle prime fasi della stagione vegetativa. Anche in questo caso, quindi, le faggete di transizione mostrano un proprio segnale climatico distintivo che, nell'ambito delle faggete alpine, mostra ancora di più l'importanza delle temperature, tipica di questa zona.

Per finire, le faggete altomontane conservano alcuni dei caratteri alpini già visti nella PC2, come il legame diretto con le precipitazioni del luglio precedente (pasciona) e con le temperature di novembre (mobilitazione sostanze di riserva), a cui qui si aggiungono quelle di settembre, o inverso con le temperature di marzo; come per le faggete montane, temperature primaverili elevate potrebbero fornire uno stimolo termico ad entrare in vegetazione prima, sottoponendo così le piante al rischio di eventuali gelate tardive. Nel mese di marzo sembrano soprattutto gradite le precipitazioni, cosa che invece non avviene in aprile, dove un eccesso di piogge può

Tabella 10. Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione (a) e di risposta (b) calcolate tra i punteggi delle prime 3 componenti principali ruotate estratte dalla matrice delle faggete alpine e le variabili climatiche mensili sul periodo 1908 - 1988.

a		Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
		GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
PC1	P		0.27															
	Tmax		-0.44		-0.23						-0.23				-0.25			
	Tmin		-0.40								-0.25							0.23
PC2	P		-0.21															
	Tmax		0.28															
	Tmin		0.25			0.18							0.27					
PC3	P		0.27								0.25	-0.23						
	Tmax						0.25			0.27	-0.19				0.25	0.24		
	Tmin				0.22										0.28	0.23		

b		Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
		GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
PC1	P																	
	Tmax		-0.21								-0.24							
	P																	
PC2	Tmin		-0.23								-0.23							
	P																	
	Tmax																	
PC3	P																	
	Tmax		0.20								0.22				0.22			
	P										0.22							
PC3	Tmin													0.25				

saturare il suolo e mal predisporre il faggio, poco tollerante del ristagno idrico, alla ripresa vegetativa. Comunque il fattore climatico che emerge come differenziale per queste faggete di quota è il fabbisogno di calore nel mese di febbraio, necessario per evitare danni da freddo, e nei mesi estivi (luglio e agosto nelle funzioni di correlazione, giugno in quelle di risposta): questo dimostra che, al limite superiore di distribuzione sulle Alpi, durante la stagione vegetativa il calore può non essere adeguatamente sufficiente alla crescita del faggio .

Nel complesso, quindi, si può dire che le fasce altitudinali individuate all'interno della zona alpina presentino un progressivo aumento con la quota della dipendenza del faggio dalle temperature. In particolare, esse si differenziano principalmente per la risposta durante i mesi estivi, in cui le faggete altomontane necessitano di calore mentre le montane possono soffrire temperature eccessive (luglio), e per il fatto che in quest'ultime si fa molto forte il segnale relativo alla pasciona. Inoltre, nel settembre della stagione precedente si osserva un comportamento opposto fra i popolamenti appartenenti alle due fasce: mentre quelli altomontani vogliono calore in questo mese per la movimentazione delle sostanze di riserva, in quelli montani l'abbassamento delle temperature può essere importante per una migliore predisposizione nei confronti di eventuali gelate precoci.

Le due stazioni escluse dalla PCA, infine, sono state sottoposte all'analisi individuale delle funzioni di correlazione e di risposta per lo stesso arco temporale utilizzato per l'analisi multivariata (1908 - 1988), in modo da analizzarne le esigenze climatiche e comprendere quali siano le anomalie che le differenziano dall'inquadramento fitoclimatico esposto. Innanzitutto, la faggeta che raggiunge la vetta su Montalto d'Aspromonte (MO2) mostra alcuni caratteri legati alla mediterraneità, come la correlazione diretta con le precipitazioni invernali (Gennaio), a sottolineare l'importanza della ricarica idrica invernale dei suoli per fronteggiare l'aridità nel corso della stagione vegetativa, ma necessita, contrariamente alle altre faggete mediterranee, di calore nel bimestre maggio-giugno (Tabella 11). Questa esigenza, è probabilmente legata al particolare microclima della vetta del massiccio dell'Aspromonte ed è evidentemente il fattore responsabile della dissociazione dalle altre faggete della zona mediterranea. Infatti l'Aspromonte è interessato da notevoli quantità di precipitazioni con l'aumentare della quota e questo probabilmente riesce a

svincolarlo dallo stress idrico. Compare inoltre un legame negativo con le temperature del settembre dell'anno precedente, probabilmente da collegare al bisogno di freddo per avviare i processi di indurimento necessari ad affrontare il freddo delle stagioni successive.

La cronologia di Nimis mostra da una parte la correlazione diretta con le precipitazioni di febbraio che fanno presupporre, come nel caso precedente, la presenza di un certa siccità in questa stazione prealpina di bassa quota ma, al tempo stesso, ha bisogno di minime elevate nello stesso mese come stimolo per l'entrata in vegetazione o per evitare i danni da freddo invernale eccessivo (Tabella 12). Compare inoltre un legame diretto con le temperature del luglio precedente, che accomuna questa stazione prealpina alle faggete di transizione e che, probabilmente, è la causa della distinzione di Nimis dai restanti popolamenti, sia alpini che mediterranei.

Tabella 11. Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione (a) e di risposta (b) calcolate tra la cronologia stagionale di Montalto 1900 m e le variabili climatiche mensili sul periodo 1908 - 1988.

a	Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
P								0.24									
Tmax				-0.23								0.28					
Tmin				-0.21								0.25	0.23				

b	Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
P																	
Tmax												0.20					
P																	
Tmin																	

Tabella 12. Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione (a) e di risposta (b) calcolate tra la cronologia stagionale di Nimis e le variabili climatiche mensili sul periodo 1908 - 1988.

a	Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
P																	
Tmax	0.29								0.25								
Tmin	0.30								0.20								

b	Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
P																	
Tmax	0.19																
P																	
Tmin	0.18																

Per chiarire meglio il segnale che interessa le Prealpi Giulie, abbiamo analizzato a parte anche le funzioni di correlazione e risposta delle cronologie escluse dall'analisi multivariata perché troppo brevi: Pechinie (intervallo utilizzato: 1937- 2003), si correla principalmente in maniera diretta con le temperature di gennaio e febbraio e con le precipitazioni di luglio (Tabella 13), La Motta (intervallo utilizzato: 1942- 2003) ha ancora bisogno di calore a gennaio e a settembre (per prolungare l'attività vegetativa), ma subisce ancora di più la siccità estiva, essendo correlata inversamente anche alle temperature del trimestre maggio-luglio (Tabella 14). Sembra quindi che

Tabella 13. Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione (a) e di risposta (b) calcolate tra la cronologia stagionale di Pechinie e le variabili climatiche mensili sul periodo 1937 - 2003.

a	Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
P														0.30			
Tmax									0.27								
Tmin					-0.20			0.27	0.31								
b	Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
P																	
Tmax									0.25								
P																	
Tmin																	

Tabella 14. Coefficienti significativi al 95% delle funzioni di correlazione (a) e di risposta (b) calcolate tra la cronologia stagionale di La Motta e le variabili climatiche mensili sul periodo 1942 - 2003.

a	Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
P						-0.23								0.27			
Tmax												-0.29	-0.34	-0.30			
Tmin		-0.24										-0.24	-0.29				
b	Anno precedente la crescita							Anno di crescita									
	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott
P																	
Tmax																	
P																	
Tmin								0.20								0.26	

queste faggete collinari prealpine siano ancora interessate da siccità estiva (maggiore alle quote inferiori), il che le avvicina alla zona mediterranea, ma necessitano allo stesso tempo che gli inverni non siano eccessivamente freddi, fattore tipico dei popolamenti alpini. Nel complesso, però, esse risultano correlate solo alla PC2 (PEC: $r = 0.32$), oppure sia con PC2 che con PC3 (MOT: rispettivamente $r = 0.45$ e $r =$

0.39), dimostrando di essere faggete alpine con caratteri di mediterraneità, il cui comportamento intermedio sarà importante approfondire nei campionamenti futuri.

