

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AGRICOLTURA,  
LE FORESTE, LA NATURA E L'ENERGIA (DAFNE)**

**Corso di Dottorato di Ricerca in**

Scienze e tecnologie per la gestione forestale ed ambientale - XXV Ciclo

**CARATTERIZZAZIONE DENDROCRONOLOGICA DEI REGIMI DI  
DISTURBO IN UNA RETE DI FAGGETE VETUSTE ALTIMONTANE  
DISTRIBUITE LUNGO UN GRADIENTE LATITUDINALE**

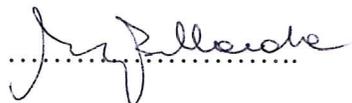
s.s.d. AGR/05

**Tesi di dottorato di:**

Dott. Emanuele Ziaco  


**Coordinatore del corso**

Prof.ssa Rosanna Bellarosa

Firma .....  


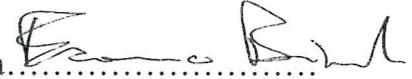
**Tutore**

Prof. Gianluca Piovesan

Firma .....  


**Correlatore**

Dr. Franco Biondi

Firma .....  


**27 maggio 2013**



*Ai miei nonni,  
non più negli occhi  
ma sempre nel cuore...*

*A Irene...*



## Abstract

La frequenza e la severità degli eventi di disturbo hanno un ruolo chiave nell'influenzare i processi ecologico-strutturali delle foreste e la storia di crescita delle piante, in particolare in quei popolamenti non gestiti caratterizzati da elevata naturalità. La dendrocronologia si presta allo studio quali-quantitativo dei regimi di disturbo attraverso l'analisi delle serie di ampiezze anulari, sulle quali il passaggio di un evento di disturbo è registrato sotto forma di un repentino rilascio di crescita che può essere evidenziato e datato. L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di analizzare la storia auxologica e caratterizzare i regimi di disturbo di 9 fagete vetuste altimontane distribuite lungo un gradiente latitudinale che va dalle Alpi austriache fino all'Appennino meridionale. Il lavoro è stato articolato in 3 fasi: i) lo sviluppo di indicatori cronologici in grado di discriminare diversi livelli di naturalità in base a parametri legati all'età delle piante dominanti e alla loro storia auxologica; ii) l'individuazione dei rilasci di crescita e la ricostruzione dei regimi di disturbo con il metodo delle boundary lines e l'analisi della risposta delle piante ai disturbi in termini di crescita radiale e basimetrica in funzione sia delle dimensioni che dell'età; iii) l'individuazione di eventuali relazioni tra le variazioni di crescita associate ad eventi di disturbo ed alcuni importanti patterns climatici dell'emisfero boreale, quali la Multidecadal Atlantic Oscillation (AMO) e la North Atlantic Oscillation (NAO), attraverso l'analisi wavelet e crosswavelet delle serie storiche di variazione di crescita delle piante.

Gli indicatori cronologici di vetustà sviluppati hanno dimostrato l'elevata naturalità dei popolamenti studiati in cui sono presenti individui pluricentenari (con età in alcuni casi >550 anni). Gli indicatori cronologici hanno fornito risultati coerenti con i più comuni indicatori di vetustà strutturali (es. necromassa; densità dei grandi alberi). La ricostruzione dei regimi di disturbo, condotta utilizzando boundary lines sia radiali che basimetriche, ha evidenziato la prevalenza di eventi di disturbo frequenti e di bassa severità, sottolineando l'importanza della dinamica "a buche" come driver dei processi di rinnovamento strutturale in ambiente temperato. È emerso inoltre come le piante manifestino rilasci di crescita fino a dimensioni (50-60 cm di diametro) ed età considerevoli (anche superiori ai 500 anni). È stata infine osservata una ciclicità di ~65-70 anni nelle oscillazioni di crescita delle piante e nella frequenza degli eventi di disturbo che ricalca sorprendentemente quella dell'indice AMO, le cui oscillazioni sono responsabili (in particolare durante le fasi di AMO positivo) del passaggio di aree cicloniche sull'Europa meridionale che espongono maggiormente i popolamenti forestali agli eventi di disturbo.

**Parole chiave:** indicatori; storia di crescita; disturbo; rilascio di crescita; BAI; foreste vetuste

## Abstract

Frequency and intensity of disturbance events play a key role in influencing forest structural-ecological processes and trees' auxological history, particularly inside unmanaged stands characterized by high degrees of naturalness. Dendrochronology is a valid tool for quali-quantitatively describing disturbance regimes through the analysis of ring-width series, where disturbance events are registered as abrupt growth releases which can be recorded and dated. The goal of this work was the analysis of auxological histories and the characterization of disturbance regimes of 9 high-mountain old-growth beech forests distributed along a latitudinal gradient from the Austrian Alps to the Southern Apennines. The study was divided into 3 phases: i) development of chronological indicators capable to discriminate different degrees of naturalness according to parameters linked to the age of dominant trees and their history of growth; ii) identification of growth releases and reconstruction of disturbance regimes according to the boundary lines release criteria and the analysis of plant response to disturbances in terms of radial and basal growth and in relation to plant size and age; iii) identification of relationships between growth variations associated to disturbance events and some important climatic patterns of the Boreal hemisphere, as the Multidecadal Atlantic Oscillation (AMO) and the North Atlantic Oscillation (NAO) through the wavelet and crosswavelet analysis of time series of plants' growth variations.

Chronological indicators of old-growthness showed the high degree of naturalness of studied stands, where multi-centennial individuals are present (ages > 550 years). Chronological indicators provided coherent results with the most common structural indicators of old-growthness (e.g. deadwood; density of large trees). The reconstruction of disturbance regimes performed by using both a radial and basal boundary line uncovered the prevalence of frequent low-intensity disturbance events, highlighting the importance of "gap dynamic" as a driver of structural renovation processes in temperate environments. The possibility of plants to produce growth releases up to remarkable dimensions (50-60 in diameter) and ages (even > 500 years) also emerged. A periodicity of ~65-70 years in plants' growth oscillations and in the frequency of disturbance events was observed, which surprisingly follows the periodicity of the AMO index, whose oscillations are responsible for the frequency of cyclones over Southern Europe (during positive AMO phases) that make forest stands more vulnerable to disturbance events.

**Keywords:** indicators; growth history; disturbance; growth release; BAI; old-growth forests



## INDICE

<b>Introduzione</b>	<b>6</b>
I regimi di disturbo	6
La dendrocronologia applicata allo studio dei regimi di disturbo	7
Foreste vetuste e regimi di disturbo	9
<b>Obiettivo della ricerca</b>	<b>11</b>
<b>Materiali e metodi</b>	<b>14</b>
I siti di studio	14
Analisi dendrocronologica	16
Indicatori cronologici di vetustà	18
Costruzione delle boundary lines ed individuazione dei rilasci di crescita	19
Effetto del clima sul regime di disturbo	21
<b>Risultati</b>	<b>23</b>
Caratterizzazione dendrocronologica dei siti	23
Indicatori cronologici di vetustà	26
Caratteristiche delle boundary lines radiali e basimetriche	32
Cronologie di disturbo	34
Effetti delle dimensioni e dell'età delle piante sulla risposta al disturbo	45
Effetti del clima sul regime di disturbo a scala regionale	47
<b>Discussioni</b>	<b>58</b>
Indicatori cronologici di vetustà	58
Boundary lines e regimi di disturbo	63
Effetti delle dimensioni e dell'età delle piante sulla risposta al disturbo	69
Influenza del clima sui regimi di disturbo	70
<b>Conclusioni</b>	<b>73</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>75</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>86</b>
<b>Allegati fotografici</b>	<b>87</b>

## Introduzione

### I regimi di disturbo

Una foresta è un'entità dinamica, in continua trasformazione. Ogni evento che altera gli equilibri ecologici di un popolamento, creando le condizioni per un cambiamento a livello strutturale viene definito *disturbo ecologico*. Il disturbo si manifesta con l'apertura di soluzioni di continuità nella volta arborea causate dalla morte di alberi dominanti e codominanti e la loro sostituzione ad opera di nuovi individui (Pickett & White 1985). La descrizione dei disturbi caratteristici di un dato paesaggio forestale, con particolare riferimento alla frequenza (es. tempo medio trascorso uno schianto e il successivo), alla severità (es. numero di piante coinvolte mediamente nello schianto) e alla distribuzione spaziale degli eventi di disturbo (es. disturbi a scala locale che interessano una o poche piante vs disturbi a scala di popolamento, che interessano simultaneamente più del 50% delle piante), prende il nome di *regime di disturbo* (Frelich 2002). Le piante che sopravvivono agli eventi di disturbo ne registrano il passaggio manifestando dei *rilasci di crescita*, in conseguenza del calo dell'intensità della competizione tra le piante, in particolare all'interno di popolamenti forestali densi, e quindi dei maggiori livelli di luce e nutrienti disponibili (Rozas 2001). Con il termine "rilascio" si intende solitamente un incremento di crescita radiale sostenuto, brusco e di notevole intensità (Frelich 2002). Gli incrementi di crescita radiale che sono da attribuire ad eventi di disturbo a livello dello strato arboreo ("*disturbi ecologici*"; Black & Abrams 2003) tendono a manifestarsi come variazioni di crescita brusche e sostenute, che poi declinano lentamente in un periodo di circa 10-15 anni (Nowacki & Abrams 1997). I rilasci risultanti da disturbi della copertura forestale sono generalmente definiti in base a tre parametri: repentinità, durata ed intensità (Henry & Swan 1974; Lorimer & Frelich 1989; Nowacki & Abrams 1997; Frelich 2002). I rilasci di crescita di natura climatica, legati cioè al verificarsi di fasi climatiche favorevoli per una data specie forestale, sono invece registrati nelle serie anulari come oscillazioni di alta frequenza che rispecchiano la variabilità climatica annuale (es. singoli anelli sottili associati a singole annate particolarmente siccitose), oppure come trends di medio-lungo termine (es. 30 anni) che evidenziano la risposta delle piante a cambiamenti ambientali i cui effetti si protraggono per alcune decadi. Determinando il numero di disturbi ecologici che hanno interessato una foresta in un dato arco temporale, e datando i rilasci di crescita ad essi associati riscontrati sulle serie dendrocronologiche, è possibile sviluppare delle *cronologie di disturbo*. La ricostruzione delle cronologie di disturbo

può essere fatta pertanto solo dopo essere riusciti ad individuare univocamente sulle serie dendrocronologiche la presenza di eventi di disturbo ed essere pervenuti alla loro collocazione temporale.

Il ruolo esercitato dai disturbi nel controllare le interazioni tra le specie e i cambiamenti strutturali all'interno dei popolamenti forestali ha assunto sempre maggiore importanza negli studi di ecologia applicata alle dinamiche forestali (D'Amato et al. 2008; Turner 2010). In particolare l'identificazione e la datazione dei rilasci di crescita sono cruciali per ricostruire le dinamiche forestali, comprenderne i fattori scatenanti, ed evidenziare le interazioni con altri processi ecosistemici su scale temporali di medio-lungo periodo (Black & Abrams 2003). Gli agenti di disturbo (es. vento, fuoco, attacchi di patogeni, etc.) sono infatti capaci di modellare la struttura forestale a seconda della loro intensità, ricorrenza, severità, estensione e durata (Zenner 2005). Ma gli eventi di disturbo possono agire anche su fenomeni ben più complessi, tanto che oggi la ricerca si sta focalizzando anche sui legami tra cambiamenti climatici a scala globale e regionale, la produttività primaria e gli eventi di disturbo "estremi" la cui frequenza potrebbe essere incrementata dai cambiamenti climatici (Schlyter et al. 2006): ad esempio Lindroth et al. (2009) hanno osservato come l'apertura di grandi buche nel soprassuolo di ecosistemi forestali a seguito di disturbi su larga scala (es. tempeste; incendi; attacchi patogeni) consenta di spiegare parte della variabilità interannuale nell'assimilazione di carbonio degli ecosistemi forestali. Poiché gli ecosistemi occupati da specie ai margini del proprio areale o al limite della propria distribuzione altitudinale sono particolarmente sensibili alle variazioni climatiche e maggiormente esposti ad eventi estremi (Grubb et al. 2002), è proprio in queste aree che l'analisi delle ampiezze anulari richiede un'accurata conoscenza dei processi ecologici per poter efficacemente monitorare la risposta dei popolamenti forestali al clima (Jump et al. 2010). Sempre in questi contesti biogeografici assume maggiore importanza la ricostruzione dei regimi di disturbo, in particolare in formazioni forestali naturali o poco impattate dall'azione antropica.

#### La dendrocronologia applicata allo studio dei regimi di disturbo

La crescita annuale delle specie forestali è influenzata da diversi fattori e la variazione annua delle ampiezze anulari può essere considerata come la sintesi finale dell'interazione tra le seguenti componenti (Cook e Kairiukstis, 1990):

- il trend biologico di crescita (A); questo è definito come il naturale decremento dell'ampiezza anulare lungo una sezione radiale legato all'aumento delle dimensioni della pianta che si verifica con l'età;
- il clima (C);
- i disturbi localizzati ( $D_1$ ), ovvero quegli eventi che avvengono all'interno del popolamento e i cui effetti interessano solo pochi individui;
- i disturbi diffusi ( $D_2$ ), ovvero quegli eventi che interessano l'intero popolamento (quali tempeste, valanghe, incendi, attività antropiche);
- la variabilità interannuale non spiegata ( $\epsilon$ ).

In base al *Principio della Crescita Aggregata* (Cook & Kairiukstis 1990) ogni anno l'ampiezza anulare (R) può essere espressa mediante la seguente formula:

$$\mathbf{R} = \mathbf{A} + \mathbf{C} + \mathbf{D}_1 + \mathbf{D}_2 + \boldsymbol{\epsilon}$$

Una serie dendrocronologica può essere quindi scomposta in un trend biologico, due segnali comuni (il clima e i disturbi esogeni) e due segnali individuali (i disturbi endogeni o localizzati e la variabilità non spiegata). I due segnali comuni permettono di comparare l'andamento delle serie anulari tra più piante e tra diversi popolamenti per stabilire con esattezza l'anno di formazione di ogni anello; il segnale individuale, invece, è caratteristico di ogni albero ed è influenzato, in particolare nelle foreste temperate dense, dai processi di competizione e dagli eventi di disturbo locali (Rozas 2001). L'obiettivo degli studi dendrocronologici applicati all'ecologia del disturbo, quindi alla ricostruzione delle cronologie di disturbo, è quello di neutralizzare gli effetti sulle serie anulari del trend biologico e soprattutto del clima per lasciar emergere, al contrario, la componente di crescita legata agli effetti dei disturbi (Henry & Swan 1974; Lorimer et al. 1988; Lorimer & Frelich 1989; Rozas 2001; Nowacki & Abrams 1997; Black & Abrams 2003; Fraver & White 2005; Šamonil et al. 2009).

Le reti dendrocronologiche rappresentano quindi ideali campioni di studio per esaminare sia come una specie forestale risponda al clima (Di Filippo et al. 2012) sia per ricostruire i regimi di disturbo e le loro variazioni lungo gradienti latitudinali ed altitudinali (Ziaco et al. 2012b). Per ottenere informazioni quantitative circa la frequenza, l'intensità, la scala spaziale e l'effetto sulle piante degli eventi di disturbo i dendroecologi hanno sviluppato un gran numero di approcci basati su dettagliate analisi degli incrementi radiali (Lorimer & Frelich 1989; Swetnam et al. 1999; Rubino & McCarthy 2004; Fraver & White 2005;

Thompson et al. 2007). Gli anelli annuali, infatti, possiedono un ampio potenziale per descrivere i regimi di disturbo, in particolare quando è possibile identificare i disturbi su cronologie molto lunghe ed in popolamenti naturali o semi-naturali, che hanno cioè risentito in minima parte del disturbo antropico (Nowacki & Abrams 1997). In letteratura esistono un gran numero di differenti metodi dendrocronologici per la ricostruzione delle cronologie di disturbo, i quali affrontano il problema dell'individuazione dei rilasci secondo differenti approcci, che vanno dalla definizione di un valore soglia di crescita radiale oltre il quale si è in presenza di un rilascio (metodi statici), all'utilizzo di serie anulari standardizzate e detrendizzate (metodi di standardizzazione), fino alla comparazione delle variazioni percentuali di crescita radiale in relazione a medie mobili (calcolate su finestre temporali variabili) dei valori di ampiezza anulare (metodi della media mobile) (Rubino & McCarthy 2004). Proprio questi ultimi sono i più comuni e quelli che hanno dimostrato risultati più soddisfacenti in particolare quando applicati in contesti di foreste temperate con copertura densa (Rubino & McCarthy 2004).