Per la faggeta del Monte Petrella, posta nella zona mediterranea, non sono state calcolate le funzioni di correlazione e di risposta, vista la sua buona correlazione con PC1 ($r = 0.52$), che indica come la sua crescita sia condizionata dalla siccità del periodo estivo.

DISCUSSIONE

I campionamenti effettuati nell'ambito dello sviluppo della nostra Rete Dendroecologica Nazionale hanno portato alla scoperta di faggete vetuste di età notevole in tutto il territorio: sebbene fino ad ora il numero di anelli più alto sia stato contato in faggete dell'Italia centrale e meridionale, con alberi che raggiungono i 4-5 secoli di età e che costituiscono, insieme ad una faggeta di 400 anni sui Pirenei centrali (Bourquin-Mignot e Girardclos, 2001) le latifoglie più vecchie dell'Emisfero Boreale (Piovesan *et al.*, 2005b), le faggete bandite della Carnia si approssimano ai 400 anni e sono, fino ad ora, le faggete più vecchie dell'arco alpino. Infatti, studi dendrocronologici effettuati nel versante sloveno delle Alpi Giulie e nelle Alpi Settentrionali in Austria hanno riportato età massime di 270 e 250 anni rispettivamente (Di Filippo *et al.*, 2005). Nel resto d'Europa l'età massima si mantiene entro questi limiti, con faggi di 250 anni in Germania ed in Europa Orientale (Dittmar *et al.*, 2003) e di 290 anni in Polonia (Jaworski e Paluch, 2002).

La quota si è dimostrato il fattore geografico più importante nel determinare la longevità del faggio, soprattutto a causa delle limitazioni imposte alla crescita e l'effetto positivo che queste hanno sulla durabilità del legno, ma anche della minore accessibilità di questi siti, che raggiungono i limiti forestali in molte delle nostre montagne. Al contrario, le faggete basali o quelle montane situate in prossimità del mare godono di un periodo vegetativo più lungo e formano anelli più ampi, che provocano una minore durabilità del legno. Inoltre, la loro maggior accessibilità e vicinanza ai centri abitati le ha sottoposte nel corso del tempo ad un intenso sfruttamento, tanto che molte di loro derivano da pascoli arborati o dalla ricolonizzazione di coltivazioni abbandonate ad opera di faggi relegati nelle posizioni marginali.

Di particolare importanza si sono dimostrati i vincoli di tutela recenti (parchi nazionali o a carattere più locale) o passati (foreste bandite della Carnia) nel preservare dalla mano dell'uomo i popolamenti vetusti rinvenuti. Sarà interessante in futuro valutare attraverso nuovi campionamenti se le differenze in longevità

osservate tra le faggete mesalpine (Carnia) e quelle esalpine (Monte Barro e Valzurio), siano legate al fitoclima o siano semplicemente l'effetto dei vincoli di tutela.

Se è vero che la crescita condiziona la longevità, è anche vero il contrario, ossia che l'età è uno dei fattori principali nel determinare l'accrescimento medio di una pianta: questo fenomeno trova spiegazione non solo nel trend biologico decrescente di crescita dovuto all'età, responsabile di anelli progressivamente più piccoli (Cook e Kairiukstis, 1990), ma anche nella maggior frequenza con cui viene omessa la formazione dell'anello annuale a causa dell'aduggiamento in foreste vetuste strutturalmente avanzate (Piovesan *et al.*, 2003). A questo, poi, si deve aggiungere l'effetto dell'altitudine, perché generalmente le faggete di quota crescono 3-4 volte in meno rispetto alle faggete basali; spesso non è facile discriminare il peso che hanno l'inasprimento delle condizioni climatiche e la riduzione del periodo vegetativo al limite della vegetazione del faggio dal fatto che, al tempo stesso, qui ci sono i popolamenti più vecchi. Si consideri anche che la percentuale di anelli mancanti aumenta anche con la quota che con la vetustà dei popolamenti. In effetti i popolamenti di quota che hanno età media inferiore, sia alpini (PAU) che appenninici (PPO), mostrano un accrescimento medio ancora sostenuto.

Nel complesso, l'accrescimento non mostra trend latitudinali o longitudinali evidenti, così come le potenzialità produttive di ciascuna stazione, che sono condizionate in maniera simile da quota ed età, ma anche dalla fertilità stazionale. Non sembra, quindi, che la produttività del faggio vari significativamente fra Alpi ed Appennini o, in generale, lungo la direttrice nord – sud: questo trova spiegazione nel fatto che, scendendo verso il limite meridionale dell'areale, il faggio sceglie le stazioni più favorevoli, caratterizzate dal passaggio di correnti marine umide e termicamente livellate e/o dalla presenza di nebbie e di piogge orografiche, che gli consentono di sfuggire al maggiore stress idrico (Hofmann, 1991). Anche Pignatti (1995) riconosce che la altitudine di distribuzione del faggio in Italia corrisponde in genere alla fascia di condensazione delle correnti umide in mezza montagna (circa 800 – 1500 m sulle Alpi e 1200 – 1800 m sugli Appennini), da cui l'autore deriva la denominazione della sua “fascia subatlantica”.

Il parametro dendrocronologico che mostra un vero gradiente latitudinale è la sensibilità media, maggiore nelle faggete centro-meridionali rispetto a quelle alpine, in relazione all'aumentare del limite imposto all'accrescimento dal clima con l'approssimarsi al limite meridionale dell'areale. In questo contesto emerge anche che, a parità di latitudine, la massima variabilità interannuale dell'ampiezza anulare si riscontra nei soprassuoli costituiti da alberi di maggiori dimensioni, più dipendenti dal clima per sostenere la loro crescita.

Sebbene il faggio si sia confermato ancora una volta specie sensitiva (Biondi e Visani, 1996; Schirone *et al.*, 2002), alcune faggete alpine, come Pechinie e Cleulis, hanno presentato frequentemente alberi con sensibilità inferiore a 0.2, facendo supporre l'esistenza di una fascia basso-montana nelle Alpi Orientali caratterizzata da un clima molto favorevole a questa specie.

Il gradiente latitudinale osservato per MS si riflette sulla sensibilità media posseduta dalla cronologia stagionale (MS_{med}), che aumenta anche con la quota del popolamento: generalmente, infatti, la sensibilità aumenta nei popolamenti posti al limite, geografico o altitudinale, dell'areale rendendo i siti marginali più favorevoli alle indagini dendroclimatiche ed alle ricostruzioni del clima (Fritts, 1976).

Al contrario della sensibilità, i descrittori della variabilità comune non hanno evidenziato alcun legame con i fattori geografici, come atteso: probabilmente la causa è da attribuire al diverso livello di disturbo antropico che ha caratterizzato le foreste campionate, soprattutto nel periodo corrispondente ed immediatamente successivo alla seconda guerra mondiale. Infatti, sebbene una maggiore concordanza tra serie individuali sia alla base della sensibilità della media, in questo caso bassi valori di variabilità comune possono essere spiegati dal fatto che, prima della standardizzazione e della modellizzazione AR, la presenza di disturbi esogeni possa offuscare per un certo numero di anni il segnale climatico contenuto nelle serie anulari (Cook e Kairiukstis, 1990). Solo le foreste a quote inferiori sulle Alpi hanno mostrato un maggior grado di crescita comune ed, al tempo stesso, una diminuzione dello stesso nei siti distinti per la maggiore fertilità.

Il coefficiente di autocorrelazione di primo ordine è risultato, soprattutto sulle Alpi, maggiore nei popolamenti di bassa quota, mentre le faggete poste più in alto

sono sembrate meno dipendenti dalla crescita realizzata l'anno precedente a dimostrare una maggiore risposta agli stimoli climatici dell'anno in corso.

Sembra invece che l'ordine p di autoregressione applicato alle medie stazionali aumenti con la vetustà e con lo sviluppo strutturale dei popolamenti, come già osservato in studi precedenti (Biondi e Visani, 1996; Piovesan *et al.*, 2005a): questo fatto potrebbe dipendere sia dall'importanza che assumono con l'età le ciclicità di ordine superiore legate alla fruttificazione (Piovesan e Adams, 2001), sia dall'aumento delle perdite respiratorie per il mantenimento dovute all'aumento delle dimensioni (Mencuccini *et al.*, 2005), che potrebbe diminuire la dipendenza con la crescita dell'anno precedente.

I risultati dell'analisi multivariata hanno dimostrato che la crescita arborea è un fattore utile per accomunare diversi popolamenti forestali e che essa è intimamente legata alla posizione geografica ed altitudinale di ciascuno di essi. I raggruppamenti generati dall'affinità auxologica tra serie dendrocronologiche sono stati messi in relazione a gradienti latitudinali ed altitudinali esistenti nelle caratteristiche del clima e nel rapporto clima-accrescimento, la cui esistenza era già emersa in studi simili effettuati sul faggio ed altre specie in Italia ed in Europa (Biondi, 1992; Biondi e Visani, 1996; Mäkinen *et al.*, 2002; Schirone *et al.*, 2002; Dittmar *et al.*, 2003; Linderholm *et al.*, 2003; Piovesan *et al.*, 2005a). Si sono così potute chiarire le proprietà distintive e l'estensione spaziale ed altitudinale di zone e fasce dendroclimatiche, aree fitoclimatiche omogenee per il segnale climatico dominante sulla crescita radiale.

Innanzitutto è emersa l'esistenza di due diverse zone dendroclimatiche, una mediterranea, estesa in tutta l'Italia centro-meridionale fino all'Appennino Settentrionale (incluso), ed una alpina. Ognuna di esse è caratterizzata da un proprio segnale climatico: mentre le faggete mediterranee sono limitate nella crescita dalla siccità estiva, le faggete alpine non hanno forti limitazioni nella stagione vegetativa in corso, ma sono piuttosto legate all'induzione fiorale ad opera del clima dell'estate precedente ed alle condizioni termiche di marzo e dell'autunno precedente la crescita.

Le due zone dividono l'Italia e hanno come confine l'Appennino Settentrionale, i cui popolamenti sembrano avere un proprio segnale distintivo: infatti, pur risentendo ancora dello stress idrico estivo (segnale mediterraneo), mostrano un aumento di importanza del fattore termico (segnale alpino), espresso soprattutto come fabbisogno di calore nell'autunno ed inverno precedente, ma anche in primavera. D'altronde, le foreste vicine al crinale appenninico settentrionale sono caratterizzate da frequenti depositi di ghiaccio, legati ai fenomeni della galaverna e del gelicidio (Bernetti, 1995). Il segnale delle faggete di transizione, oltre a fattori che lo legano in parte alle faggete mediterranee e in parte a quelle alpine, si distingue per il bisogno di calore durante l'estate precedente, che contrasta con il limite imposto alla crescita successiva dall'induzione fiorale e che lo oppone al resto della Rete.

Sembra quindi che verso il limite geografico dell'areale il faggio risenta dell'aumento della siccità durante il periodo estivo, mentre nella zona alpina, più vicina al baricentro dell'areale di distribuzione, il fabbisogno di calore, necessario per esplicare le attività metaboliche e proteggersi dai danni da freddo o da gelo, diventi il principale fattore limitante. In entrambi i casi, comunque, il fenomeno della pasciona si è rivelato un importante limite all'accrescimento.

La divisione osservata, già anticipata da Piovesan *et al.* (2005a) ma che ora, grazie all'aumentata rappresentatività delle faggete alpine, trova una migliore definizione, è in accordo con una recente analisi climatologica effettuata con alcune delle tecniche multivariate usate in questo lavoro (PCA), ma su dati termopluviometrici piuttosto che serie dendrocronologiche: anche in questo caso è emersa l'esistenza di due grandi regioni climatiche nel nostro paese, una settentrionale ed una centro-meridionale, distinte principalmente sulla base del regime pluviometrico e confinanti ancora una volta presso l'Appennino Settentrionale (Brunetti *et al.*, in stampa). Questo conferma l'affidabilità del metodo dendroclimatico nell'identificare in maniera obiettiva la presenza di gradienti climatici presenti all'interno di un determinato territorio e l'affidabilità dell'albero come strumento per il monitoraggio ambientale (Schirone *et al.*, 2002).

Un'ulteriore conferma si ha dalla classificazione proposta da Pignatti (1979; 1995), il quale ipotizza in base ad osservazioni di tipo vegetazionale che il limite fra la zona fitoclimatica medioeuropea (o centroeuropea), all'interno della quale

ricadono le nostre cronologie alpine, e quella mediterranea passi lungo lo spartiacque appenninico settentrionale estendendosi (orientativamente) ad est lungo la Valle del Marecchia fino Rimini ed all'Adriatico e ad ovest lungo il crinale delle Alpi Marittime.

Se questo limite è legato all'influenza dominante che ha la siccità estiva sulla crescita arborea (Figura 7), forte fino all'Appennino Tosco-Romagnolo, è stato notato che questa si estende anche in Spagna ai popolamenti montani dei Pirenei orientali (Gutierrez, 1988) ed a quelli planiziali delle Asturie (Rozas, 2001). In parte essa è presente anche nelle Prealpi Giulie (italiane e slovene) e nelle Alpi Dinariche e nelle colline sud-orientali slovene (Di Filippo *et al.*, 2005), che però presentano caratteri intermedi tra la zona mediterranea e quella alpina. Un certo effetto della siccità estiva, inoltre, è stato osservato anche in faggete collinari francesi (Lebourgeois *et al.*, 2005) e centroeuropee (Dittmar *et al.*, 2003).

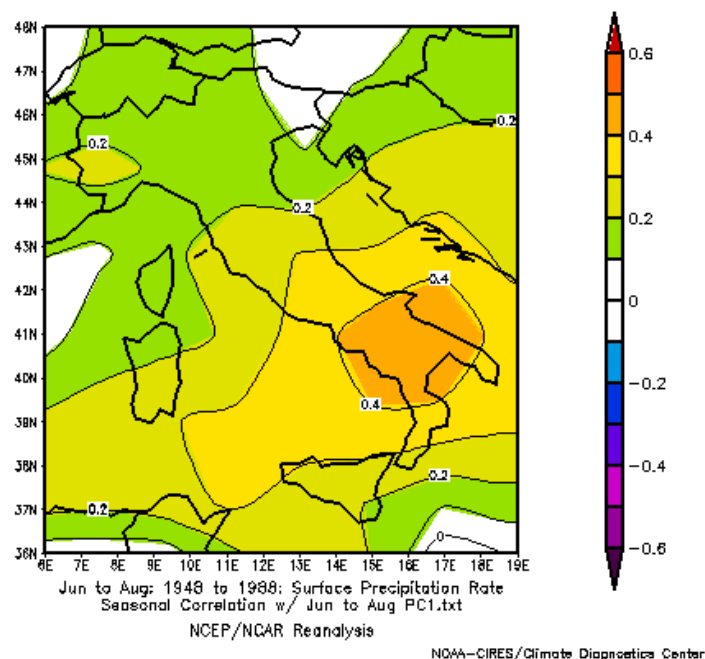


Figura 7. Estensione spaziale della correlazione del segnale comune a tutte le faggete mediterranee con le precipitazioni del trimestre giugno – agosto (da Piovesan *et al.*, 2005a).