#### Foreste vetuste e regimi di disturbo

Il grado di naturalità di un ecosistema forestale è definito attraverso un gradiente legato alla progressiva comparsa all'interno del bosco di quegli attributi e al manifestarsi di quei processi dinamici che caratterizzano le foreste nelle ipotetiche condizioni naturali e che, al contrario, mancano del tutto nelle foreste gestite (Gilg 2004). La naturalità degli ecosistemi forestali può essere riconosciuta a scala di paesaggio (per superfici nell'ordine di centinaia di ha) oppure a scala di popolamento (10-20 ha) (Schnitzler & Borlea 1998). La forte antropizzazione che interessa da millenni il territorio europeo rende pressoché impossibile parlare di naturalità su larga scala mentre più comune è invece l'individuazione di lembi di paesaggio forestale rimasti relativamente vicini alle condizioni di naturale evoluzione in cui è possibile monitorare la funzionalità degli ecosistemi e la struttura dei popolamenti forestali. Queste foreste residuali si presentano oggi come ecosistemi di grande pregio ambientale e vengono classificate come *foreste vetuste* (*old-growth forests* nell'accezione anglosassone) (Di Filippo et al. 2004). L'identificazione di popolamenti con caratteristiche di vetustà si basa generalmente sull'analisi delle caratteristiche quali-quantitative di indicatori strutturali (es. volume della massa legnosa; area basimetrica; distribuzione diametrica delle piante; volume della necromassa; densità di grandi alberi; etc.) (Keddy & Drummond 1996; Emborg et al. 2000; Nilsson et al. 2003; Vandekerkhove et al. 2005; Vaillancourt et al. 2008; Blasi et al.

2010; Corona et al. 2010; Liira & Kohv 2010; Marchetti et al. 2010; Piovesan et al. 2010; Ziaco et al. 2012a). In accordo a questi parametri lungo la dorsale appenninica è ancora possibile osservare lembi di foresta vetusta primaria (*sensu* Frelich 2002) (Piovesan et al. 2005b; Piovesan et al. 2010), per i quali è lecito ipotizzare l'assenza totale di gestione da parte dell'uomo anche per lassi di tempo molto lunghi (>200-300 anni), in quanto vengono generalmente rispettati i valori soglia degli indicatori di vetustà maggiormente utilizzati in letteratura. In questi siti, inoltre, non risultano segni di passate utilizzazioni né da fonti storiografiche (es. documenti, foto aeree storiche), né da segni sul terreno (es. ceppaie, viabilità forestale) né da evidenze paleoecologiche (es. curve dendrocronologiche) (Piovesan et al. 2011). Ancora più frequenti, poi, sono quei siti ascrivibili al novero delle foreste vetuste *secondarie*, ovvero popolamenti che per varie ragioni (es. boschi di protezione; siti di interesse storico-culturale; antiche riserve di caccia nobiliari) sono stati preservati da interventi massicci di taglio ma hanno comunque subito un qualche tipo di pressione antropica (es. isolati tagli; pascolo del bestiame; etc.) (Ziaco et al. 2012a). Una delle principali condizioni per il riconoscimento di parametri di vetustà è proprio il mantenimento dei ***regimi di disturbo naturali*** (Schnitzler & Borlea 1998): dal punto di vista della funzionalità ecosistemica, infatti, le foreste vetuste si contraddistinguono per una elevata capacità autoregolatrice che, viceversa, manca nelle foreste gestite in cui è la mano dell'uomo che deve intervenire per permettere al bosco di superare perturbazioni esterne ed assicurarne la persistenza (Führer 2000). Quindi per determinare la naturalità di un popolamento è fondamentale capire se il regime di disturbo è legato all'azione di agenti naturali oppure se esso è influenzato dall'azione antropica, che altera la severità e la frequenza dei disturbi; in altre parole occorre distinguere sulle serie dendrocronologiche i ***disturbi naturali*** dai ***disturbi antropici***. Questa operazione non è quasi mai facile. La selvicoltura, infatti, è imitazione dei processi naturali: ad esempio i tagli a scelta imitano il naturale dinamismo forestale legato alla dinamica a buche che si verifica in presenza di disturbi a scala locale che asportano uno o pochi individui dominanti senescenti e/o moribondi (Jones et al. 2009). In tal caso i rilasci di crescita che si manifestano sulle piante scampate al taglio sono del tutto analoghi ai rilasci causati da eventi di disturbo naturali. In questo senso può essere d'aiuto l'individuazione di picchi di rilascio sincroni databili con certezza ad un unico anno, quello in cui sono stati condotti gli eventuali tagli. In ogni caso le pratiche selvicolturali rappresentano un disturbo severo per l'ecosistema forestale e hanno pertanto effetti sia sulla biodiversità che sulla funzionalità dell'ecosistema. In contesti ad elevata naturalità, invece, i disturbi rappresentano elementi peculiari degli ecosistemi, a cui le specie forestali si adattano e in funzione dei quali

si evolvono (Bengtsson et al. 2000). In base alla severità e all'estensione dei disturbi è anche possibile definire le superfici minime entro cui possono mantenersi le dinamiche naturali dei popolamenti forestali: per le foreste naturali e semi-naturali temperate la superficie minima per assicurare la presenza di tutte le fasi silvigenetiche e il mantenimento della funzionalità ecosistemica si ritiene generalmente essere pari a circa 10 ha (Emborg et al. 2000). Quindi la caratterizzazione e la ricostruzione storica dei regimi di disturbo in ambienti naturali (es. foreste vetuste) stà via via assumendo maggiore importanza nella comunità scientifica come indicatore di naturalità ed integrità degli ecosistemi forestali, in particolare in un momento storico in cui stanno prendendo piede numerose iniziative nazionali ed internazionali volte ad individuare e conservare i lembi più antichi di foreste rimaste in piedi in regioni fortemente antropizzate (Piovesan et al. 2011; Ziaco et al. 2012c). Poichè le foreste vetuste possono ospitare alberi molto longevi, che portano scritte negli anelli di accrescimento le variazioni climatiche di medio-lungo periodo e le tracce del passaggio dei principali eventi di disturbo la loro tutela e il monitoraggio rivestono un ruolo chiave per comprendere la risposta degli ecosistemi forestali ai cambiamenti globali (*global change*) (Di Filippo & Piovesan 2010).

### **Obiettivo della ricerca**

L'obiettivo principale della ricerca è stato quello di caratterizzare i regimi di disturbo all'interno di una rete di 9 faggete (*Fagus sylvatica* L.) altimontane, con spiccate caratteristiche di vetustà ed elevata naturalità, distribuite lungo un gradiente latitudinale che copre le Alpi austriache (3 siti), le Alpi carniche (1 sito), l'Appennino centrale (4 siti) fino al massiccio del Pollino (Appennino meridionale) (1 sito). La scelta di analizzare in dettaglio popolamenti di faggio è stata dettata da alcune importanti considerazioni. In primo luogo le faggete sono tra le comunità forestali più diffuse in Italia, dalle Alpi all'Appennino meridionale (compresa la Sicilia), che corrisponde al limite meridionale dell'areale della specie (Pignatti 1998). La faggeta rappresenta inoltre lo stadio successionale finale negli ambienti montani con clima sub-atlantico associati a condizioni di oceanicità e grazie alla sensibilità alle variazioni ambientali e alla larga diffusione il faggio è una specie che ben si presta al monitoraggio forestale: non a caso negli ultimi 10-20 anni diverse reti di monitoraggio dendrocronologico incentrate sul faggio e sulle faggete sono state sviluppate nella penisola italiana (Biondi 1993; Biondi & Visani 1996; Piovesan & Schirone 2000; Schirone et al. 2003; Piovesan et al. 2005a; Di Filippo et al. 2007). Lo scopo di questi network è quello di fornire indicatori dendrocronologici descrittivi delle condizioni di

naturalità delle faggete italiane, comprendere i principali agenti di disturbo responsabili delle dinamiche strutturali, investigare gli impatti dei cambiamenti climatici sulla produttività delle faggete lungo gradienti altitudinali e latitudinali ed infine comprendere i processi evolutivi dei popolamenti vetusti rispetto ai popolamenti gestiti. Questa ricerca è il risultato degli studi condotti negli ultimi 4-5 anni in base ai dati raccolti dalla rete di monitoraggio dendrocronologico sviluppata nel 2002 dall'Università degli Studi della Tuscia e gradualmente ampliata nel corso degli anni (Schirone et al. 2003).

Il lavoro è stato articolato in due fasi. Una prima fase è stata dedicata allo sviluppo di *indicatori cronologici* in grado di discriminare diversi livelli di naturalità in base a parametri legati all'età delle piante e alla loro storia auxologica, per consentire l'individuazione e il monitoraggio delle caratteristiche di vetustà all'interno di foreste non gestite non solo in base agli indicatori strutturali, per i quali come si è detto esiste un'ampia letteratura, ma anche attraverso la caratterizzazione delle strutture per età delle coperture forestali. La parte principale del lavoro è stata dedicata alla ricostruzione dei regimi di disturbo all'interno dei suddetti 9 popolamenti attraverso l'applicazione del metodo delle *boundary lines* (Black & Abrams 2003), un metodo per l'identificazione dei rilasci di crescita di formulazione relativamente recente ma che sta registrando una sempre maggiore applicazione in vari tipi di ecosistemi forestali (Splechtna et al. 2005; Nagel et al. 2007; Arabas et al. 2008; Copenheaver et al. 2009; Firm et al. 2009; Šamonil et al. 2009; Trotsiuk et al. 2012). Questo metodo, riconducibile ai metodi della media mobile, identifica i rilasci come impulsi di variazione percentuale di crescita che eccedono un dato valore minimo (Nowacki & Abrams 1997). Tuttavia piuttosto che utilizzare una soglia fissa la boundary line definisce il massimo potenziale di rilascio della specie e lo scala in relazione al tasso di crescita fatto registrare dalle piante nel periodo recente (es. negli ultimi 10 anni). Tale soglia di rilascio potenziale è definita da una funzione nonlineare (es. una curva esponenziale negativa) che definisce, per l'appunto, la boundary line (Black & Abrams 2003). I rilasci vengono definiti come moderati o intensi se l'impulso di crescita ricade rispettivamente tra il 20-49.9% o il 50-100% (ed eventualmente oltre) della boundary line. Il metodo della boundary line ha dimostrato di essere affidabile anche in ambiente temperato e su specie tolleranti dell'ombra, a patto che i risultati vengano adeguatamente contestualizzati con le caratteristiche biogeoclimatiche dei siti in esame (Ziaco et al. 2012b). Perché il metodo possa essere considerato attendibile è opportuno costruire le boundary lines utilizzando un gran numero di dati, opportunamente assemblati per considerare, come detto, le differenti risposte al disturbo delle specie in base alla quota, alla latitudine e alle condizioni pedologiche. Data la difficoltà di avere a

disposizione dataset così ampi il metodo, pur nella sua riconosciuta validità, non ha avuto applicazione in Italia. Questo studio infatti rappresenta la prima applicazione del metodo delle boundary lines per la ricostruzione dei regimi di disturbo su un campione di foreste naturali distribuite su una regione molto ampia (dalle Alpi all'Appennino meridionale). Il metodo è stato applicato dapprima nella sua formulazione tradizionale, basata sull'individuazione dei rilasci di *crescita radiale*, poi applicato secondo una formulazione modificata e del tutto innovativa basata sull'analisi delle variazioni di *area basimetrica*, in modo da caratterizzare le risposte delle piante agli eventi di disturbo sia in termini radiali che basimetrici. Sono stati valutati anche gli effetti delle dimensioni e dell'età delle piante sulla risposta al disturbo per stabilire delle *soglie di risposta*, ovvero valori limite diametrici e di età, oltre i quali le piante non rispondono più agli eventi di disturbo. Per completare la caratterizzazione dei regimi di disturbo è stata condotta un'analisi volta ad individuare eventuali relazioni tra la frequenza degli eventi, la loro intensità e il clima. Ciò è stato possibile comparando le variazioni di crescita delle faggete (sia radiale che basimetrica) con alcuni importanti pattern responsabili della variabilità climatica dell'emisfero boreale, quali la *Multidecadal Atlantic Oscillation* (AMO) e la *North Atlantic Oscillation* (NAO).

## Materiali e metodi

### I siti di studio

Lo studio è stato condotto su un campione di 9 faggete (*Fagus sylvatica* L.) ricadenti nella fascia bioclimatica altimontana, secondo la classificazione proposta da Piovesan et al. (2005a). I siti sono rappresentativi di due area biogeografiche ben distinte, ovvero le Alpi orientali (4 siti) e l'Appennino centro-meridionale (5 siti), e sono distribuiti lungo un gradiente latitudinale che va da circa 48° a circa 40° latitudine N (Fig. 1), coprendo un range altitudinale di ~600 m sulle Alpi (900-1500 m slm) e ~250 m sugli Appennini (1600-1850 m slm) (Tab.1). I siti alpini sono rappresentati dalle stazioni di Zwielauf (abbr. **zwi**), Gëißlucke (**gei**) e Kholersgraben (**kho**), ricadenti all'interno del Nationalpark Kalkalpen (Alta Austria), e dalla faggeta di Lateis (**lat**) (Alpi Carniche, Friuli Venezia Giulia). Nell'Appennino centrale sono state invece campionate le faggete di Scangive (**sca**), (Monte Terminillo, provincia di Rieti, Lazio), e i siti di Coppo del Principe (**cop**), Coppo del Morto (**com**) e Val Cervara (**vch**), ricadenti all'interno del Parco Nazionale d'Abruzzo Lazio e Molise (provincia de L'Aquila, Abruzzo). Nell'Appennino meridionale è stato infine campionato il sito di Cozzo Ferriero (**pol**), ricadente nel Parco Nazionale del Pollino. I siti italiani sono tutti inclusi in una rete di monitoraggio dendroecologico sviluppata a partire dal 2002 e che è stata via via allargata fino a comprendere attualmente più di 40 faggete. Tali siti, costituiti prevalentemente da popolamenti non gestiti, sono distribuiti lungo tutto il territorio nazionale e sono stati oggetto, negli scorsi anni, di numerosi studi riguardanti in particolare la bioclimatologia del faggio, il monitoraggio dendroecologico, la comprensione delle dinamiche strutturali (Piovesan et al 2005a; Di Filippo et al. 2007; Piovesan et al. 2010; Piovesan et al. 2011; Ziaco et al. 2012a; Ziaco et al. 2012b), fino alla realizzazione di un progetto sperimentale di educazione ambientale incentrato sulle foreste vetuste (Ziaco et al. 2012c).

I 9 popolamenti oggetto di studio vegetano su substrati rocciosi calcarei. Secondo la classificazione di Köppen–Trewartha (Trewartha 1968) il settore alpino comprendente le Alpi dell'Alta Austria e le Alpi carniche, in cui sono situati i siti di zwi, gei, kho e lat, è caratterizzato da un regime climatico di tipo temperato. Per quanto riguarda i siti dell'Appennino centro-meridionale, invece, il regime climatico può essere descritto come Mediterraneo montano, con inverni freddi e nevosi ed estati siccitose (Biondi 1993).