La faggeta insubrica di Monte Barro è l'unica eccezione alla divisione delineata, presentandosi come intermedia tra le due zone, probabilmente a causa della particolarità topoclimatica dell'Insubria: i grandi laghi prealpini determinano un

effetto termoregolatore che consente la presenza di lembi di vegetazione mediterranea spontanea extrazonale e la coltivazione di olivo e limone (Pignatti, 1995) ma, al tempo stesso, la notevole piovosità e la vicina presenza dei rilievi montuosi la sottopongono in ugual modo all'influenza del segnale alpino. In futuro sarà molto importante approfondire le peculiarità dendroclimatiche della zona medioeuropea nel nostro paese, chiarendo soprattutto il diverso comportamento intermedio mostrato dai popolamenti prealpini e le loro relazioni con entrambe le regioni bioclimatiche.

A conclusioni diverse rispetto a quanto finora riportato arrivano le più recenti classificazioni prodotte su base fitosociologica che, sulla scorta di informazioni vegetazionali unite all'elaborazione di indici bioclimatici, estendono la zona temperata (assimilabile alla medioeuropea) a tutta la fascia del faggio dalle Alpi fino in Sicilia, relegando la zona mediterranea alle aree costiere della Penisola ed a buona parte del Meridione e delle isole (Rivas-Martinez, 1996; Blasi *et al.*, 1999). Nel nostro studio emerge però che l'aridità estiva, elemento caratteristico del clima mediterraneo, interessa tutte le faggete mediterranee, dalla collina fino al limite della vegetazione, ed è proprio questo fattore così forte che le distingue dai popolamenti alpini. La nostra classificazione concorda quindi con Pignatti (1979) nell'attribuire alle faggete montane della zona mediterranea una propria autonomia rispetto a quelle medioeuropee.

Dei due popolamenti isolati con l'HCA, solo la faggeta di quota di Montalto d'Aspromonte rappresenta una vera e propria singolarità all'interno della zona mediterranea, in relazione alle sue caratteristiche di quota ed all'abbondanza delle precipitazioni dell'Aspromonte, che la distinguono da tutti i popolamenti circostanti. L'isolamento della faggeta di Nimis, invece, dipende dalla scarsa rappresentatività delle faggete collinari all'interno della zona medioeuropea: infatti in un recente studio di rete, focalizzato sull'area alpina orientale, è emersa l'esistenza di un vero e proprio asse legato alle faggete collinari prealpine (Di Filippo *et al.*, 2005).

All'interno di ciascuna zona sono state poi identificate delle fasce altitudinali che ben si accordano alla classificazione fitoclimatica di Pavari (De Philippis, 1937), ma vi aggiungono ulteriori informazioni riconoscendo una distinzione fra faggete poste a quote simili ma appartenenti alla zona mediterranea o a quella alpina. Inoltre, la

metodologia impiegata è stata anche capace di distinguere quei popolamenti aventi caratteristiche intermedie tra differenti unità bioclimatiche. In particolare, hanno mostrato questa proprietà i popolamenti posti ad altitudini di passaggio tra due fasce fitoclimatiche o quelli caratterizzati da un particolare topoclima. D'altronde anche De Philippis (1937) riportava che, mentre i limiti altimetrici superiori delle zone del Pavari sono essenzialmente termici e quindi abbastanza stabili e ben definiti perché difficilmente superabili, quelli inferiori possono essere valicati da specie della zona superiore (nel senso di Pavari) laddove le condizioni lo consentano. Per il faggio ci si riferisce soprattutto all'effetto delle maggiori precipitazioni, occulte e non, legato alla vicinanza con il mare o a bacini idrici di una certa consistenza che possano alleviare l'aumento della siccità.

Le faggete mediterranee si dividono in quattro fasce dendroclimatiche: basali, montane centro-meridionali, montane sud-occidentali ed altomontane. Le faggete basali includono popolamenti collinari e basso-montani del Lazio, compresi tra i 400 ed i 1000 m circa: oltre all'effetto dell'aridità nei mesi estivi ha un ruolo chiave per la crescita un maggio fresco, durante il quale non si verifichino eccessi di temperatura o carenze idriche. Questo è vero soprattutto per le faggete poste al di sotto degli 800 m, vegetanti intorno ai laghi vulcanici laziali ed appartenenti al *Castanetum* caldo, in cui la discesa del faggio è consentita dalla notevole umidità atmosferica, manifesta spesso sotto forma di precipitazioni occulte (nebbie), e dalla profondità dei terreni vulcanici. Queste faggete entrano in vegetazione presto e già a fine primavera hanno la chioma ben formata e possono cominciare ad avvertire lo stress idrico. Un simile controllo climatico è stato riportato anche per le querce caducifoglie che crescono in contesti simili nel Lazio (Romagnoli e Codipietro, 1996) e per le faggete collinari delle Prealpi Giulie (Di Filippo *et al.*, 2005; vedi anche le funzioni di risposta per La Motta nei risultati), dell'Europa Centrale ed Orientale (Dittmar *et al.*, 2003) e della Francia (Lebourgeois *et al.*, 2005). Sembra quindi che il segnale di maggio, forte soprattutto in Italia Centrale, possa accomunare le faggete basali mediterranee, in cui si estende anche alla fascia basso-montana, a quelle collinari centroeuropee. Inoltre, i popolamenti posti alle quote maggiori di questa fascia (900 - 1000 m s.l.m.), crescono tra il *Castanetum* freddo ed il *Fagetum*

caldo e non sono pienamente legati a questo segnale, ma presentano caratteri intermedi con la fascia superiore.

La fascia delle faggete montane centro-meridionali è costituita da popolamenti appartenenti al *Fagetum* caldo (1000 - 1400 m s.l.m.) distribuiti dall'Appennino laziale ed abruzzese fino al Massiccio dell'Aspromonte in Calabria, in cui il segnale climatico dominante è fortemente legato alla siccità dei mesi estivi. A questa fascia appartengono anche due popolamenti meridionali ascritti al *Castanetum*, in cui il particolare topoclima, caratterizzato dalla presenza di correnti umide marine e dalla vicinanza alla linea di costa, consente loro non solo di formare popolamenti maestosi a quote eccezionalmente basse, ma anche di sfuggire lo stress idrico tardo-primaverile. In particolare la Foresta Umbra gode di correnti aeree provenienti da nord che attraversano l'Adriatico caricandosi di umidità, scaricata sotto forma di pioggia o di precipitazioni occulte sul versante settentrionale del Promontorio del Gargano in modo frequente durante la primavera - inizio estate, periodo particolarmente delicato per il faggio perché l'apparato fogliare è ancora in via di sviluppo (Hofmann, 1991). Anche Cinquefrondi, faggeta eccezionale in quanto posta ad altitudine particolarmente bassa (500 m) vicino al limite meridionale dell'areale della specie, gode delle correnti umide di N-NO provenienti dal Tirreno, grazie anche alla sua esposizione nord, oltre che della notevole quantità di precipitazioni che interessano il massiccio dell'Aspromonte (Ciancio, 1973).

Questi ultimi due popolamenti hanno qualche legame con le faggete montane sud-occidentali, che vegetano tra i 1400 ed i 1850 m sui rilievi di Calabria meridionale e Sicilia settentrionale e crescono, secondo la classificazione di Pavari, tra il *Fagetum* caldo ed il freddo. La loro posizione è alquanto unica per il fatto di crescere a quote abbastanza elevate su rilievi prossimi alla linea di costa al limite meridionale dell'areale del faggio. In questi siti, il faggio diventa ancora più dipendente dalle precipitazioni occulte, come testimoniato dalla frequenza della nebbia sui rilievi della Sicilia e del ruolo che essa ha nel determinare l'estensione altitudinale delle faggete nell'isola (Hofmann, 1991). Inoltre, esse ricadono all'interno della sottoregione climatica sud-occidentale, comprendente tutte le stazioni termopluviometriche al di sotto dei 39° N e distinta dal resto dell'Italia peninsulare per la peculiarità del suo regime pluviometrico (Brunetti *et al.*, in stampa). Queste faggete sono

particolarmente vincolate alle precipitazioni di giugno, che qui diventano preponderanti, probabilmente perché a latitudini così basse le condizioni dei mesi successivi rimangono generalmente ostili e possono fare meno la differenza nel condizionare l'ampiezza annuale realizzata nel corso della stagione vegetativa.

In questa fascia non riesce a trovare una collocazione la faggeta sommitale di Montalto che, pur rientrandovi per collocazione geografica ed altitudinale, non sembra essere toccata né da questo segnale climatico, né da quelli identificati per le altre fasce. Infatti essa non è interessata da marcati fenomeni di siccità estiva, grazie alle notevoli precipitazioni che caratterizzano il Massiccio dell'Aspromonte e che raggiungono valori elevati soprattutto alle quote superiori (Ciancio, 1973), il che la separa da tutte le faggete mediterranee, ed al tempo stesso mostra un bisogno di calore a maggio, tipico segnale di quota delle faggete altomontane, e giugno, fattore anomalo per le faggete di questa zona. Queste sue caratteristiche la rendono una singolarità dendroclimatica all'interno della zona mediterranea.

L'ultima fascia della zona mediterranea è costituita dalle faggete altomontane, appartenenti al *Fagetum* freddo e presenti dai 1500 - 1600 m s.l.m. fino al limite della vegetazione (1800 – 2000 m) dall'Italia Centrale fino al Massiccio del Pollino. In questi popolamenti di quota acquistano notevole importanza le temperature primaverili, perché il faggio qui diventa sensibile alle gelate tardive e comincia ad aver bisogno di temperature sufficienti a sostenere le attività metaboliche che caratterizzano l'inizio dell'attività vegetativa. Il temperamento oceanico del faggio, oltre che nell'aumentata sensibilità alla siccità osservata nel procedere verso il limite meridionale dell'areale, appare anche al limite altitudinale, soprattutto in relazione alla criticità che per esso rappresenta il periodo primaverile di emissione delle foglie (Hofmann, 1991). In particolare, maggio acquisisce un ruolo centrale per la crescita ed è questo fattore che oppone il comportamento di queste faggete a quelle basali, desiderose di fresco in questo mese. In questo contesto, vanno anche considerate le differenze tra il Monte Pollino e la faggeta delle Madonie la quale, pur raggiungendo una buona altitudine sulle pendici di Pizzo Carbonara ed essendo ascritta al *Fagetum* freddo, appartiene ad un'altra fascia: questo fenomeno può ancora una volta essere attribuito all'esistenza di una sub-regione climatica sud-occidentale, che non include il Pollino (Brunetti *et al.*, in stampa). Si può anche pensare che il Pollino sia più

interessato alle correnti fredde orientali, che più difficilmente raggiungono l'Aspromonte e la Sicilia, aree che in effetti sono caratterizzate da ragguardevoli risalite del leccio, che supera i 1600 m sui versanti settentrionali delle Madonie entrando frequentemente in contatto con la faggeta, e dalla notevole diffusione di specie colchiche come tasso, agrifoglio, pungitopo (Pignatti, 1979).

Nel complesso, quindi, le differenti fasce della zona mediterranea costituiscono una modulazione legata alla quota dello stesso segnale climatico di siccità, a cui possono essere affiancati segnali tipici di ogni quota. In particolare, è emerso il ruolo di mediazione svolto dal ciclo fenologico (Piovesan *et al.*, 2005a) nel determinare l'inizio e la durata della siccità, generalmente estesa a 4 mesi (maggio - agosto) nei popolamenti basali ed a soli 2 (luglio-agosto) in quelli altomontani (Schirone *et al.*, 2002). La fenologia e la quota, influenzando sulla data di inizio dell'attività vegetativa, hanno una parte importante anche nel determinare il momento in cui il faggio è maggiormente suscettibile a danni da gelate tardive, che interessano i popolamenti basali principalmente nel mese di marzo e quelli altomontani in aprile.

Le faggete della zona medioeuropea (alpina) sono state divise in tre fasce altitudinali: basale, montana ed altomontana. Non bisogna trascurare, nella discussione successiva, che la zona alpina è qui rappresentata quasi esclusivamente da faggete delle Alpi e Prealpi Orientali, caratterizzate da livelli di piovosità annua molto elevati e ben differenziate sotto il profilo climatico dalle Alpi Occidentali: in futuro il campionamento di nuovi siti potrà chiarire ulteriormente il quadro qui delineato per i popolamenti alpini.

Le faggete basali crescono in stazioni collinari o basso-montane (250 – 670 m s.l.m.) delle Prealpi Giulie attribuite al *Castanetum* freddo, che risentono ancora di una certa siccità estiva, manifesta solo in luglio nelle due stazioni più alte ma più forte e durevole nella stazione inferiore (La Motta), dove si estende anche a maggio e giugno. Soprattutto in quest'ultimo caso si palesa il legame con le faggete basali del Lazio, rispetto ai quali però questi popolamenti si differenziano per il bisogno di calore nei mesi invernali: essi sembrano quindi trascendere il limite tra le due zone ed unire un segnale mediterraneo, legato alla siccità estiva, ad uno più strettamente alpino, legato a limiti termici. Questo comportamento era già stato osservato in una rete dendroecologica transnazionale sviluppata su faggete del settore alpino orientale,

in cui questi popolamenti, insieme alle faggete collinari slovene, si configuravano come intermedi tra la zona mediterranea e quella alpina (Di Filippo *et al.*, 2005). Come abbiamo già visto per le faggete basali mediterranee, esiste un fattore climatico accomunante tutte le faggete collinari dell'Europa centro-meridionale, costituito dall'azione negativa delle temperature e positiva delle precipitazioni nel quadrimestre maggio-agosto. Mentre questo segnale è puro in Centro Italia, e dal punto di vista qualitativo rimane espresso nelle fasce fitoclimatiche superiori, nelle colline delle Alpi e del Centro Europa viene affiancato da una componente termica autunnale e/o invernale, divenendo in un certo senso “misto”, per poi sparire nelle fasce superiori. Inoltre, anche la faggeta insubrica di Monte Barro ha presentato delle caratteristiche intermedie mediterranee/medieuropee e, per questo motivo, sarà importante in futuro poter infittire i punti della Rete presenti nella regione alpina per meglio definire le differenze osservate nel comportamento tra Prealpi Centrali ed Orientali.