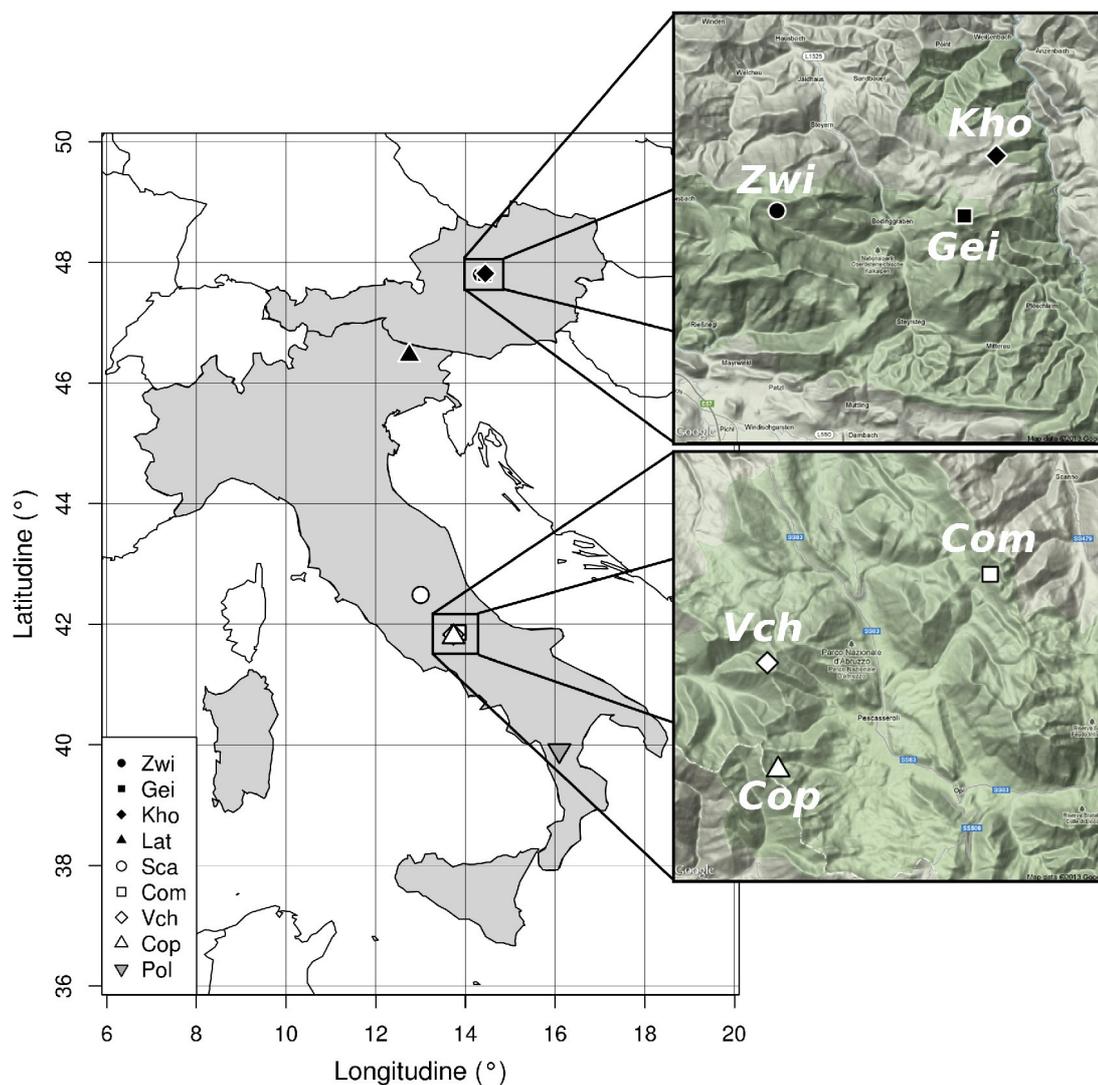


Fig. 1 Localizzazione geografica dei 9 siti oggetto di studio

Tabella 1 Informazioni geografiche relative ai siti oggetto di studio

Sito	Codice	Lat N (°)	Lon E (°)	Quota (m slm)	Alberi	Anelli	Periodo*
<b>Alpi</b>							
<i>Zwielauf</i>	zwi	47.7959	14.3337	1275 (1204-1341)	25	6749	1605-2012
<i>Göiflücke</i>	gei	47.7941	14.4284	1257 (1191-1339)	20	4587	1493-2012
<i>Kholersgraben</i>	kho	47.8148	14.4446	902 (805-994)	19	4730	1702-2012
<i>Lateis</i>	lat	46.4594	12.7489	1450 (1370-1530)	55	9608	1625-2009
<b>Appennini</b>							
<i>Scangive</i>	sca	42.4850	13.0022	1792 (1765-1820)	63	14268	1588-2011
<i>Coppo del Morto</i>	com	41.8628	13.8453	1850 (1800-1900)	56	14599	1454-2010
<i>Val Cervara</i>	vch	41.8291	13.7326	1725 (1600-1850)	67	16469	1451-2009
<i>Coppo del Principe</i>	cop	41.7883	13.7381	1625 (1500-1750)	30	7720	1633-2009
<i>Pollino</i>	pol	39.9059	16.0950	1800 (1770-1830)	15	4415	1622-2012

\* arco temporale coperto dalla serie dendrocronologica più lunga

La particolare morfologia del terreno delle stazioni appenniniche e la quota ovunque elevata rendono frequente il verificarsi di precipitazioni orografiche, che hanno permesso la formazione di un mesoclima ideale per l'insediamento della faggeta in queste stazioni al limite meridionale dell'areale della specie.

Tutti i siti oggetto di studio sono rappresentati da popolamenti vetusti, i quali manifestano il più alto grado di naturalità riscontrato in ambiente alpino ed appenninico in base ad alcuni tra i più utilizzati indicatori strutturali e dendrocronologici (Ziaco et al. 2012a). In particolare i siti del Parco Nazionale d'Abruzzo, Lazio e Molise, e più nello specifico le stazioni di Val Cervara e Coppo del Morto, sono dei lembi di foresta vetusta primaria, mentre i restanti siti sono ascrivibili al novero delle foreste vetuste secondarie, in quanto si tratta di popolamenti che pur essendo da molto tempo lasciati all'evoluzione naturale, potrebbero in passato aver subito un qualche tipo di pressione antropica (es. isolati tagli; pascolo del bestiame; etc.). Analisi strutturali effettuate recentemente nei 4 siti dell'Appennino centrale, dimostrano come tali popolamenti presentino caratteristiche strutturali tipiche di popolamenti vetusti (Piovesan et al. 2005b; Piovesan et al. 2010; Piovesan et al. 2011; Ziaco et al. 2012a). In particolare essi presentano grandi quantitativi di necromassa, ospitano numerosi individui di grandi dimensioni senescenti e/o moribondi, e numerose piante morte in piedi; frequenti sono inoltre distribuzioni diametriche riconducibili al tipo "sigmoide-ruotato", tipiche di popolamenti vetusti (Alessandrini et al. 2011), e un mosaico forestale a tessitura fine, con la contemporanea presenza sul soprassuolo di *eco-unità* (Oldemann 1990) in diverso stadio di sviluppo strutturale (Piovesan et al. 2010).

#### Analisi dendrocronologica

Per le analisi dendrocronologiche dei siti alpini sono state utilizzate 119 carote legnose (*zwi*=25, *gei*=20, *kho*=19, *lat*=55) mentre per i siti appenninici ne sono state utilizzate 231 (*sca*=63, *com*=56, *vch*=67, *cop*=30, *pol*=15), per un totale di 340 carote. La maggior parte delle carote sono state prelevate nel periodo 2009-2012 mediante trivella di Pressler ad 1.3 m d'altezza lungo il fusto, avendo cura di registrare il diametro delle piante campionate. Il campione è stato poi integrato con curve dendrocronologiche presenti nel database del DendrologyLab dell'Università degli Studi della Tuscia (dip.DAFNE). Le carote sono state portate in laboratorio, montate su listelli e scarificate in modo da esporre la sezione trasversale. La visibilità degli anelli è stata poi rafforzata utilizzando acqua e gesso. Le serie di ampiezze anulari sono state misurate attraverso uno stereomicroscopio interfacciato ad un

computer mediante il sistema CCTRMD (Computer Controlled Tree-Ring Measurement Device) di Aniol (1987) e l'utilizzo del software CATRAS (Aniol 1983). La misura delle ampiezze anulari di una carota è definita d'ora in avanti “*serie dendrocronologica*” o “*cronologia elementare*”. Le serie sono state poi datate mediante sincronizzazione visuale e statistica (Stokes & Smiley 1996). Per ogni sito le cronologie elementari correttamente crossdatate sono state combinate in una singola *cronologia stazionale*. Le cronologie stazionali sono state costruite a partire dall'anno in cui erano disponibili almeno 3 serie dendrocronologiche valide, utilizzando il valore di ampiezza anulare mediano: l'utilizzo della mediana, piuttosto che della media, permette di limitare l'effetto dei valori estremi in particolare quando la numerosità del campione è ridotta (es. nella parte iniziale della cronologia) (Biondi & Qeadan 2008). Le cronologie stazionali sono state poi mediate per sviluppare due cronologie regionali, una per le Alpi e una per gli Appennini.

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

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

con  $1 < n < [\text{lunghezza della serie}]$  e dove  $DBH_t$  = diametro misurato a petto d'uomo nell'anno  $t$  (cm) e  $RW_t$  = ampiezza anulare nell'anno  $t$  (cm). In questo modo ogni serie di ampiezze anulari è stata trasformata in una *serie storica di incremento diametrico*, in cui per ogni anno  $t$  è noto il diametro  $DBH_t$  della pianta. La stima dell'età delle piante con carote complete (comprendenti il midollo) si è basata sulle serie dendrocronologiche crossdatate. Tuttavia poiché molte piante campionate, in particolare quelle di dimensioni maggiori (es.  $DBH > 70$  cm), presentavano fusti cariati, non è stato possibile estrarre da esse carote complete di midollo. Per ogni carota incompleta è stato quindi stimato il raggio mancante attraverso il *metodo del centro geometrico* in cui la lunghezza del raggio mancante è data dalla differenza tra il raggio misurato ( $DBH/2$ ) e la lunghezza della carota, assumendo una sezione perfettamente circolare (Norton et al. 1987). Per le carote incomplete il cui raggio mancante era  $\leq 5$  cm, si è provveduto a stimare il numero di anelli mancanti con il metodo *RGR5* (Rozas 2003), secondo cui il numero degli anelli mancanti in una carota incompleta è stimabile dividendo la lunghezza della porzione mancante di carota per l'incremento medio degli ultimi

5 anelli più interni completamente visibili. Per ogni carota incompleta, quindi, è stato determinato un fattore di correzione dell'età: aggiungendo ad ogni serie il relativo fattore di correzione è stato possibile correggere l'età delle singole carote, determinando delle *serie storiche di età*. Da tali serie, tuttavia, sono state scartate quelle i cui fattori di correzione superavano il 90° percentile della distribuzione delle stime degli anelli mancanti per ogni sito. Un test di controllo effettuato su un campione di carote complete di midollo, alle quali venivano rimossi i 5 cm più interni, ha fornito valide stime del numero di anelli mancanti, con errori mediamente < 10 anni. In questo modo è stato possibile ottenere 148 serie storiche di età valide (43.5% del campione totale), in cui per ogni anno  $t$  è nota l'età della pianta. Le età sono da considerarsi “a petto d'uomo” (1.3 m), pertanto la reale età delle piante potrebbe essere maggiore di quella stimata. A questo proposito Šamonil et al. (2009) riportano come il tempo necessario a raggiungere l'altezza di 1.3 m per un semenzale di faggio sia mediamente pari a 14 anni in popolamenti dei Carpazi occidentali. Tuttavia, non avendo dati a disposizione per l'areale meridionale del faggio, si è preferito non effettuare nessuna correzione in questo senso.

Le serie di ampiezza anulare sono state infine trasformate in serie di Incremento di Area Basimetrica (BAI), espresso in  $\text{cm}^2 \text{ anno}^{-1}$ , sottraendo due volte l'ampiezza anulare annua ( $w_t$ ) dal diametro fuori corteccia ( $\text{DBH}_t$ ; Piovesan et al. 2008) in base alla seguente formula:

$$\text{BAI}_t = \frac{\pi}{4} \left[ \text{DBH}_t^2 - (\text{DBH}_t - 2w_t)^2 \right]$$

#### Indicatori cronologici di vetustà

Per valutare il grado di vetustà dei popolamenti studiati secondo criteri legati all'età delle piante e alla loro distribuzione all'interno del piano dominante, sono stati selezionati alcuni indicatori cronologici già noti in letteratura e ne sono stati messi a punto di nuovi. Inizialmente sono stati utilizzati due indicatori, detti **Age<sub>max</sub>** e **Age<sub>5</sub>**, definiti rispettivamente come la lunghezza della serie dendrocronologica più vecchia per sito e la lunghezza media delle 5 serie più vecchie per sito, espresse in anni (Piovesan et al. 2010; Ziaco et al. 2012a). Sono stati poi definiti dei nuovi indicatori cronologici, basati non sulla lunghezza delle serie dendrocronologiche (le quali, come detto, possono mancare di un certo numero di anelli se la carota è spezzata o cariata), bensì sulle serie storiche di età, ovvero su quelle curve per le quali è stato possibile effettuare la correzione dell'età stimando il numero di anelli mancanti.

In particolare ci si è concentrati su: età media delle piante nel piano dominante ( $DBH \geq 40$  cm) ( $Age_{canopy}$ ; espressa in anni); range di età delle piante dominanti ( $Age_{range}$ ; espressa in anni); deviazione standard dell'età delle piante dominanti ( $SD$ ; espressa in anni). Infine è stato sviluppato il cosiddetto *Indice Medio di Soppressione (MSI)*, definito, in ogni sito, come il periodo medio in cui la crescita radiale di una pianta è minore di una data soglia di soppressione per almeno 10 anni consecutivi. La soglia minima per distinguere il piano dominante da quello dominato è stata scelta in accordo al valore riconosciuto per il genere *Fagus* (compreso *F. sylvatica*) per distinguere gli individui del piano dominato (detti anche “alberi del futuro”) dalle piante dominanti (“alberi del presente”) (Peters 1992). L'Indice Medio di Soppressione è stato calcolato dividendo il numero totale di anni con crescita radiale  $< 0.5$  mm anno<sup>-1</sup> per il numero totale di carote di ciascun sito. Sono stati considerati solo periodi di almeno 10 anni consecutivi; periodi di soppressione  $\geq 10$  anni inframezzati da non più di 3 anelli  $\geq 0.5$  mm anno<sup>-1</sup> sono stati considerati come un'unica fase di soppressione. La soglia 0.5 mm anno<sup>-1</sup> è stata scelta in base al lavoro di Canham (1990).

#### Costruzione delle boundary lines ed individuazione dei rilasci di crescita

Per il calcolo delle boundary lines valide per le Alpi e per gli Appennini sono stati utilizzati rispettivamente 32470 e 61822 anelli. Il campione alpino, oltre a comprendere i 4 siti oggetto di studio, è stato integrato con 6796 anelli relativi ai siti altimontani di Paularo, Colle dei Galli e Sauris (per un totale di 7 siti considerati) mentre il campione appenninico è stato integrato con 4351 anelli relativi ai siti altimontani di Collelongo e Tocchito (per un totale di 7 siti), già utilizzati per il calcolo delle boundary lines del faggio nella fascia bioclimatica altimontana riportate in Ziaco et al. (2012b). Solo le serie dendrocronologiche regolarmente datate a seguito di crossdatazione visuale e statistica sono state utilizzate. Ogni serie di ampiezze anulari è stata filtrata attraverso l'applicazione di una media mobile a 10 anni secondo la tecnica proposta da Nowacki & Abrams (1997), e in base ad essa sono stati calcolati, per ogni anello di ogni serie utilizzata, la *variazione percentuale di crescita radiale (Percent growth change [GC])*, e la *crescita radiale precedente (Prior growth [PG])*. GC è calcolato come  $(M_2 - M_1) / M_1$  dove  $M_1$  è dato dalla crescita media nei 10 anni precedenti (incluso quello per cui si sta calcolando il GC), mentre  $M_2$  è dato dalla crescita media nei 10 anni seguenti; PG è definito invece come crescita media nei 10 anni precedenti ogni anello (per una rappresentazione grafica del significato di  $M_1$ ,  $M_2$  e PG si veda Fig.1 in Black & Abrams (2004)). I primi e gli ultimi 10 anelli di ogni serie sono stati scartati, poiché quello è

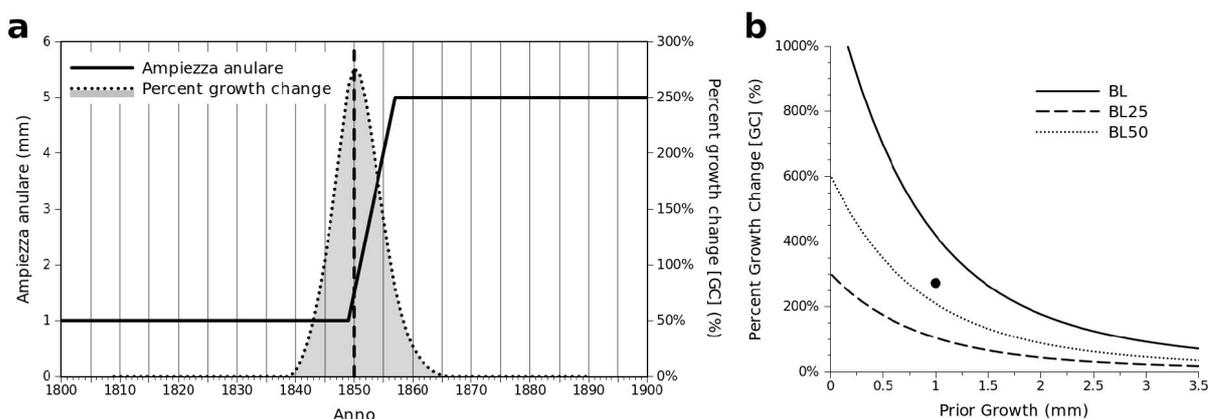
il numero minimo di anelli richiesto nella formula del GC (Black & Abrams 2003). Le due boundary lines sono state costruite considerando solo i valori positivi di GC e i valori di PG ad essi associati, i quali sono stati divisi in sottoclassi di  $0.25 \text{ mm anno}^{-1}$  per  $0 < \text{PG} < 1 \text{ mm}$ , e in sottoclassi di  $0.5 \text{ mm anno}^{-1}$  per  $\text{PG} \geq 1 \text{ mm}$  (Splechtna et al. 2005). L'utilizzo di sottoclassi di  $0.25 \text{ mm}$  è stato scelto per affinare la qualità delle boundary lines per le classi più piccole di prior growth ( $\text{PG} < 1 \text{ mm anno}^{-1}$ ), le quali, solitamente, mostrano gli impulsi di GC maggiori e possono quindi alterare significativamente l'andamento generale della boundary line. Per ogni sottoclasse di PG con almeno 15 osservazioni, i valori di GC più alti sono stati estratti, selezionando i 5 maggiori per le sottoclassi di  $0.25 \text{ mm anno}^{-1}$  e i 10 maggiori per le sottoclassi di  $0.5 \text{ mm anno}^{-1}$ .