Le faggete montane si estendono tra i 750 e i 1300 m di quota ed appartengono al *Fagetum* caldo; la loro crescita è limitata non tanto dal clima della stagione vegetativa durante cui viene formato l'anello, quanto dall'effetto della siccità dell'estate precedente sull'induzione fiorale, che determina quanti fotosintetati l'anno successivo saranno destinati alla fruttificazione piuttosto che alla crescita. In modo minore sembra che questi popolamenti siano interessati anche da un certo rischio di gelate tardive e che siano limitati da un eccesso di caldo a luglio. Queste stazioni godono quindi di un clima relativamente favorevole alla crescita del faggio, che qui, come in alcuni siti a quote più basse, ha spesso mostrato scarsa sensibilità media tanto da far ipotizzare la presenza di una “fascia ottimale” di crescita collinare – basso-montana localizzata nelle Alpi Orientali, dove la grande piovosità e livelli di temperatura ancora buoni rendano la crescita del faggio meno vincolata alla variabilità del clima.

Le faggete altomontane di Lateis e Paularo, estese nel *Fagetum* freddo tra i 1300 ed i 1500 m s.l.m., raggiungono il limite di vegetazione del faggio sulle Alpi: esse si distinguono per l'esigenza di calore durante i mesi estivi, che le mette in piena contrapposizione con tutte le faggete della zona mediterranea. Questo segnale puramente termico, non ancora descritto nel faggio in Italia, è stato riportato anche

per le faggete di quota del versante sloveno delle Alpi Giulie e nelle Alpi Settentrionali (Di Filippo *et al.*, 2005) e per le faggete di quota (830 – 1240 m s.l.m.) in Europa Centrale, spesso associandovi l'effetto negativo della nuvolosità legata alle precipitazioni estive (Dittmar *et al.*, 2003). Si tratta di un segnale propriamente di quota, molto diffuso anche nelle conifere che vegetano nelle fasce fitoclimatiche superiori sulle Alpi (Frank e Esper, 2005) e sui Pirenei (Tardif *et al.*, 2003) e tipico delle foreste poste a latitudini elevate (p.e. Linderholm *et al.*, 2003), dove la breve stagione vegetativa è limitata ai mesi estivi e la temperatura è il principale fattore limitante. La crescita di queste faggete al limite altitudinale sulle Alpi presenta anche altri importanti segnali legati al fabbisogno termico, come ad esempio nel mese di febbraio, probabilmente per evitare i rischi connessi al freddo eccessivo come l'embolia da gelo (Lemoine *et al.*, 1999), e nel periodo tardo estivo – autunnale precedente la crescita, in cui avviene la mobilitazione e l'accumulo di sostanze di riserva (Barbaroux e Bréda, 2002). Quest'ultimo fattore è stato riportato anche per i faggi di quota in Europa Centrale (Dittmar *et al.*, 2003) e, solo quello di novembre, per le conifere di quota sui Pirenei (Tardif *et al.*, 2003).

Infine, resta da indagare sul perché la faggeta di Valzurio, pur raggiungendo quote simili sulle Alpi in Lombardia, risulti legata alla fascia montana piuttosto che a quella altomontana: probabilmente la vicinanza alla regione insubrica la rendono meno dipendente dalle temperature estive rispetto ai popolamenti più interni delle Alpi Carniche.

Nelle faggete alpine, quindi, prevalgono complessivamente i segnali legati al fabbisogno di calore, sempre più evidenti salendo di quota dove interessano direttamente anche la stagione vegetativa, ma presenti anche nei siti a quote inferiori fino alla collina durante il periodo precedente la crescita. Abbiamo visto anche che i popolamenti basali alpini mostrano ancora una certa influenza della siccità estiva e come, nell'insieme, le faggete alpine godano di una minore pressione climatica nel corso della stagione vegetativa, che spiega la loro minore sensibilità media rispetto ai popolamenti mediterranei posti verso il limite meridionale dell'areale.

CONCLUSIONI

Il metodo dendroclimatico si è dimostrato un valido strumento per la classificazione fitoclimatica delle faggete italiane, riuscendo a cogliere fedelmente la variabilità del clima nel nostro paese e l'effetto che essa ha sulla crescita arborea. La sua affidabilità è stata confermata, oltre che dalla concordanza con le regioni climatiche identificate sul territorio italiano, anche dalla congruenza con alcune importanti classificazioni fitoclimatiche effettuate su conoscenze di tipo vegetazionale, come quella di Pignatti, o più strettamente forestali, come quella di Pavari.

Uno dei maggiori pregi della classificazione dendroclimatica è dato dalla sua oggettività, fondata sul fatto che il legame pianta - clima è qui rappresentato direttamente dal rapporto clima - accrescimento arboreo, integrante l'osservazione della vegetazione e quello del clima, palesato per mezzo del processo di calibrazione. In particolare questo metodo mette a fuoco direttamente il fattore climatico che guida la crescita (il segnale climatico), isolandolo e ponendolo al centro delle distinzioni fra popolamenti. Il tutto viene enfatizzato se si considera che il gran numero di unità bioclimatiche identificate si riferisce ad un'unica specie vegetale, mentre spesso le unità impiegate nelle classificazioni basate sullo studio della vegetazione sono distinte grazie ad una specie dominante all'interno degli ecosistemi caratteristici di un'area. La classificazione dendroclimatica ha consentito di identificare (fino ad ora) due zone fitoclimatiche e ben otto fasce nel solo contesto delle faggete italiane, dimostrando così una grande risoluzione; grazie alla sua risoluzione è stato possibile anche identificare le stazioni che posseggono caratteristiche intermedie fra diverse unità. In confronto, le faggete campionate per questo studio afferiscono a quattro unità fitoclimatiche della classificazione di Pavari (*Fagetum* caldo e freddo o *Castanetum* caldo e freddo) ed a quattro unità in quella di Pignatti (fascia subatlantica e fascia sannitica nella zona mediterranea, fascia subatlantica e fascia medioeuropea nella zona medioeuropea).

In futuro sarà sicuramente di primaria importanza espandere la Rete Dendroecologica andando a coprire le aree ancora non studiate in modo da fornire una migliore continuità ed omogeneità di campionamento: i punti prioritari cadranno sicuramente nelle aree sensibili, come il settore compreso tra l'Appennino Settentrionale e le Alpi Marittime, al fine di poter raggiungere una migliore caratterizzazione dell'area di transizione tra la zona mediterranea e quella medioeuropea, ma interesseranno anche quei settori della regione alpina, come quello centrale e quello occidentale, attualmente poco o nulla rappresentati all'interno della Rete, in cui dominano attualmente i popolamenti del settore orientale. Particolare attenzione sarà rivolta anche alla descrizione del comportamento dei popolamenti collinari prealpini, per chiarire il loro rapporto con il segnale mediterraneo. La zona mediterranea, infine, meriterà ulteriori approfondimenti, soprattutto per quel che riguarda la migliore definizione della sub-regione climatica sud-occidentale e ad una più approfondita conoscenza della zonazione presente anche alle quote più basse raggiunte dal faggio verso il limite meridionale del proprio areale.

Inoltre, sarà interessante estendere le considerazioni prodotte per il faggio anche ad altre specie arboree sensitive nei confronti del clima, in modo da produrre una classificazione fitoclimatica più completa. La creazione di una rete plurispecifica consentirà non solo di estendere la classificazione ad una porzione più ampia del territorio italiano, andando a raggiungere le altitudini più basse fino al livello del mare o più alte (sulle Alpi) sino al limite degli alberi, ma anche di poter studiare i rapporti dendroclimatici fra specie diverse verificando in che modo il fattore limitante tipico di un'unità dendroclimatica influenzi la crescita di altri *taxa* che vegetano all'interno dello stesso contesto. In altre parole, si controllerà se i fattori climatici differenziali di ciascuna unità valgono anche per specie arboree diverse dal faggio, o se le differenze genetiche prevalgono nel modulare la risposta al clima. Nel primo caso sarà possibile, per così dire, "aprire la finestra climatica", che rappresenta la base di partenza della classificazione dendroclimatica, studiando il segnale climatico al di là della risposta specifica e, in caso affermativo, confermando l'obiettività del lavoro prodotto.