Tre tipi di funzione proposti in letteratura per il calcolo delle boundary lines del faggio sono state interpolate ai valori massimi di GC: una funzione esponenziale negativa (Black & Abrams 2003), una esponenziale negativa modificata (Šamonil et al. 2009) e una doppia esponenziale negativa (Splechtna et al. 2005; Trotsiuk et al. 2012). Il modello migliore è stato selezionato basandosi sul valore più alto di  $R^2$  corretto ( $R^2_{\text{adj}}$ ).

Per la costruzione delle boundary lines di area basimetrica è stato seguito un approccio del tutto analogo a quello utilizzato per la costruzione delle boundary lines radiali. Utilizzando le stesse serie dendrocronologiche usate in precedenza, espresse in questo caso come serie di incrementi di area basimetrica (BAI), sono stati calcolati per ogni anello di ogni serie, mediante le formule sopra riportate, i valori di *variazione percentuale di BAI* (**Percent BAI Change [BC]**) e il BAI medio nei 10 anni precedenti (**Prior BAI [PB]**; si noti che PB, con questa formulazione, altro non è che l'incremento corrente). Le boundary lines sono state costruite estraendo i 5 valori massimi di BC per sottoclassi di PB di  $2.5 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$  (con  $0 < \text{PB} < 10 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$ ), e i 10 valori massimi per sottoclassi di PB di  $5 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$  (per  $\text{PB} \geq 10 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$ ), e poi interpolando tali valori massimi di BC con gli stessi tre tipi di funzione sopra descritti.

I rilasci di crescita associati al verificarsi di un disturbo (cosiddetti “veri rilasci” o “rilasci ecologici”) sono stati individuati analizzando, per ogni serie, le coppie di valori PG-GC e registrando i punti in cui il GC superasse il 25% o il 50% della boundary line per quel dato valore di PG. Le soglie del 25% e del 50% hanno permesso di discriminare *rilasci moderati* ( $25\% < \text{GC} < 50\%$  della boundary line) e *rilasci intensi* ( $\text{GC} \geq 50\%$  della boundary line) (Black & Abrams 2003). Poichè i rilasci di crescita si manifestano come “impulsi” di GC positivo per uno o più anni consecutivi, ogni impulso è stato conteggiato una sola volta, e la datazione del disturbo effettuata registrando l'anno in cui è massimo il valore di GC (Fig. 2)

(Nowacki & Abrams 1997). Approccio analogo è stato seguito per individuare i rilasci di crescita in termini di area basimetrica, analizzando le coppie di valori PB-BC su ogni serie. La soglia del 25% scelta per discriminare i veri rilasci moderati dai rilasci dovuti a fasi climatiche positive è più conservativa rispetto alla soglia canonica del 20% (Black & Abrams 2003) poiché il faggio è particolarmente sensibile alle fluttuazioni climatiche, in particolare nella porzione più meridionale del suo areale (Biondi 1993; Piovesan et al. 2005a), pertanto impulsi di rilascio maggiori del 20% potrebbero, alle nostre latitudini, essere ancora considerati legati a periodi climaticamente favorevoli.



**Fig. 2** Rappresentazione grafica di un rilascio di crescita individuato mediante l'analisi del Percent growth change [GC] e dalla boundary line. (a) In una serie dendrocronologica teorica in cui una pianta, in conseguenza della morte di un individuo ad essa adiacente, passa in pochi anni da una crescita media decennale (Prior growth [PG]) di 1 mm anno<sup>-1</sup> ad una crescita media di 5 mm anno<sup>-1</sup>, il rilascio è descritto da un impulso di GC il cui picco massimo si verifica in corrispondenza dell'anno in cui ha inizio, sulla serie di ampiezze anulari, l'aumento di crescita legato alla maggiore disponibilità di luce e nutrienti (nell'esempio il 1850). (b) Se per il livello di PG registrato nel 1850 (nell'esempio 1 mm anno<sup>-1</sup>), il GC (nell'esempio ~270%) supera almeno il 25% del massimo potenziale di rilascio stimato attraverso la boundary line, allora questo evento viene riconosciuto come un rilascio associato ad un disturbo ecologico e non legato a fattori climatici. In questo esempio il rilascio individuato è legato ad un disturbo intenso, poiché il GC supera il 50% della boundary line per valori di PG = 1 mm anno<sup>-1</sup>.

### Effetto del clima sul regime di disturbo

Per verificare l'eventuale effetto di grandi patterns climatici a scala globale sul regime di disturbo dei siti alpini ed appenninici, le serie di GC e BC sono state confrontate in relazione a due importanti drivers climatici dell'emisfero boreale, ovvero la **Multidecadal Atlantic Oscillation (Indice AMO)** e la **North Atlantic Oscillation (Indice NAO)**. I valori dell'indice AMO sono generalmente espressi come una media mobile con finestra di 10 o 11 anni delle anomalie di temperatura superficiale (SSTA) del tratto di Oceano Atlantico compreso tra l'Equatore e la Groenlandia (Enfield et al. 2001; Wang et al. 2011). L'indice NAO è stato invece espresso applicando un filtro smoothing spline a 30 anni alle differenze

normalizzate di pressione al livello del mare (SLP) misurate tra una stazione atlantica meridionale (Lisbona) e una settentrionale (Stykkisholmur/Reykjavik) (Hurrell 1995). La rappresentazione dell'indice NAO attraverso una smoothing spline a 30 anni è una pratica comune in letteratura, in quanto consente di evidenziare trend di medio periodo eliminando la variabilità ad alta frequenza (Trouet et al. 2009). Attraverso la tecnica della *wavelet analysis* (Torrence & Compo 1998) si è voluta in primo luogo verificare la presenza di ciclicità nelle serie di growth change radiale e basale e nella frequenza degli eventi di disturbo. Il termine wavelet analysis o *trasformata wavelet* si riferisce alla rappresentazione di un segnale mediante l'uso di una forma d'onda (nota come *wavelet madre*) che permette di scomporre il segnale in esame dentro uno spazio di tempo/frequenza, consentendo di determinare sia le mode dominanti di variabilità che come tali mode varino nel tempo (Torrence & Compo 1998). Nel nostro caso l'applicazione di una trasformata wavelet *continua* permette di identificare le principali periodicità di una serie temporale (es. serie di ampiezze anulari; serie storiche di percent growth change) e l'evoluzione delle loro ampiezze, frequenze e fasi. Successivamente attraverso la tecnica della *crosswavelet analysis* (Grinsted et al. 2004) si è invece verificata l'eventuale presenza di fasi concordanti e potenze comuni tra l'oscillazione delle due variabili (clima e variazioni di crescita) e la durata dei loro cicli, alla luce del legame di causalità atteso tra di esse. Il confronto con ognuno dei due indici climatici è stato effettuato utilizzando, tra quelle presenti in letteratura, una serie storica strumentale e una ricostruita in base a variabili proxy. Per quanto riguarda l'indice AMO la serie strumentale di riferimento è quella di Kaplan et al. (1998), relativa al periodo 1856-2000 e scaricabile dal sito della National Oceanic & Atmospheric Administration, mentre per la serie ricostruita si è fatto riferimento al lavoro di Gray et al. (2004), per il periodo 1600-2000. La serie strumentale dell'indice NAO è quella di Hurrell (1995) per il periodo 1865-2000 mentre per la serie ricostruita si è fatto riferimento al lavoro di Cook et al. (2002), per il periodo 1600-2000.

Le analisi statistiche, il computo numerico delle boundary lines, le analisi wavelet e crosswavelet sono stati effettuati con il software statistico R (R Development Team 2012), in particolare attraverso i pacchetti *dplR* (Bunn et al. 2012), *wavelet* (Aldrich 2012) e *biwavelet* (Gouhier & Grinsted 2013).

## Risultati

### Caratterizzazione dendrocronologica dei siti

Le analisi dendrocronologiche hanno permesso di sviluppare 9 cronologie stazionali robuste, oltre a 2 cronologie medie valide rispettivamente per le Alpi e gli Appennini (d'ora in avanti definite *cronologie regionali*) (Tabella 2 e Fig.3). Le cronologie coprono un lasso di tempo di quasi 4 secoli sulle Alpi e più di 5 secoli sugli Appennini. I siti campionati, infatti, comprendono alcuni tra i popolamenti con maggiore naturalità presenti sul territorio nazionale e più in generale nell'area del Mediterraneo, all'interno dei quali sono frequenti individui plurisecolari. In particolare i siti di Val Cervara e Coppo del Morto ospitano gli individui di faggio più vecchi dell'intero emisfero boreale (Piovesan et al. 2010). Le faggete alpine presentano generalmente incrementi radiali superiori a quelle appenniniche (Tabella 2), date le migliori condizioni climatiche e ambientali che, a parità di fascia bioclimatica, sperimenta il faggio sulle Alpi piuttosto che in stazioni al limite meridionale del proprio areale, dove la siccità estiva costituisce un importante fattore limitante per la crescita (Piovesan et al. 2005).

**Tabella 2** Principali parametri dendrocronologici delle cronologie stazionali e regionali

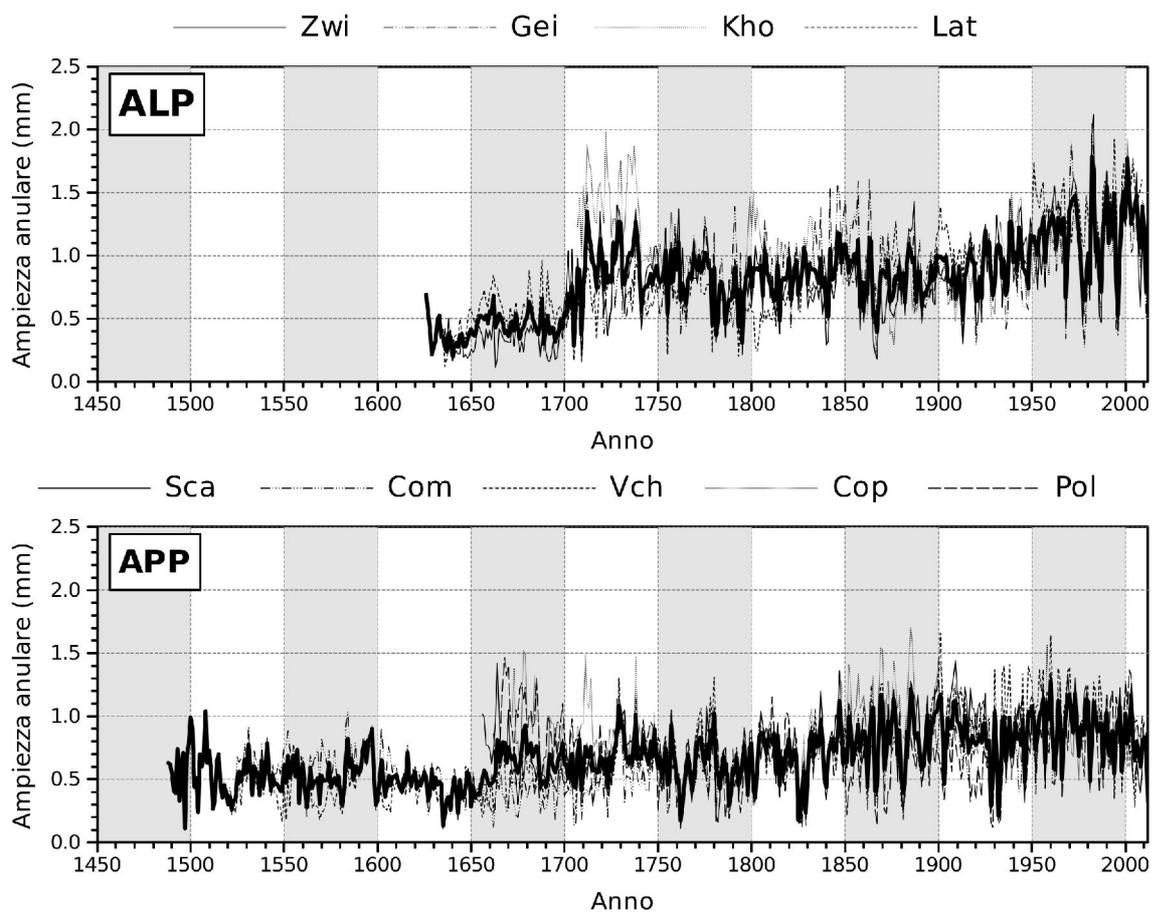
Sito	MW <sup>1</sup>	SD <sup>2</sup>	Sens <sup>3</sup>	Gini	Ar1 <sup>4</sup>	Lunghezza	Periodo <sup>5</sup>
zwi	0.786	0.36	0.276	0.26	0.67	378	1635-2012
gei	0.894	0.323	0.291	0.201	0.448	316	1697-2012
kho	0.995	0.307	0.17	0.171	0.735	306	1707-2012
lat	0.821	0.338	0.166	0.228	0.841	384	1626-2009
sca	0.754	0.247	0.243	0.185	0.548	356	1656-2011
com	0.621	0.231	0.265	0.211	0.578	523	1488-2010
vch	0.664	0.301	0.263	0.254	0.7	494	1516-2009
cop	0.838	0.275	0.259	0.183	0.497	338	1672-2009
pol	0.724	0.266	0.276	0.208	0.552	351	1662-2012
alp*	0.822	0.298	0.185	0.204	0.757	387	1626-2012
app**	0.667	0.22	0.226	0.188	0.604	525	1488-2012

<sup>1</sup> Ampiezza anulare media; <sup>2</sup> Deviazione standard; <sup>3</sup> Sensitività media calcolata secondo l'eq. 2 in Biondi & Qeadan (2008a);

<sup>4</sup> Coefficiente di Autocorrelazione di 1° ordine; <sup>5</sup> Porzione validata di cronologia in cui sono presenti almeno 3 serie per sito

\*Cronologia media dei 4 siti alpini

\*\*Cronologia media dei 5 siti appenninici



**Fig. 3** Cronologie stazionali dei 4 siti alpini (in alto) e dei 5 siti appennini (in basso). In grassetto sono evidenziate le 2 cronologie regionali delle Alpi e degli Appennini.

Il grado di sincronizzazione statistica, determinato utilizzando il coefficiente di coincidenza (*Gleichläufigkeit*) e il *t* di Student, tra cronologie stazionali e tra quest'ultime e le rispettive cronologie regionali è generalmente alto, in particolare tra siti appartenenti alla stessa macroregione (Tabella 3). Tra i siti alpini il minor grado di sincronizzazione con le altre cronologie stazionali e con la cronologia regionale si ha per il sito di Kholersgraben, che vegeta a quote inferiori rispetto alle altre stazioni. La stazione di Lateis mostra invece un buon livello di sincronizzazione non solo con i siti austriaci ma anche con i siti appenninici, in particolare Coppo del Morto e Val Cervara, probabilmente in conseguenza della posizione marginale rispetto all'arco alpino e dell'esposizione meridionale che favoriscono condizioni di maggiore oceanicità del clima, con l'ingresso di masse d'aria umida dal Mar Adriatico, a differenza dei siti alpini, dove invece è presente una forte componente di continentalità del clima. È interessante la buona sincronizzazione tra il sito di Coppo del Morto (la cronologia più lunga disponibile per l'Appennino) con le cronologie di Zwielauf e Gëißlucke, che potrebbe nascondere un segnale climatico comune di medio-lungo periodo.