La classificazione dendroclimatica mostra anche importanti prospettive dal punto di vista gestionale, grazie al legame diretto che la crescita radiale ha con la produttività forestale: le unità fitoclimatiche, infatti, potrebbero essere impiegate per definire le aree di produttività potenziale della specie in Italia ed il legame di queste con la fenologia ed il segnale dominante la crescita. In aggiunta, considerare anche le variazioni geografiche della sensibilità della crescita nei confronti del clima potrà servire a valutare la presenza di aree in cui la produttività è meno legata alle oscillazioni climatiche e quelle maggiormente a rischio di degrado.

L'informazione geografica legata alla produttività potrà essere di aiuto nella pianificazione gestionale delle nostre foreste, fornendo indicazioni sulle aree più adatte allo scopo produttivo e su quelle più svantaggiate; per queste ultime, poi, si potrà prevedere un'altra destinazione d'uso, come ad esempio la protezione dei versanti o la protezione naturalistica. Nel caso di aree protette si potranno tenere in considerazione la variabilità altitudinale a cui è vincolata la longevità potenziale della specie, considerando che questa grandezza influenza profondamente i ritmi e le dinamiche strutturali e compositive di un ecosistema forestale.

In questo contesto si potrà valutare l'effetto dei cambiamenti climatici in atto sulla produttività delle foreste italiane in base ad una conoscenza dettagliata del rapporto clima-accrescimento nelle varie zone e fasce. In particolare, se il clima del nostro Paese sta diventando progressivamente più caldo e le precipitazioni meno frequenti (Brunetti *et al.*, 2004), la classificazione dendroclimatica potrà fornire la base di partenza necessaria alla formulazione di scenari futuri utili a diagnosticare l'impatto del cambiamento climatico sugli ecosistemi forestali considerando anche le modificazioni che avvengono parallelamente nel ciclo fenologico (Schaber e Badeck, 2003). Inoltre, uno studio comparato sulla risposta di specie arboree diverse potrebbe fornire informazioni utili a valutare le variazioni della loro capacità competitiva sotto un regime climatico differente e, di conseguenza, a predire se ed in che modo varierà la composizione specifica di comunità forestali.

Infine, il lavoro effettuato costituisce uno studio preliminare per poter effettuare la ricostruzione del clima in Italia, fornendo dei segnali climatici forti, in quanto isolati da una gran numero di cronologie individuali (come nelle caso delle cronologie *master*) e le conoscenze di base sulla loro distribuzione spaziale.

BIBLIOGRAFIA

- Aniol R.W., 1983. Tree-ring analysis using CATRAS. *Dendrochronologia*, 1: 45-53.
- Aniol R.W., 1987. A new device for Computer Assisted Measurement of Tree-Ring Widths. *Dendrochronologia*, 5: 135-141.
- Barbaroux C., Bréda N., 2002. Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiology* 22, 1201–1210.
- Bernabei M., Lo Monaco A., Piovesan G., Romagnoli M., 1996. Dendrocronologia del faggio (*Fagus sylvatica* L.) sui Monti Sabini (Rieti). *Dendrochronologia* 14: 59-70.
- Bernabei M., Piovesan G., 1997. Alcune osservazioni sugli accrescimenti anulari del faggio (*Fagus sylvatica* L.) nel Lazio settentrionale. *Monti e boschi* 5: 52-56.
- Bernetti G., 1995. *Selvicoltura speciale*. UTET, Torino.
- Biondi F., 1992. Development of a tree-ring network for the Italian Peninsula. *Tree-Ring Bulletin* 52, 15-29.
- Biondi F., 1993. Climatic signals in tree-rings of *Fagus sylvatica* L. from the central Apennines, Italy. *Acta Oecologica* 14, 57-71.
- Biondi F., Visani S., 1996. Recent developments in the analysis of an Italian tree-ring network with emphasis on European beech (*Fagus sylvatica* L.). In: J.S. Dean, D.M. Meko E T.W. Swetnam (Ed.), *Tree Rings, Environment and Humanity*, Special Volume, pp. 713-725. *Radiocarbon*.
- Biondi F., Waikul K., 2004. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers and Geosciences* 30, 303-311.
- Blasi C., 1994. Il fitoclima del Lazio. *Fitosociologia* 27: 151-175.
- Blasi C., Carranza M.L., Filesi L., Tilia A., Acosta A., 1999. Relation between climate and vegetation along a Mediterranean-Temperate boundary in central Italy. *Global Ecology and Biogeography* 8, 17-27.

- Bourquin-Mignot C., Girardclos O., 2001. Construction d'une longue chronologie de hêtres au pays basque: la forêt d'Iraty et le Petit Age Glaciaire. *Revue de Géographie des Pyrénées et du Sud-Ouest Européen* 11, 59-71.
- Brunetti M., Buffoni L., Mangianti F., Maugeri M., Nanni T., 2004. Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. *Global and Planetary Change* 40, 141–149.
- Brunetti M., Maugeri M., Monti F., Nanni T., in stampa. Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *International Journal of Climatology*.
- Bugmann H., 1996. Functional types of trees in temperate and boreal forests: classification and testing. *Journal of Vegetation Science* 7:359-370.
- Ciancio O., 1973. Sul clima e sulla distribuzione altimetrica della vegetazione forestale in Calabria. *Ann. Ist. Sper. Selv.* 2: 321-423.
- Cook E.R., Glitzenstein J.S., Krusic P.J., Harcombe P.A., 2001. Identifying functional groups of trees in West Gulf Coast forests (USA): a tree-ring approach. *Ecological Applications* 11, 883-903.
- Cook E.R., Kairiukstis L.A., 1990. *Methods of dendrochronology - Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers.
- De Philippis A., 1937. Classificazioni ed indici del clima in rapporto alla vegetazione forestale italiana. *Nuovo Giornale Botanico Italiano* XLIV, 1-169.
- Di Filippo A., 2005. Le foreste vetuste: ecosistemi chiave per la conservazione della biodiversità e lo sviluppo di una selvicoltura a basso impatto ambientale. *Linea Ecologica* 2: 22-25.
- Di Filippo A., Cûfar K., de Luis Arillaga M., Piovesan G., Romagnoli M., Schirone B., 2005. Spatial and altitudinal climatic signals identified in a beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring network on the Eastern Alps. In: Sarlatto M., Di Filippo A., Piovesan G. e Romagnoli M. (editori): “Abstract book of Eurodendro 2005”, Editore Sette Città, Viterbo, Italia.
- Dittmar C., Zech W., Elling W., 2003. Growth variations of common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe - a dendroecological study. *Forest Ecology and Management* 173, 63-78.

- Eckstein D., Frisse E., 1982. The influence of temperature and precipitation on vessel area and ring width of oak and beech. In: M.K. Hughes, P.M. Kelly, J.R. Pilcher, V.C. LaMarche Jr. (Ed.), *Climate from Tree Rings*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 12.
- Efron B., Tibshirani R., 1986. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. *Statistical Science* 1, 54-75.
- Fabbris L., 1997. *Statistica multivariata – Analisi esplorativa dei dati*. McGraw-Hill, Milano.
- Feliksik E., Wilczyński S., 2004. Dendroclimatic regions of Douglas fir *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco in western and northern Poland. *Dendrobiology* 52: 9-15.
- Foster D.R., Orwig D.A., McLachlan J.S., 1996. Ecological and conservation insights from reconstructive studies of temperate old-growth forests. *Trees* 11: 419-424.
- Frank D., Esper J., 2005. Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps. *Dendrochronologia* 22: 107–121.
- Fritts H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London.
- Fritts H.C., Swetnam T.W., 1989. Dendroecology: A tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research* 19: 111-188.
- Grissino-Mayer H.D., 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57: 205-221.
- Gutierrez E., 1988. Dendroecological study of *Fagus sylvatica* L. in the Montseny mountains (Spain). *Acta Oecologica* 9: 301-309.
- Guttman, L., 1954. Some necessary conditions for common-factor analysis. *Psychometrika* 19, 149-161.
- Hofmann A., 1991. Il faggio e le faggete in Italia. *Collana verde n. 81*, Corpo Forestale dello Stato, Roma.
- Holmes R.L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43, 69-78.
- Jackson D.A., 1993. Stopping rules in Principal Component Analysis: a comparison of heuristical and statistical approaches. *Ecology* 74: 2204-2214.