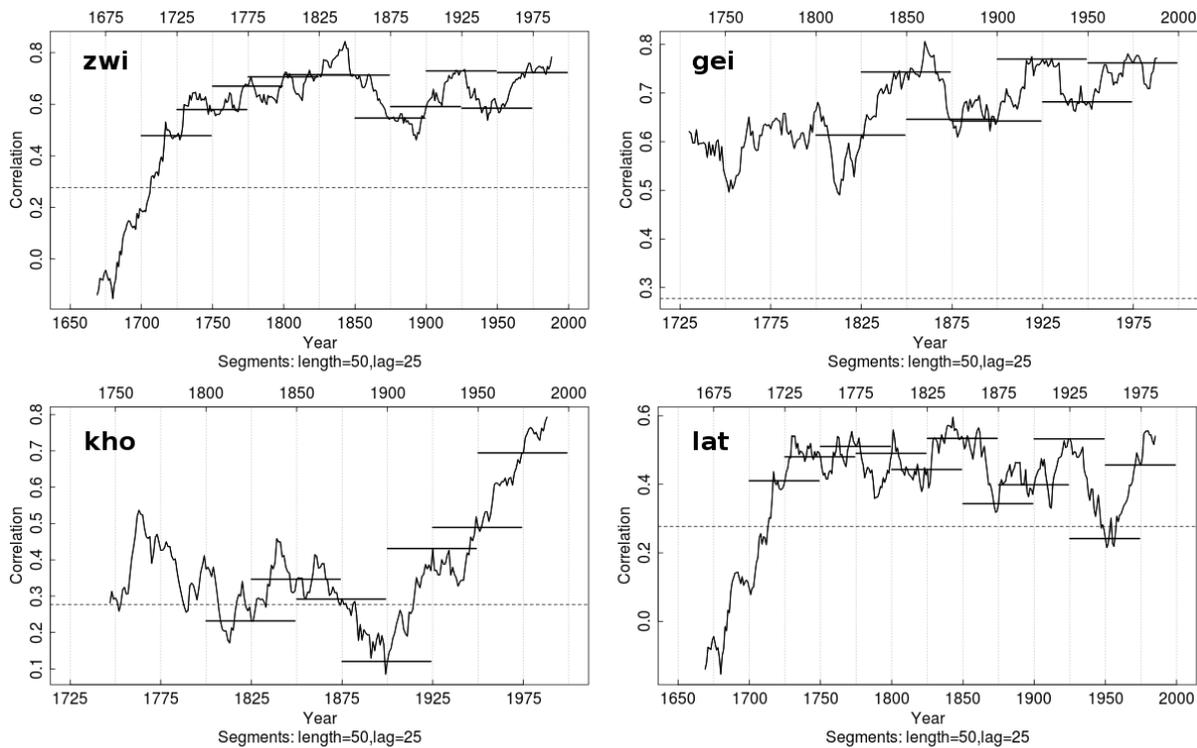
**Tabella 3** Coefficienti di coincidenza (*Gleichläufigkeit*) e relativi t di student tra le cronologie stazionali e regionali (in grassetto i confronti tra siti appartenenti alla medesima macroregione)

	gei	kho	lat	sca	com	vch	cop	pol	alp	app
<b>zwi</b>	<b>83.3***</b> t = 20.5	<b>64.3***</b> t = 8.9	<b>65.5***</b> t = 15.3	52.4 t = 4.5	58.3*** t = 10.1	52.4 t = 8.9	52.1 t = 1.1	58.2** t = 2.1	<b>83.1***</b> t = 46.5	54.0 t = 8.3
<b>gei</b>		<b>65.8***</b> t = 5.7	<b>67.7***</b> t = 10.2	53.7 t = 4.1	60.1*** t = 6.2	56.9** t = 3.8	55.8* t = 3.3	60.0*** t = 4.7	<b>89.0***</b> t = 27.2	56.8** t = 5.4
<b>kho</b>			<b>57.6**</b> t = 3.2	53.5 t = 0.6	57.6** t = 2.1	56.1* t = 1.0	50.3 t = 0.4	55.1* t = 3.5	<b>71.5***</b> t = 14.0	53.6 t = 0.2
<b>lat</b>				58.8*** t = 7.9	61.9*** t = 12.8	58.6*** t = 11.9	57.0** t = 4.6	57.1** t = 4.0	<b>74.9***</b> t = 24.9	59.8*** t = 12.6
<b>sca</b>					<b>69.5***</b> t = 15.3	<b>69.9***</b> t = 16.2	<b>72.3***</b> t = 12.3	<b>65.8***</b> t = 6.3	54.2 t = 5.6	<b>80.8***</b> t = 24.8
<b>com</b>						<b>73.2***</b> t = 21.8	<b>70.5***</b> t = 11.3	<b>69.0***</b> t = 5.3	58.6*** t = 11.7	<b>83.1***</b> t = 30.7
<b>vch</b>							<b>77.2***</b> t = 13.4	<b>68.4***</b> t = 5.7	55.2* t = 10.6	<b>81.9***</b> t = 43.5
<b>cop</b>								<b>69.6***</b> t = 8.9	53.4 t = 2.3	<b>82.3***</b> t = 23.9
<b>pol</b>									56.6** t = 2.4	<b>78.4***</b> t = 13.8
<b>alp</b>										55.5* t = 10.6

Livello di significatività \*90% \*\*95% \*\*\*99%

Anche il sito del Pollino, la stazione più meridionale tra quelle analizzate, mostra non solo una buona sincronizzazione con i siti dell'Appennino centrale, ma anche con alcuni siti alpini, in particolare Gëißlucke e Lateis.

La correlazione tra le cronologie stazionali e la rispettiva media regionale si mantiene stabile e significativa ( $p < 0.05$ ) nel tempo, anche se alcune individualità emergono in particolare in alcuni siti con caratteristiche stazionali peculiari (Fig.4). Sulle Alpi, ad esempio, il sito di Kholersgraben mostra una correlazione piuttosto bassa con i restanti siti nei periodi 1800-1850 e 1875-1925. Questa stazione, presumibilmente, trovandosi al limite altitudinale inferiore della fascia bioclimatica altimontana delle Alpi, ovvero nella zona di transizione con la fascia montana, sperimenta condizioni di crescita diverse dai restanti siti (es. stagione vegetativa più lunga), come testimoniato anche dalla crescita radiale media che è la più alta tra i siti studiati (0.995 mm; Tabella 2). Inoltre vi sono evidenze (vedi più avanti) che il sito di Kholersgraben, forse anche in virtù della quota minore, sia stato sottoposto a tagli, anche intensi, nei secoli scorsi. Nei siti appenninici la correlazione tra cronologie stazionali e cronologia regionale si mantiene alta lungo tutto il periodo analizzato anche se emergono dei periodi, in particolare nel VXIII secolo, in cui all'interno di alcuni siti si manifesta una certa individualità nelle cronologie di Coppo del Morto (1600-1650) e Val Cervara (1650-1700) (Fig. 5).

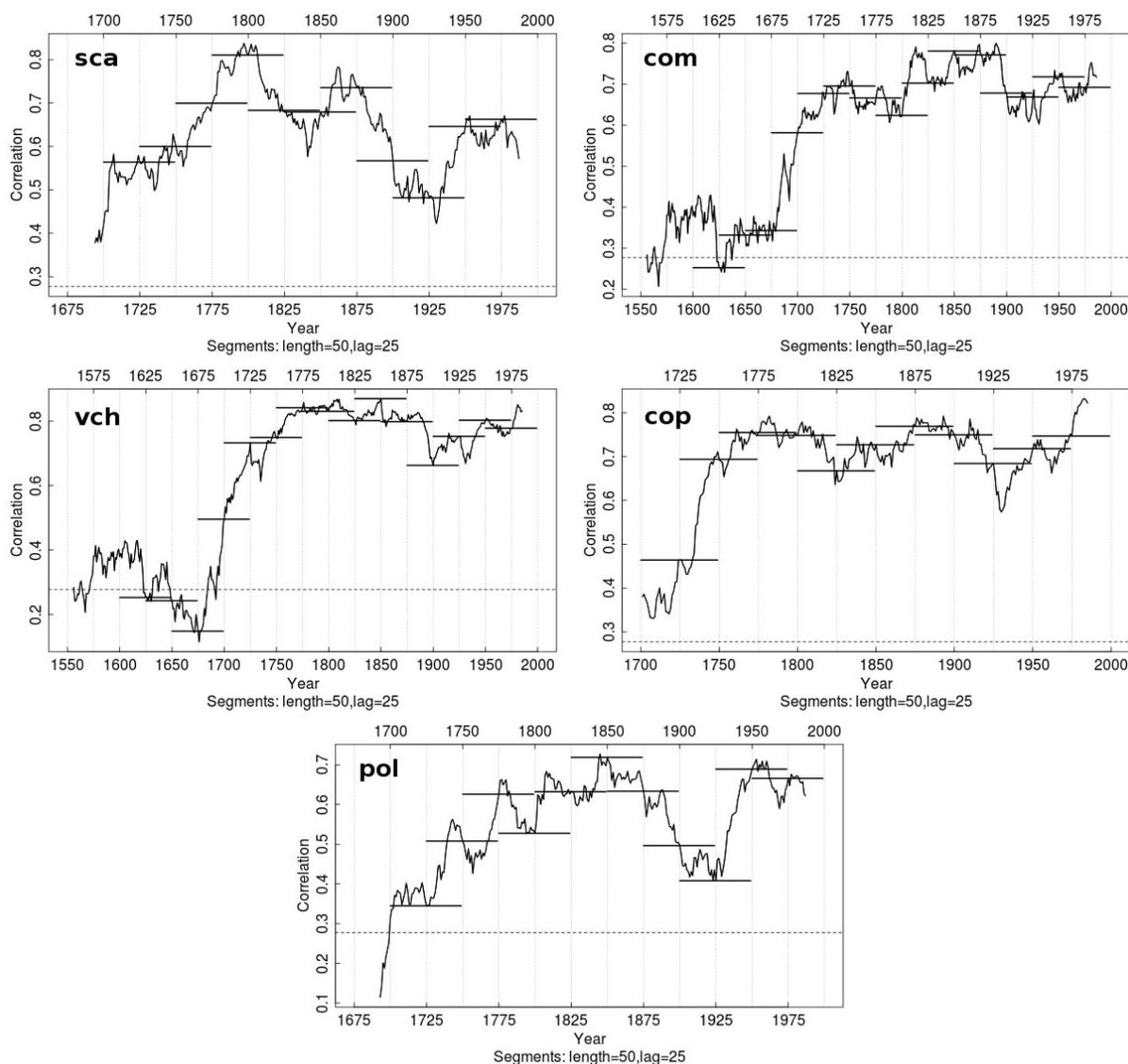


**Fig. 4** Coefficienti di correlazione mobile rho di Spearman calcolati per finestre di 50 anni tra le cronologie stazionali alpine e la cronologia media regionale, calcolata escludendo di volta in volta il sito in esame (per gli acronimi si veda Tabella 1). Le serie sono state "sbiancate", ovvero è stata rimossa l'autocorrelazione di 1 ordine ( $ar(1)$ ); la linea tratteggiata rappresenta la probabilità  $p=0.05$  (Bunn 2010).

Va detto, tuttavia, che una copertura completa dei suddetti periodi si ha solo con i siti di val cervara e coppo del morto, il che contribuisce a rendere meno solida la sincronizzazione statistica, inficiandone la qualità molto più di quanto in realtà non emerga da un confronto visuale tra le cronologie. Infine nel sito meridionale del Pollino la correlazione con la media dell'Appennino centrale appare leggermente più bassa, probabilmente in conseguenza della marginalità del sito, anche se si mantiene sopra il livello di significatività statistica per tutto il periodo considerato.

#### Indicatori cronologici di vetustà

I siti oggetto di studio sono tutti caratterizzati dalla presenza di individui pluricentenari, che superano di molto quello che fino a pochi anni fa era ritenuto il potenziale massimo di longevità della specie *Fagus sylvatica* (~200-250 anni) e in generale di specie di latifoglie decidue (Loehle 1988) (Tabella 4).



**Fig. 5** Coefficienti di correlazione mobile  $\rho$  di Spearman calcolati per finestre di 50 anni tra le cronologie stazionali appenniniche e la cronologia media regionale, calcolata escludendo di volta in volta il sito in esame (per gli acronimi si veda Tabella 1). Le serie sono state “sbiancate”, ovvero è stata rimossa l'autocorrelazione di 1 ordine ( $ar1$ ); la linea tratteggiata rappresenta la probabilità  $p=0.05$  (Bunn 2010).

I siti più vecchi sono quelli appenninici, in particolare Val Cervara e Coppo del Morto dove, tra le piante campionate, si hanno almeno 5 serie dendrocronologiche con più di 500 anelli. Sulle Alpi è esemplificativo il caso di Gëißlucke, in cui una singola serie (peraltro incompleta) raggiunge la considerevole lunghezza di 520 anni, a fronte di una lunghezza media delle serie di molto inferiore. In tutti i siti, comunque, sono frequenti serie dendrocronologiche di lunghezza superiore ai 300 anni, a testimonianza dell'elevata naturalità di queste stazioni e dell'assenza di un disturbo antropico significativo sui popolamenti, almeno negli ultimi 100-150 anni, che ha permesso la sopravvivenza di individui plurisecolari.

**Tabella 4** Indicatori cronologici di vetustà (N.B. Le età sono da intendersi a petto d'uomo [1.3 m])

	$\bar{Age}_5$ (anni)	$\bar{Age}_{max}$ (anni)	$\bar{Age}_{canopy}$ (anni)	$\bar{Range}$ (anni)	$\bar{SD}$ (anni)	$\bar{MSI}$ (anni)	n*
<i>Zwielauf</i>	382	408	329	204 (244-448)	61.8	25.2	15 (60%)
<i>Göißlucke</i>	357	520	290	185 (182-367)	63.1	15.5	10 (50%)
<i>Kholersgraben</i>	308	311	296	87 (241-328)	26.8	9.1	14 (74%)
<i>Lateis</i>	369	388	228	241 (146-387)	69.4	15.5	24 (44%)
<i>Scangive</i>	363	425	305	193 (228-421)	48.1	16.7	26 (41%)
<i>Coppo del Morto</i>	527	559	345	362 (195-557)	136.4	36.9	12 (21%)
<i>Val Cervara</i>	509	562	322	460 (120-580)	95.9	31.6	28 (42%)
<i>Coppo del Principe</i>	342	380	309	186 (218-404)	59.9	35.8	13 (43%)
<i>Pollino</i>	363	391	357	130 (272-402)	44.2	17.7	6 (40%)

§ Parametri misurati sulle serie dendrocronologiche

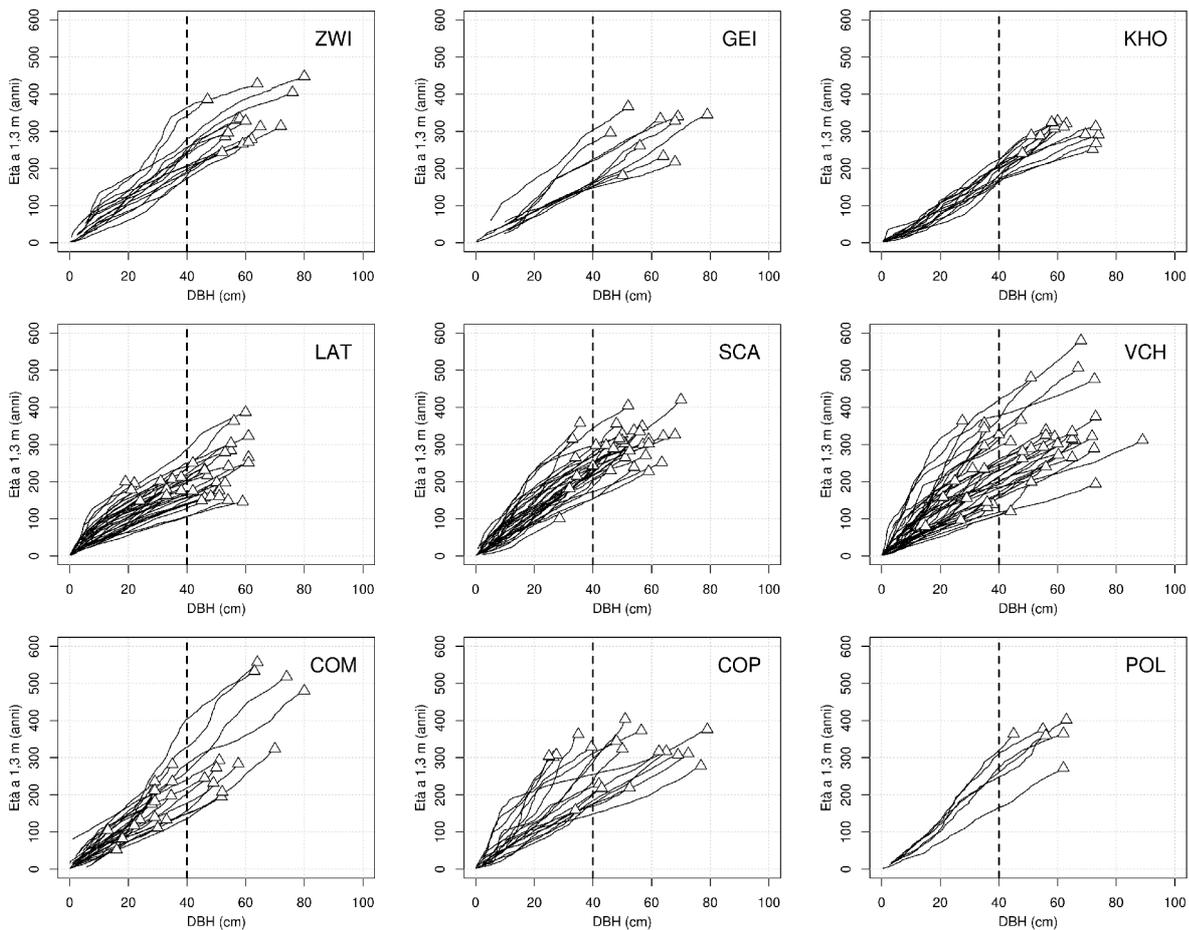
– Parametri misurati sulle serie storiche di età (età corrette stimando il numero di anelli mancanti)

\* Numero di piante dominanti per le quali è stato possibile effettuare la stima corretta dell'età (tra parentesi la percentuale rispetto al totale di piante campionate per sito)

I parametri  $\bar{Age}_5$  ed  $\bar{Age}_{max}$  forniscono un'indicazione valida e veloce circa l'età di un sito, tuttavia per poter analizzare statisticamente la distribuzione delle età delle piante è necessario utilizzare le serie complete di midollo e/o quelle incomplete per le quali è stato possibile stimare il numero mancante di anelli. Utilizzando le serie storiche di età sono stati calcolati i parametri  $\bar{Age}_{canopy}$ ,  $\bar{Range}$  e  $\bar{SD}$  i quali non solo confermano l'informazione portata dai primi due indicatori ma contribuiscono ad affinare il dettaglio della caratterizzazione cronologica dei siti. L'età media del piano dominante ( $\bar{Age}_{canopy}$ ) è alta nei medesimi popolamenti in cui è alto l'  $\bar{Age}_5$ , con i valori massimi registrati nei siti appenninici del Pollino (357 anni) e di Coppo del Morto (345 anni), e per quanto riguarda le Alpi nella stazione di Zwielauf (329 anni). Prendendo in considerazione tutte le piante dominanti, e non solo le cinque serie più lunghe,  $\bar{Age}_{canopy}$  è logicamente minore di  $\bar{Age}_5$ . Tuttavia l'indicatore  $\bar{Age}_{canopy}$ , di per sé, non è in grado di trasmettere un'informazione completa circa la complessità cronologica e strutturale della copertura forestale, se non associato ad almeno uno tra i parametri  $\bar{Range}$  e  $\bar{SD}$ . Uno degli elementi tipici di una struttura forestale vetusta è infatti la presenza contemporanea di più coorti nel soprassuolo (Frelich 2002), e quindi è necessario poter valutare l'ampiezza della forchetta delle età e/o la dispersione delle età intorno al valor medio. È indicativo il caso del Pollino dove, pur considerando la dimensione ridotta del campione, a fronte di un valore di  $\bar{Age}_{canopy}$  elevato, non si riscontra un'altrettanto ampia dispersione delle età ( $\bar{Range}=130$  anni;  $\bar{SD}=44.2$  anni). Da un punto di vista dendrocronologico, quindi, il livello di vetustà di questo popolamento risulta essere minore rispetto a quello di altri siti, quali ad esempio Val Cervara e Coppo del Morto, in cui oltre ad avere  $\bar{Age}_{canopy}$  elevate si

hanno anche elevati valori di Range (rispettivamente 460 e 362 anni) e di SD (95.9 e 136.4 anni). In pratica le piante che compongono oggi il piano dominante di Val Cervara sono state “reclutate” in un lasso di tempo di quasi 5 secoli! Anche sulle Alpi si hanno situazioni interessanti dal punto di vista degli indicatori cronologici. Ad esempio la faggeta di Lateis, sulle Alpi carniche, è considerata, in base ad alcuni importanti indicatori strutturali e cronologici, uno dei popolamenti con maggiore naturalità nelle Alpi orientali (Di Filippo et al. 2007; Piovesan et al. 2010). Tuttavia a fronte di un Age<sub>5</sub> molto elevato nell'ambito della regiona alpina (369 anni), il parametro Age<sub>canopy</sub> (che, si ricorda, prende in considerazione solo le piante per le quali è stata corretta l'età attraverso la stima degli anelli mancanti) è notevolmente più basso (228 anni), poiché molte delle carote utilizzate per il calcolo dell'Age<sub>5</sub> erano incomplete e, mancando di una porzione di raggio >5 cm non è stato possibile stimare il numero di anelli mancanti. Tuttavia se si osservano i valori di Range (241 anni) e SD (69.4 anni) nel sito di Lateis, si nota come questi siano i più alti tra tutti i siti studiati, a conferma della presenza di una struttura cronologica multicoorte nel piano dominante che concorda con i risultati ottenuti attraverso le analisi strutturali (Piovesan et al. 2010). Discorso analogo può essere fatto per i siti di Gëißlucke e Kholersgraben. Gëißlucke presenta un livello di naturalità strutturale maggiore (*dati non riportati*) e in generale piante più vecchie (in questo sito è stata trovata una pianta di almeno 520 anni), mentre Kholersgraben, come detto, è probabilmente il più impattato dei tre siti austriaci. Eppure Age<sub>canopy</sub> risulta maggiore nel sito di Kholersgraben piuttosto che in quello di Gëißlucke (296 contro 290 anni). Ancora una volta, però, la dispersione delle età è considerevolmente diversa nei due siti, essendo Gëißlucke cronologicamente molto più diversificato (Range=185 anni, SD=63.1 anni) rispetto a Kholersgraben (Range=87 anni, SD=26.8 anni), che sostanzialmente presenta una struttura cronologica coetaneiforme.

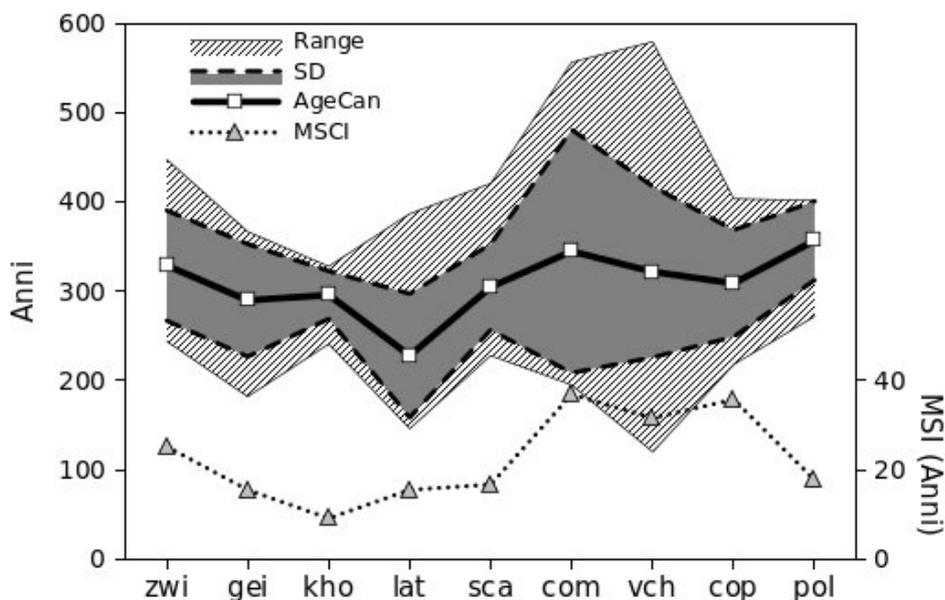
Il grado di diversificazione cronologica di un sito è ben visibile analizzando la storia auxologica delle piante attraverso un grafico diametro-età (Fig. 6), in cui è possibile visualizzare l'effettiva presenza/assenza di una o più coorti e la dispersione delle età nel piano dominante. Nei siti studiati si osserva in primo luogo l'assenza di una relazione DBH-età, come lecito attendersi in popolamenti disetanei lasciati all'evoluzione naturale. In secondo luogo si nota come le piante nei siti con un maggior grado di vetustà strutturale e cronologica (es. zwi, lat, sca, vch, com) presentino dei pattern di crescita diversificati, mentre in altri siti (es. kho) le piante campionate mostrano una crescita regolare nel corso del tempo, che potrebbe essere legata ad una minore densità del popolamento in conseguenza di passata attività di gestione selvicolturale (Piovesan et al. 2010).



**Fig. 6** Storie auxologiche dei popolamenti alpini ed appenninici. Per ogni sito i triangoli rappresentano la relazione diametro-età al tempo presente, mentre le linee continue rappresentano l'incremento cumulato diametrico sotto corteccia.

Pattern di crescita irregolari sono invece da mettere in relazione a condizioni di elevata eterogeneità strutturale (es. mosaico forestale a tessitura fine) in cui le piante, appartenendo a diverse coorti in diverso stadio di sviluppo che si trovano a condividere contemporaneamente lo stesso soprassuolo, devono sottostare durante la propria vita a condizioni mutevoli di crescita, sperimentando fasi di soppressione, rilascio ed eventualmente ancora di competizione una volta avuto accesso alla volta forestale. In questo senso l'Indice Medio di Soppressione (MSI) sembra essere un buon descrittore della complessità strutturale di un popolamento in quanto i valori emersi nei siti alpini ed appenninici concordano con i valori degli altri indicatori cronologici, in particolare con l'Age5 ( $r=0.69$ ,  $p<0.05$ ) e con SD ( $r=0.74$ ,  $p<0.05$ ). Valori elevati di MSI si hanno infatti nei siti appenninici di Coppo del Morto e di Val Cervara, dove le piante sperimentano fasi di soppressione che durano in media rispettivamente 36.9 e 31.6 anni. MSI elevati si hanno anche nel sito di Coppo del Principe (35.8): questo popolamento, pur presentando valori più bassi per quanto riguarda i restanti indicatori cronologici (in particolare Age<sub>5</sub>, Range e SD), secondo gli indicatori di vetustà

strutturali è ascrivibile ai popolamenti secondari appenninici con il maggiore livello di naturalità (Ziaco et al. 2012a). Nelle Alpi i valori di MSI sono generalmente più bassi, passando da un massimo di 25.2 anni (Zwielauf) ad un minimo di 9.1 anni (Kholersgraben). In conclusione, volendo classificare le faggete studiate secondo un gradiente di vetustà basato esclusivamente su indicatori cronologici, si può senz'altro dire che i siti primari di Val Cervara e Coppo del Morto presentano il maggior livello di diversificazione cronologica, seguiti dai popolamenti secondari di Coppo del Principe e Scangive (Fig. 7); anche il sito del Pollino potenzialmente presenta caratteristiche di spiccata naturalità, ma al momento il campione è troppo ridotto. Tra i popolamenti alpini, che comunque in generale presentano minori livelli di vetustà, il sito di Lateis sembrerebbe quello nel complesso più prossimo a condizioni di naturalità, seguito dai siti di Zwielauf e Gëißlucke. nettamente minore è il livello di naturalità della faggeta di Kholersgraben.



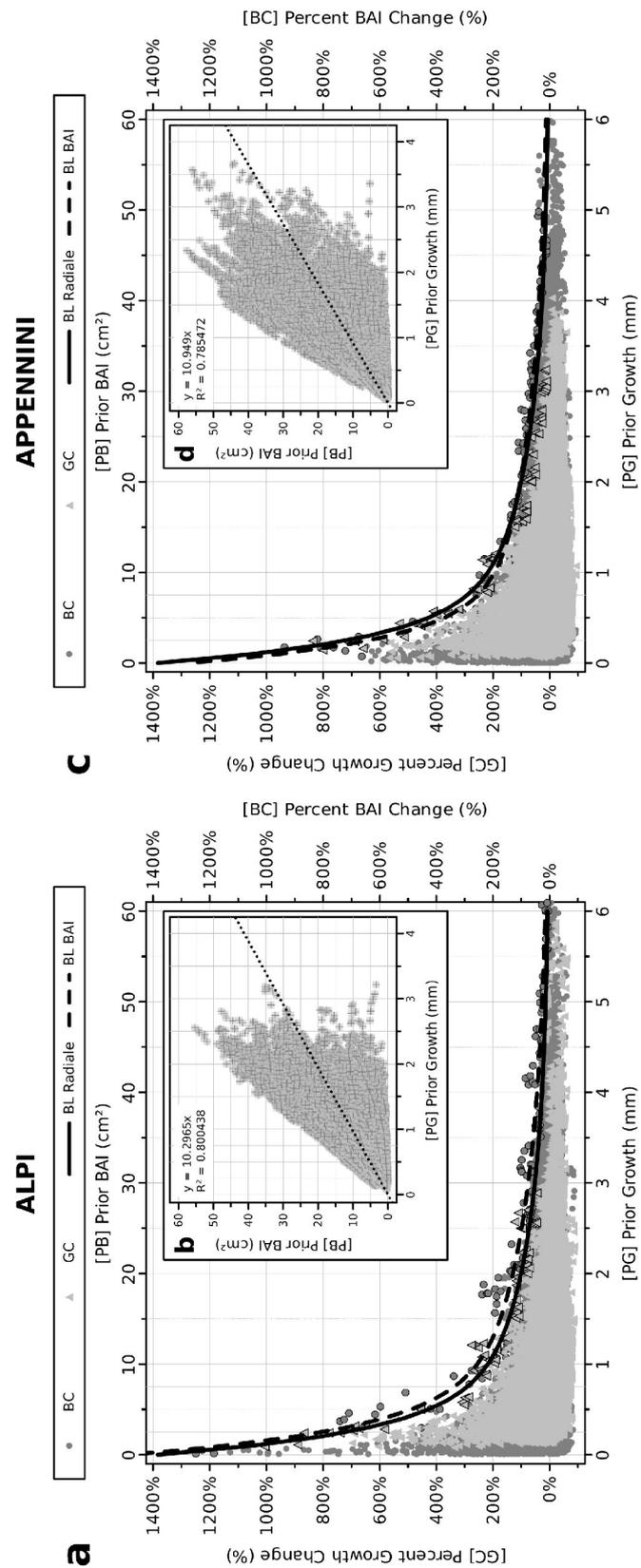
*Fig. 7* Rappresentazione grafica degli indicatori cronologici di vetustà (**Range**, **Standard Deviation**, **Age<sub>canopy</sub>** e **MSI**) calcolati per le piante del piano dominante ( $DBH \geq 40$  cm). A forchette temporali maggiori corrisponde un grado di naturalità maggiore (esclusivamente dal punto di vista cronologico).

## Caratteristiche delle boundary lines radiali e basimetriche

Le boundary lines valide per il faggio della fascia altimontana delle Alpi e degli Appennini sono state costruite utilizzando un campione di osservazioni molto ampio, rispettivamente 32470 e 61822 anelli, che rispetta, almeno per quanto riguarda l'Appennino, i criteri suggeriti da Black et al. (2009) per il calcolo di valide boundary lines ( $n > 50000$  anelli). Anche il campione alpino, tuttavia, può considerarsi consistente, dato che in letteratura sono presenti affidabili boundary lines per il faggio sviluppate utilizzando un numero minore di anelli ( $n = 19833$  [Šamonil et al. 2009];  $n = 20670$  [Trotsiuk et al. 2012]). Per le Alpi come per gli Appennini, e sia per le boundary lines radiali (**BLR**) che di area basimetrica (**BLB**), la funzione doppia esponenziale negativa ha fornito la migliore interpolazione dei dati, sia graficamente che numericamente (**BLR<sub>alp</sub>**  $R^2_{adj} = 0.94$ , **BLR<sub>app</sub>**  $R^2_{adj} = 0.97$ ; **BLB<sub>alp</sub>**  $R^2_{adj} = 0.89$ , **BLB<sub>app</sub>**  $R^2_{adj} = 0.94$ ) (Tabella 5). Le boundary lines regionali, sia radiali che basimetriche, sono sostanzialmente identiche tra Alpi e Appennini (Fig. 8), il che avrebbe potuto giustificare l'utilizzo di un'unica boundary line radiale e di una basimetrica: tuttavia avendo a disposizione un campione sufficiente per entrambe le macroregioni si è preferito distinguere le due curve radiali e basimetrica. La somiglianza tra Alpi e Appennino conferma il forte controllo del bioclimate sull'andamento delle boundary lines e, di conseguenza, anche sul potenziale di rilascio delle specie, come dimostrato da precedenti studi (Ziaco et al. 2012b). Le boundary lines radiali e basimetriche hanno un andamento del tutto identico, sia sulle Alpi che sugli Appennini, tanto che le due tipologie di curve si sovrappongono per tutte le classi di PG e PB (Fig. 8a,c).