- Jaworski A., Paluch J., 2002. Factors affecting the basal area increment of the primeval forests in the Babia Góra National Park, Southern Poland. *Forstw. Cbl.* 121: 97-108.
- Jolliffe I.T., 1986. *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, New York.
- Lemoine D., Granier A., Cochard H., 1999. Mechanism of freeze induced embolism in *Fagus sylvatica* L. *Trees* 13:206–210.
- Laurent J.-M., Bar-Hen A., François L., Ghislain M., Cheddadi R., 2004. Refining vegetation simulation models: from plant functional types to bioclimatic affinity groups of plants. *Journal of Vegetation Science* 15, 739-746.
- Lebourgeois F., Bréda N., Ulrich E., Granier A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees* 19: 385–401.
- Lemoine D., Granier A., Cochard H., 1999. Mechanism of freeze induced embolism in *Fagus sylvatica* L. *Trees* 13:206–210
- Linderholm H.W., Solberg B.Ø., Lindholm M., 2003. Tree-ring records from central Fennoscandia: the relationship between tree growth and climate a west–east transect. *The Holocene* 13: 889–897.
- Mäkinen H., Nöjd P., Kahle H.-P., Neumann U., Tveite B., 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecology and Management* 171, 243-259.
- Maugeri M., Brunetti M., Buffoni L., Iafrate L., Mangianti F., Monti F., Nanni T., 2002. Acquisizione, esame critico ed analisi di serie storiche italiane per lo studio delle variazioni climatiche. Rapporto finale del I anno del Progetto CLIMAGRI (<http://www.climagri.it>).
- Mencuccini M., Martínez-Vilalta J., Vanderklein D., Hamid H.A., Korakaki E., Lee S., Michiels B., 2005. Size-mediated ageing reduces vigour in trees. *Ecology Letters* 8: 1183-1190.
- Nielsen C.N., Jørgensen F.V., 2003. Phenology and diameter increment in seedlings of European beech (*Fagus sylvatica* L.) as affected by different soil water contents: variation between and within provenances. *Forest Ecology and Management* 174, 233-249.

- Pignatti, S., 1979. I piani di vegetazione in Italia. *Giornale Botanico Italiano* 113, 411-428.
- Pignatti S. (ed.), 1995. *Ecologia vegetale*. UTET, Torino.
- Piovesan G., Adams J.M., 2001. Masting behaviour in beech: linking reproduction and climatic variation. *Canadian Journal of Botany* 79, 1039-1047.
- Piovesan G., Bernabei M., Di Filippo A., Romagnoli M., Schirone B., 2003. A long-term tree ring beech chronology from a high-elevation old-growth forest of Central Italy. *Dendrochronologia* 21, 1-10.
- Piovesan G., Biondi F., Bernabei M., Di Filippo A., Schirone B., 2005a. Spatial and altitudinal bioclimatic zones of the Italian Peninsula identified from a beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring network. *Acta Oecologica* 27: 197-210.
- Piovesan G., Di Filippo A., Alessandrini A., Biondi F., Schirone B., 2005b. Structure, dynamics and dendroecology of an old-growth *Fagus* forest in the Apennines. *Journal of Vegetation Science* 16: 13-28.
- Piovesan G., Schirone B., 2000. Winter North Atlantic Oscillation effects on the tree rings of the Italian beech (*Fagus sylvatica* L.). *International Journal of Biometeorology* 44, 121-127.
- Piutti E., Cescatti L., 1997. A quantitative analysis of the interactions between climatic response and intraspecific competition in European beech. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 277-284.
- Rivas-Martinez S., 1996. Bioclimatic map of Europe. Cartographic service, University of Leon. Graphics CELARAIN, Leon.
- Romagnoli M., Codipietro G., 1996. Pointer years and growth in Turkey oak (*Quercus cerris* L.) in Latium. Dendroclimatic approach. *Annales des Sciences Forestieres* 53, 671-684.
- Rozas V., 2001. Detecting the impact of climate and disturbances on tree-rings of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in a lowland forest in Cantabria, Northern Spain. *Ann. For. Sci.* 58: 237-251.
- Schaber J., Badeck F.W., 2003. Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. *Int. J. Biometeorol.* 47, 193–201.

- Schirone B., Pedrotti F., Spada F., Bernabei M., Di Filippo A., Piovesan G., in stampa. The old-growth forest of Val Cervara (Abruzzo National Park, Italy). *Acta Botanica Gallica*.
- Schirone B., Piovesan G., Romagnoli M., Bernabei M., Lo Monaco A., 2002. Una rete di monitoraggio dendroecologico per identificare i cambiamenti climatici e valutarne l'effetto sulle foreste italiane. Agenzia Italiana per la Protezione dell'Ambiente (ANPA), Rapporto Tecnico Finale.
- Stenson H., Wilkinson L., 2004. Factor analysis. In: "SYSTAT 11 - Statistics I", Richmond, California, USA, pp. 359-377.
- Stokes M.A., Smiley T.L., 1996. An Introduction to Tree-Ring Dating. Reprint of 1968 U. of Chicago Press ed. University of Arizona Press, Tucson.
- Swetnam T.W., Allen C.D., Betancourt J.L., 1999. Applied historical ecology: using the past to manage for the future. *Ecological Applications* 9, 1189-1206.
- Tardif J., Camarero J.J., Ribas M., Gutierrez E., 2003. Spatiotemporal variability in tree growth in the Central Pyrenees: climatic and site influences. *Ecological Monographs* 73: 241-257.
- Walter H., 1985. Vegetation of the Earth and ecological systems of the geobiosphere. Springer-Verlag, Berlino, Germania.
- Watson E., Luckman B.H., 2002. The dendroclimatic signal in Douglas-fir and ponderosa pine tree-ring chronologies from the southern Canadian Cordillera. *Can. J. For. Res.* 32: 1858–1874.
- Wessel, P., Smith W.H.F., 1998. New, improved version of Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. Amer. Geophys. U.* vol. 79, pp. 579.
- Woodward F.I., 1987. Climate & plant distribution. Cambridge University Press, Cambridge, Inghilterra

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare tutte le persone che mi hanno accompagnato in questi tre anni di dottorato. Innanzitutto i miei genitori e mia sorella Anna, che mi sono sempre stati vicini in questo periodo, e Patrizia, per la pazienza che avuto nel sopportarmi prima e durante la scrittura di questa tesi. Poi tutti gli amici, vicini e lontani, compagni di sventura nelle lunghe giornate viterbesi.

Voglio ringraziare anche i Professori Schirone, Piovesan e Romagnoli per gli insegnamenti, i consigli e la fiducia, senza cui non sarei qui, ed il Professor Franco Biondi per l'ospitalità e gli insegnamenti ricevuti durante il mio soggiorno americano.

Grazie anche ai tesisti e a tutti coloro che mi hanno aiutato durante i rilievi di campo. Infine, un grazie particolare va a Presa e al suo guantino da carotatore professionista.