**Tabella 5** Parametri statistici delle boundary lines

	Funzione	Formula	Parametri				$R^2_{adj}$	Tolleranza
			a	b	c	d		
<b>Alpi</b>								
<i>BL radiale</i>	doppia esponenziale negativa	$GC = a * \exp(-b * PG) + c * \exp(-d * PG)$	10.104	3.701	3.725	0.654	0.94	0.001
<i>BL basimetrica</i>	doppia esponenziale negativa	$BC = a * \exp(-b * PB) + c * \exp(-d * PB)$	3.704	0.052	11.163	0.340	0.89	0.001
<b>Appennini</b>								
<i>BL radiale</i>	doppia esponenziale negativa	$GC = a * \exp(-b * PG) + c * \exp(-d * PG)$	5.219	4.594	6.324	1.103	0.97	0.001
<i>BL basimetrica</i>	doppia esponenziale negativa	$BC = a * \exp(-b * PB) + c * \exp(-d * PB)$	2.866	0.050	9.937	0.380	0.94	0.001

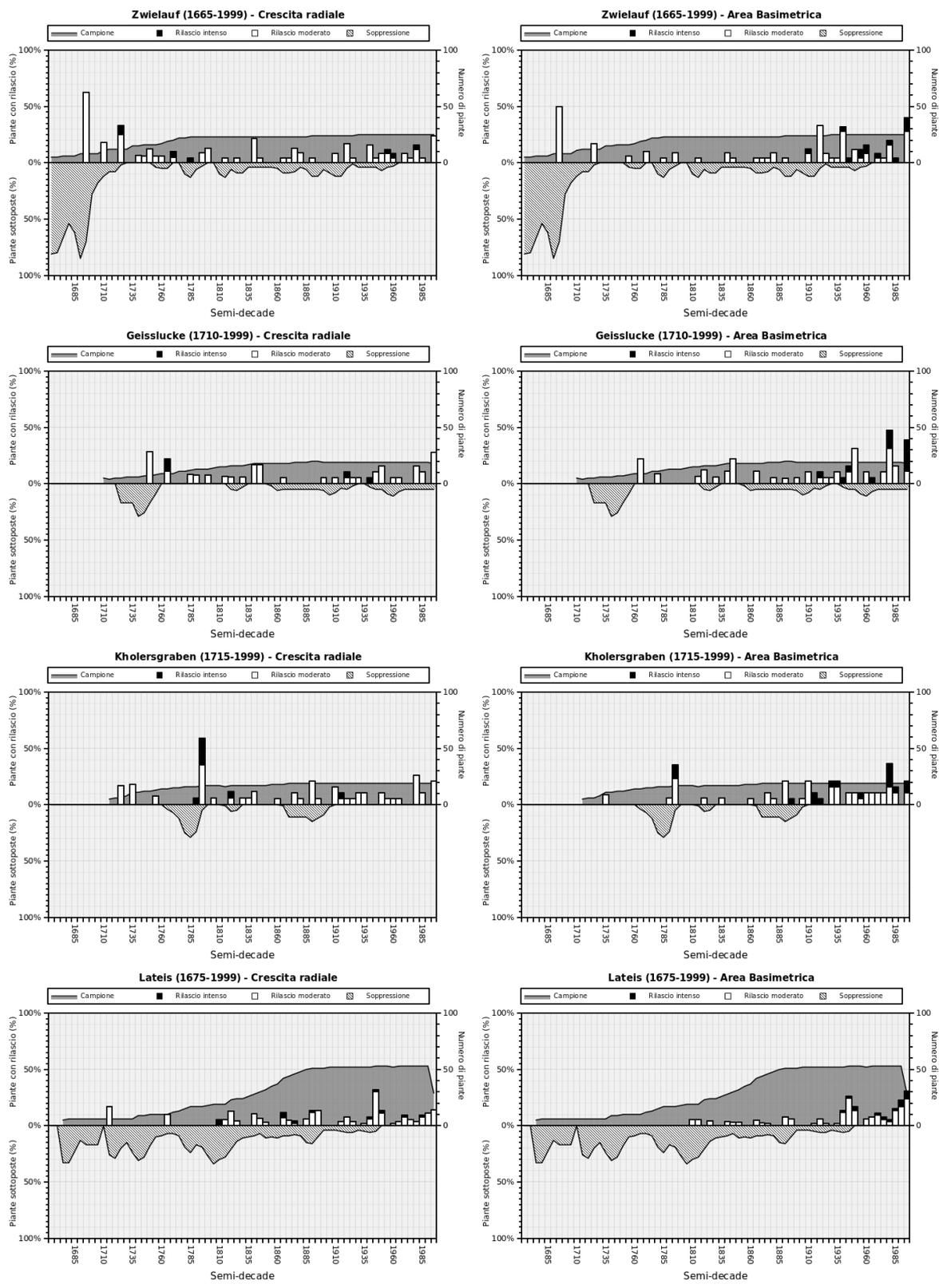


**Fig. 8** Coppie di osservazioni Prior Growth/Growth Change [PG-GC] e Prior BAI/BAI Change [PB-BC] e relative boundary lines radiali e basimetriche calcolate per le Alpi (a) e gli Appennini (c); rapporto tra PG e PB per le Alpi (b) e gli Appennini (d)

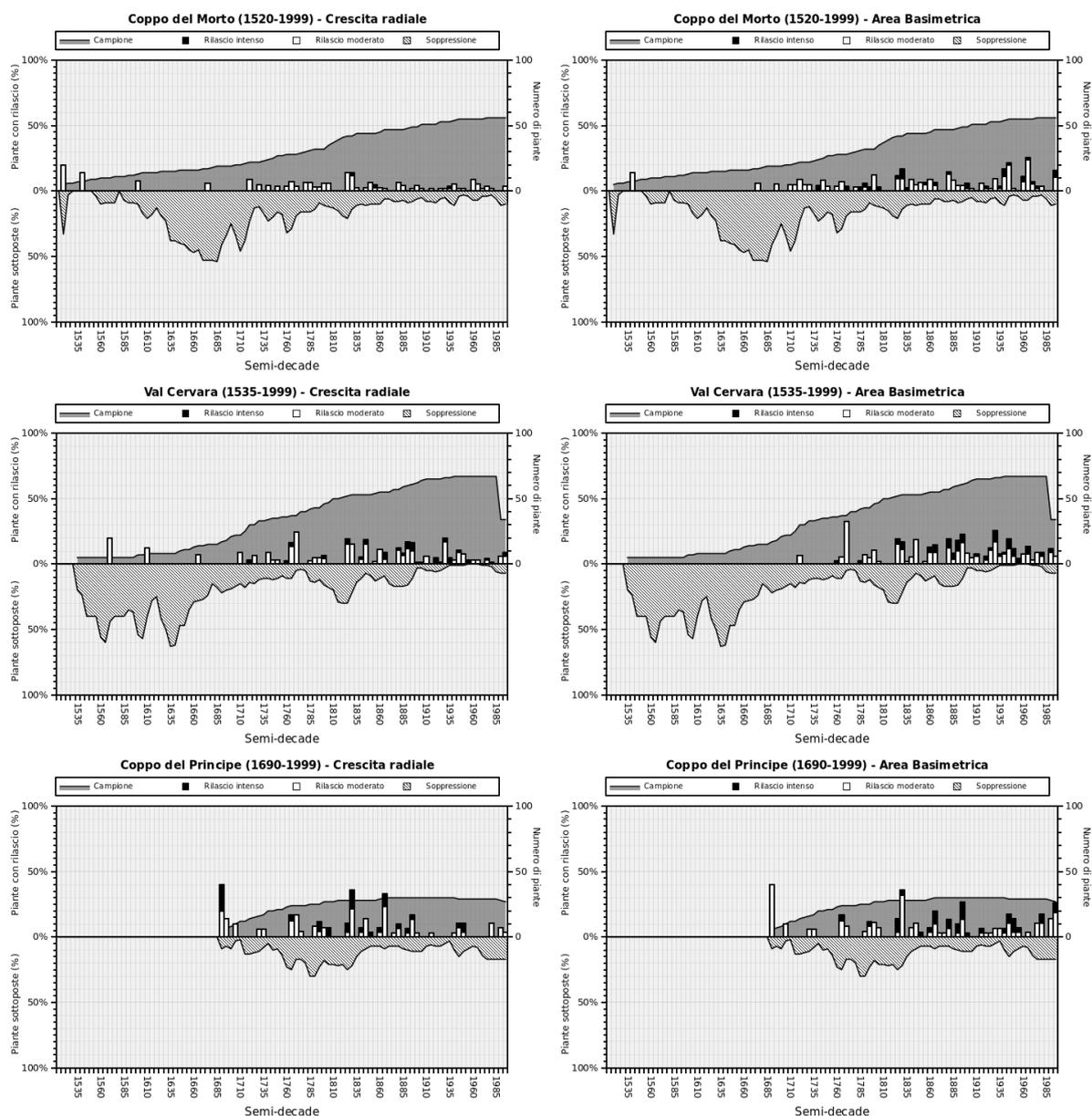
Il rapporto tra crescita precedente radiale (Prior Growth) e incremento corrente di area basimetrica (Prior BAI) è rappresentabile tramite una funzione lineare con intercetta imposta a 0, sia per i siti alpini che per quelli appenninici (Alpi  $R^2 = 0.80$ ; Appennini  $R^2 = 0.78$ ) (Fig. 8b,d), da cui emerge in entrambi i casi un rapporto PG/PB di circa 1:10. Grazie alla conoscenza di questa relazione, i valori massimi di BC necessari al computo delle boundary lines basimetriche sono stati determinati utilizzando sottoclassi di PB (espresse in  $\text{cm}^2 \text{anno}^{-1}$ ) comparabili alle relative sottoclassi di PG (espresse in  $\text{mm anno}^{-1}$ ).

### Cronologie di disturbo

La cronologie di disturbo per i siti alpini ed appenninici sono state sviluppate a partire dall'anno in cui erano disponibili almeno 5 serie dendrocronologiche datate. Coprono un arco temporale molto lungo in particolare nei siti appenninici di Coppo del Morto e Val Cervara dove è stato possibile, data la numerosità del campione, costruire valide cronologie relative ad un periodo di quasi 5 secoli. Sulle Alpi, invece, il periodo più lungo analizzato è stato di circa 330 anni (Zwielauf). La ricostruzione storica degli eventi di disturbo attraverso il metodo della boundary lines radiale e basimetrica evidenzia come le faggete altimontane prese in esame siano soggette ad un regime di disturbo prevalentemente caratterizzato da eventi frequenti ma di severità medio-bassa (Fig. 9-10-11). I rilasci sono infatti presenti senza grandi soluzioni di continuità lungo tutto il periodo analizzato, sia in termini radiali che di area basimetrica, e sono principalmente di tipo moderato. Le cronologie di disturbo non mostrano annate con picchi di rilascio sincroni di intensità tale (es. >50%) da poter essere ricondotti ad attività selvicolturali, con l'eccezione della faggeta di Kholersgraben dove nel 1795 circa il 50 % delle piante mostrano un rilascio, ed è quindi ipotizzabile che in quell'anno siano stati effettuati dei tagli. Periodi di intenso disturbo si hanno anche nel sito di Zwielauf negli anni tra il 1695 e il 1699, ma la moderata intensità dei rilasci, la mancanza di un anno particolarmente ricco di eventi e l'esiguità del campione non permettono di azzardare ipotesi circa possibili impatti legati alla selvicoltura. Nel sito di Coppo del Principe, sugli Appennini, sono visibili dei picchi di rilascio, evidenti in particolare in termini radiali, la cui ciclicità (~60 anni) e la somiglianza con picchi analoghi registrati nei siti di Val Cervara e Scangive, seppur in numero ed intensità minore, lasciano pensare agli effetti di pattern climatici comuni, cui si farà riferimento più avanti.



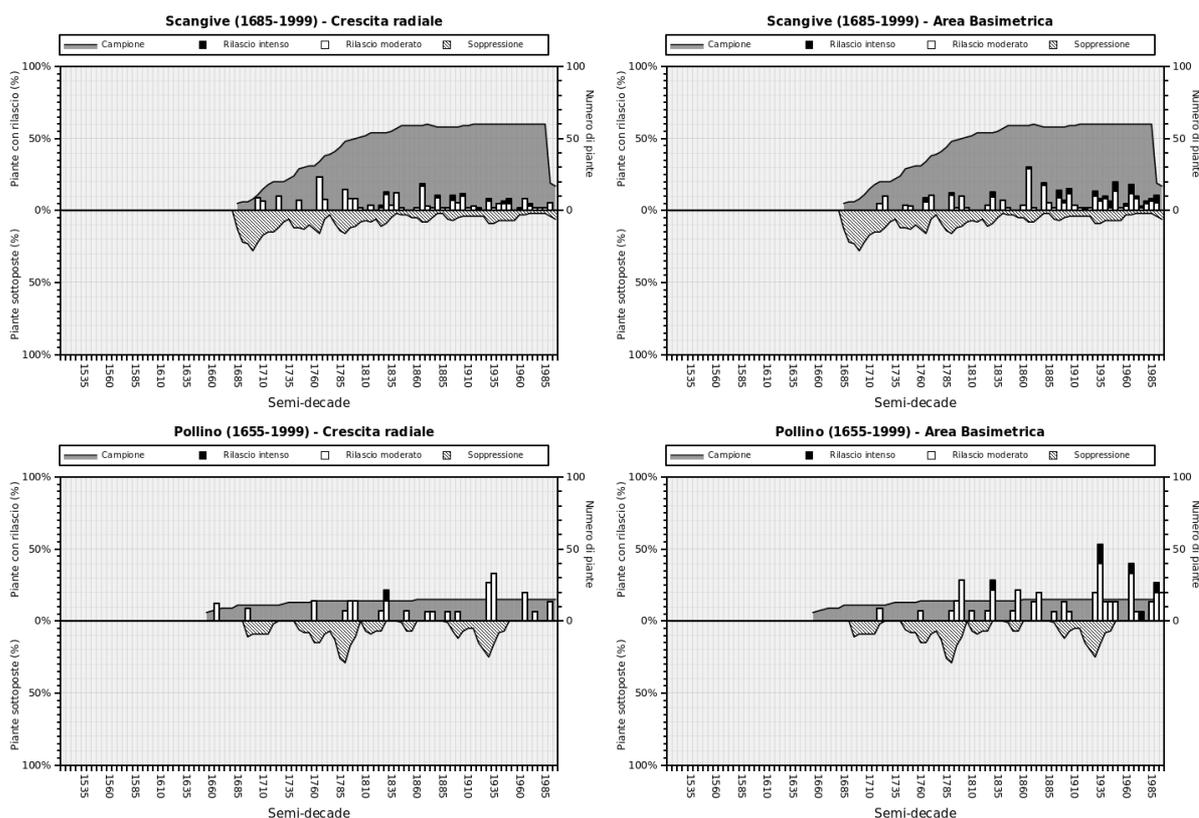
**Fig. 9** Cronologie di disturbo relative ai siti alpini ricostruite individuando i rilasci di crescita radiale (sinistra) e di area basimetrica (destra). Le colonne bianche rappresentano i rilasci moderati mentre le colonne nere quelli intensi. I rilasci sono espressi in termini relativi (% di piante con rilascio sul totale del campione) e sono raggruppati per semi-decadi. L'area tratteggiata indica la percentuale di piante con fasi di soppressione.



**Fig. 10** Cronologie di disturbo relative ai siti appenninici di Coppo del Morto, Val Cervara e Coppo del Principe, ricadenti all'interno del Parco Nazionale d'Abbruzzo Lazio e Molise, ricostruite individuando i rilasci di crescita radiale (sinistra) e di area basimetrica (destra). Le colonne bianche rappresentano i rilasci moderati mentre le colonne nere quelli intensi. I rilasci sono espressi in termini relativi (% di piante con rilascio sul totale del campione) e sono raggruppati per semi-decadi. L'area tratteggiata indica la percentuale di piante con fasi di soppressione.

La maggiore concentrazione di episodi di disturbo visibile sulle Alpi nel periodo della Prima Guerra Mondiale (1914-1918) è probabilmente da mettere in relazione non tanto ad interventi antropici diretti (es. attività selvicolturali), ma piuttosto ad impatti “indiretti”, legati alle vicende del conflitto (es. battaglie) o alle ristrettezze imposte dallo stesso (es. tagli sporadici e non regolamentati di isolate piante da utilizzare come combustibile). Discorso analogo si può fare per il periodo della Seconda Guerra Mondiale sull'Appennino, dove prima, durante e

dopo il conflitto, vi era una gran richiesta di legna da ardere e frequenti tagli illegali di moderata entità.



**Fig. 11** Cronologie di disturbo relative ai siti appenninici di Scangive e del Pollino, ricostruite individuando i rilasci di crescita radiale (sinistra) e di area basimetrica (destra). Le colonne bianche rappresentano i rilasci moderati mentre le colonne nere quelli intensi. I rilasci sono espressi in termini relativi (% di piante con rilascio sul totale del campione) e sono raggruppati per semi-decadi. L'area tratteggiata indica la percentuale di piante con fasi di soppressione.

Tuttavia dall'analisi delle cronologie di disturbo non emerge un impatto antropico pressante e continuo nel tempo su queste foreste. Ciò rivela l'elevata naturalità dei siti oggetto di studio e conferma sostanzialmente quanto emerso dall'analisi degli indicatori cronologici e strutturali (Ziaco et al. 2012a). Queste faggete grazie alla posizione svantaggiata, in contesti altimontani remoti e di difficile accesso, e alla funzione protettiva esercitata nei confronti degli abitati a valle (Piovesan et al. 2010) non sono state oggetto di gestione selvicolturale attiva ed intensa, specialmente negli ultimi 100-150 anni. Da qualche anno a questa parte, poi, molti dei siti studiati sono entrati a far parte di parchi nazionali o riserve naturali, il che ha permesso che venissero definitivamente lasciati all'evoluzione naturale. Ne consegue, quindi, che il regime di disturbo identificato nei 9 siti studiati possa essere considerato, in linea di massima, rappresentativo della naturale frequenza di disturbo cui sono sottoposti popolamenti forestali appartenenti alla fascia bioclimatica altimontana.

Per ogni sito sono stati calcolati la frequenza di disturbo (intesa come *eventi/anno*) e il tempo di ritorno degli eventi (*1/frequenza di disturbo*), sia raggruppando eventi moderati ed intensi, sia distinguendo tra gli stessi. Considerando gli eventi individuati utilizzando la crescita radiale, la frequenza media di disturbo delle Alpi ( $0.24 \pm 0.04$  eventi anno<sup>-1</sup>) e degli Appennini ( $0.26 \pm 0.06$  eventi anno<sup>-1</sup>) risultano simili. Tra le faggete alpine quella maggiormente esposta agli eventi di disturbo è Lateis ( $0.35$  eventi anno<sup>-1</sup>) mentre i siti austriaci presentano tassi di disturbo minori ( $0.16-0.22$  eventi anno<sup>-1</sup>) (Per i periodi di riferimento si veda Tabella 6a,b,c). Sugli Appennini il sito di Scangive mostra la maggior frequenza di eventi di disturbo ( $0.43$  eventi anno<sup>-1</sup>), seguito da Val Cervara ( $0.37$  eventi anno<sup>-1</sup>) e Coppo del Principe ( $0.26$  eventi anno<sup>-1</sup>). Le faggete di Coppo del Morto ( $0.17$  eventi anno<sup>-1</sup>) e del Pollino ( $0.10$  eventi anno<sup>-1</sup>) risultano essere le meno interessate dal passaggio di eventi di disturbo. Il tempo di ritorno medio dei disturbi è pari a  $4.45 \pm 0.65$  anni sulle Alpi e  $4.90 \pm 1.36$  anni sugli Appennini, anche se è evidente una certa variabilità tra siti: ad esempio a Lateis si registra mediamente un evento ogni 2.9 anni mentre a Gëißlucke uno ogni 6.1 anni; sugli Appennini si passa invece da un disturbo ogni 2.3 anni a Scangive fino ad uno ogni 9.7 anni sul Pollino. Le frequenza di disturbo e i tempi di ritorno degli eventi sono influenzati in misura maggiore dagli eventi moderati (Tabelle 6a,b,c): disturbi intensi sono poco frequenti sulle Alpi, con tempi di ritorno compresi tra 30.0 (lat) e 83.3 anni (gei), mentre i siti appenninici sperimentano con maggiore frequenza eventi di disturbo intensi, dati i tempi di ritorno bassi rilevati a Coppo del Principe (13 anni), Val Cervara (14.5 anni) e Scangive (21.4 anni). Questi episodi sono generalmente caratterizzati da schianti di più piante adiacenti (cosiddetto “*effetto domino*”, molto comune in popolamenti vetusti con numerosi individui senescenti e in stazioni impervie), che aprono grandi buche (>1000 m<sup>2</sup>) di cui risentono un numero maggiore di piante, anche lontano dal punto dello schianto (Nagel et al. 2007).

**Tabella 6a** Statistiche riepilogative dei rilasci di crescita radiali per i siti alpini di Zwielauf, Gëißlucke, Kholersgraben e Lateis.

	Periodo	Rilasci Totali (RT)	Rilasci Moderati (RM)	Rilasci Intensi (RI)	RT/anno	Tempo ritorno RT	RM/anno	Tempo ritorno RM	RI/anno	Tempo ritorno RI	Tasso soppressione
<b>Zwi</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	8	7	1	0.16	6.2	0.14	7.1	0.02	50.0	7.6%
	1750-1799	9	7	2	0.18	5.6	0.14	7.1	0.04	25.0	4.6%
	1800-1849	11	11	0	0.22	4.5	0.22	4.5	0.00	100.0*	5.9%
	1850-1899	8	8	0	0.16	6.2	0.16	6.2	0.00	100.0*	7.3%
	1900-1949	12	12	0	0.24	4.2	0.24	4.2	0.00	100.0*	6.1%
	1950-1999	21	18	3	0.42	2.4	0.36	2.8	0.06	16.7	1.4%
	<b>Totale</b>	<b>69</b>	<b>63</b>	<b>6</b>	<b>0.23</b>	<b>4.3</b>	<b>0.21</b>	<b>4.8</b>	<b>0.02</b>	<b>50.0</b>	<b>5.5%</b>
<b>Gei</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1750-1799	6	5	1	0.12	8.3	0.1	10.0	0.02	50.0	2.6%
	1800-1849	10	10	0	0.20	5.0	0.2	5.0	0.00	100.0*	1.4%
	1850-1899	1	1	0	0.02	50.0	0.02	50.0	0.00	100.0*	4.3%
	1900-1949	9	7	2	0.18	5.6	0.14	7.1	0.04	25.0	4.3%
	1950-1999	15	15	0	0.30	3.3	0.30	3.3	0.00	100.0*	6.2%
	<b>Totale</b>	<b>41</b>	<b>38</b>	<b>3</b>	<b>0.16</b>	<b>6.1</b>	<b>0.15</b>	<b>6.6</b>	<b>0.01</b>	<b>83.3</b>	<b>3.8%</b>
<b>Kho</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1750-1799	12	7	5	0.24	4.2	0.14	7.1	0.10	10.0	10.6%
	1800-1849	7	6	1	0.14	7.1	0.12	8.3	0.02	50.0	1.2%
	1850-1899	9	9	0	0.18	5.6	0.18	5.6	0.00	100.0*	7.2%
	1900-1949	11	10	1	0.22	4.5	0.20	5.0	0.02	50.0	1.1%
	1950-1999	16	16	0	0.32	3.1	0.32	3.1	0.00	100.0*	0.0%
	<b>Totale</b>	<b>55</b>	<b>48</b>	<b>7</b>	<b>0.22</b>	<b>4.5</b>	<b>0.19</b>	<b>5.2</b>	<b>0.03</b>	<b>35.7</b>	<b>4.0%</b>
<b>Lat</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	1	1	0	0.02	50.0	0.02	50.0	0.00	100.0*	20.7%
	1750-1799	1	1	0	0.02	50.0	0.02	50.0	0.00	100.0*	13.9%
	1800-1849	11	10	1	0.22	4.5	0.20	5.0	0.02	50.0	19.1%
	1850-1899	27	23	4	0.54	1.9	0.46	2.2	0.08	12.5	10.8%
	1900-1949	30	28	2	0.6	1.7	0.56	1.8	0.04	25.0	4.9%
	1950-1999	35	32	3	0.7	1.4	0.64	1.6	0.06	16.7	0.0%
	<b>Totale</b>	<b>105</b>	<b>95</b>	<b>10</b>	<b>0.35</b>	<b>2.9</b>	<b>0.32</b>	<b>3.2</b>	<b>0.03</b>	<b>30.0</b>	<b>11.6%</b>

N.B. Per consentire il calcolo dei valori medi stazionali, nei periodi con frequenza annuale di rilascio pari a 0, il tempo di ritorno dei disturbi è stato posto uguale a 100 anni, ovvero il tempo di ritorno per una frequenza annua di disturbo pari a 0.01 eventi anno<sup>-1</sup>. I valori così determinati sono contrassegnati da un asterisco \*

**Tabella 6b** Statistiche riepilogative dei rilasci di crescita radiali per i siti appenninici di Scangive, Coppo del Morto, Val Cervara e Coppo del Principe.

	Periodo	Rilasci Totali (RT)	Rilasci Moderati (RM)	Rilasci Intensi (RI)	RT/anno	Tempo ritorno RT	RM/anno	Tempo ritorno RM	RI/anno	Tempo ritorno RI	Tasso soppressione
<b>Sca</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	6	6	0	0.12	8.3	0.12	8.3	0.00	100.0*	14.7%
	1750-1799	22	22	0	0.44	2.3	0.44	2.3	0.00	100.0*	11.2%
	1800-1849	26	24	2	0.52	1.9	0.48	2.1	0.04	25.0	7.0%
	1850-1899	29	25	4	0.58	1.7	0.5	2.0	0.08	12.5	5.1%
	1900-1949	27	23	4	0.54	1.9	0.46	2.2	0.08	12.5	5.7%
	1950-1999	18	14	4	0.36	2.8	0.28	3.6	0.08	12.5	3.8%
	<b>Totale</b>	<b>128</b>	<b>114</b>	<b>14</b>	<b>0.43</b>	<b>2.3</b>	<b>0.38</b>	<b>2.6</b>	<b>0.05</b>	<b>21.4</b>	<b>7.9%</b>
<b>Com</b>	1550-1599	0	0	0	0.00	100.0*	0.00	100.0*	0.00	100.0*	6.6%
	1600-1649	1	1	0	0.02	50.0	0.02	50.0	0.00	100.0*	7.6%
	1650-1699	1	1	0	0.02	50.0	0.02	50.0	0.00	100.0*	46.6%
	1700-1749	4	4	0	0.08	12.5	0.08	12.5	0.00	100.0*	25.1%
	1750-1799	11	11	0	0.22	4.5	0.22	4.5	0.00	100.0*	18.5%
	1800-1849	18	17	1	0.36	2.8	0.34	2.9	0.02	50.0	13.7%
	1850-1899	13	12	1	0.26	3.8	0.24	4.2	0.02	50.0	8.2%
	1900-1949	12	11	1	0.24	4.2	0.22	4.5	0.02	50.0	7.1%
	1950-1999	15	15	0	0.3	3.3	0.3	3.3	0.00	100.0*	5.9%
	<b>Totale</b>	<b>75</b>	<b>72</b>	<b>3</b>	<b>0.17</b>	<b>6.0</b>	<b>0.16</b>	<b>6.2</b>	<b>0.01</b>	<b>150.0</b>	<b>15.5%</b>
<b>Vch</b>	1550-1599	1	1	0	0.02	50.0	0.02	50.0	0.00	100.0*	43.2%
	1600-1649	1	1	0	0.02	50.0	0.02	50.0	0.00	100.0*	44.6%
	1650-1699	1	1	0	0.02	50.0	0.02	50.0	0.00	100.0*	26.5%
	1700-1749	9	8	1	0.18	5.6	0.16	6.2	0.02	50.0	14.4%
	1750-1799	22	20	2	0.44	2.3	0.40	2.5	0.04	25.0	9.5%
	1800-1849	34	28	6	0.68	1.5	0.56	1.8	0.12	8.3	19.7%
	1850-1899	44	32	12	0.88	1.1	0.64	1.6	0.24	4.2	13.5%
	1900-1949	35	28	7	0.7	1.4	0.56	1.8	0.14	7.1	3.3%
	1950-1999	20	17	3	0.4	2.5	0.34	2.9	0.06	16.7	2.5%
	<b>Totale</b>	<b>167</b>	<b>136</b>	<b>31</b>	<b>0.37</b>	<b>2.7</b>	<b>0.30</b>	<b>3.3</b>	<b>0.07</b>	<b>14.5</b>	<b>19.7%</b>
<b>Cop</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	3	3	0	0.06	16.7	0.06	16.7	0.00	100.0*	8.6%
	1750-1799	14	11	3	0.28	3.6	0.22	4.5	0.06	16.7	20.8%
	1800-1849	23	14	9	0.46	2.2	0.28	3.6	0.18	5.6	18.5%
	1850-1899	24	16	8	0.48	2.1	0.32	3.1	0.16	6.2	8.1%
	1900-1949	6	5	1	0.12	8.3	0.1	10.0	0.02	50.0	8.2%
	1950-1999	9	7	2	0.18	5.6	0.14	7.1	0.04	25.0	13.4%
	<b>Totale</b>	<b>79</b>	<b>56</b>	<b>23</b>	<b>0.26</b>	<b>3.8</b>	<b>0.19</b>	<b>5.4</b>	<b>0.08</b>	<b>13.0</b>	<b>12.9%</b>

N.B. Per consentire il calcolo dei valori medi stazionali, nei periodi con frequenza annuale di rilascio pari a 0, il tempo di ritorno dei disturbi è stato posto uguale a 100 anni, ovvero il tempo di ritorno per una frequenza annua di disturbo pari a 0.01 eventi anno<sup>-1</sup>. I valori così determinati sono contrassegnati da un asterisco \*

**Tabella 6c** Statistiche riepilogative dei rilasci di crescita radiali per il sito appenninico del Pollino.

Periodo	Rilasci Totali (RT)	Rilasci Moderati (RM)	Rilasci Intensi (RI)	RT/anno	Tempo ritorno RT	RM/anno	Tempo ritorno RM	RI/anno	Tempo ritorno RI	Tasso soppressione
1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1700-1749	0	0	0	0.00	100.0*	0.00	100.0*	0.00	100.0*	4.4%
<b>Pol</b> 1750-1799	5	5	0	0.10	10.0	0.10	10.0	0.00	100.0*	14.7%
1800-1849	6	5	1	0.12	8.3	0.10	10.0	0.02	50.0	4.2%
1850-1899	4	4	0	0.08	12.5	0.08	12.5	0.00	100.0*	2.2%
1900-1949	10	10	0	0.20	5.0	0.20	5.0	0.00	100.0*	12.0%
1950-1999	6	6	0	0.12	8.3	0.12	8.3	0.00	100.0*	0.0%
<b>Totale</b>	<b>31</b>	<b>30</b>	<b>1</b>	<b>0.10</b>	<b>9.7</b>	<b>0.10</b>	<b>10.0</b>	<b>0.00</b>	<b>300.0</b>	<b>6.2%</b>

N.B. Per consentire il calcolo dei valori medi stazionali, nei periodi con frequenza annuale di rilascio pari a 0, il tempo di ritorno dei disturbi è stato posto uguale a 100 anni, ovvero il tempo di ritorno per una frequenza annua di disturbo pari a 0.01 eventi anno<sup>-1</sup>. I valori così determinati sono contrassegnati da un asterisco \*

Il ruolo della soppressione come indicatore di naturalità strutturale è evidente anche osservando le cronologie di disturbo, in cui si nota come nei siti con strutture meno complesse ed articolate (es. kho, gei, pol) la soppressione tenda a sparire negli anni successivi a periodi di disturbo intenso (Fig. 9 e Fig. 11), in conseguenza della minore densità delle piante nella fase post-disturbo. Al contrario nei siti vetusti con strutture eterogenee e in condizioni di *quasi-equilibrio* (es. i siti dell'Appennino centrale) anche in seguito a periodi di disturbo la soppressione continua ad essere presente, poiché se da un lato le piante che rilasciano completano il proprio accesso alla volta, nuovi individui vanno a saturare il piano dominato in attesa dell'evento che liberi loro spazio nel piano dominante. Non a caso il tasso di soppressione medio è alto (12.9% – 19.7%) nei siti a maggior livello di naturalità sull'Appennino (Val Cervara, Coppo del Morto, Coppo del Principe) e sulle Alpi (11.6%, Lateis).

Spostando l'attenzione sui disturbi individuati mediante boundary lines di area basimetrica si nota come la frequenza media di disturbo rimanga simile, anche se leggermente più alta, a quella definita attraverso la boundary line radiale nelle Alpi ( $0.27 \pm 0.02$  eventi anno<sup>-1</sup>), mentre nei siti appenninici la boundary lines basimetrica tenda ad individuare un maggior numero di rilasci ( $0.39 \pm 0.06$  eventi anno<sup>-1</sup>) (Tabella 7 a,b,c). Ne consegue che anche il tempo di ritorno degli eventi, se definito attraverso i rilasci di area basimetrica, è minore (un evento ogni  $3.82 \pm 0.31$  anni sulle Alpi; un evento ogni  $2.90 \pm 0.53$  anni sugli Appennini). I siti che risultavano maggiormente impattati dal regime di disturbo in termini radiali risultano esserlo anche ragionando in termini di area basimetrica (frequenza = 0.34 eventi anno<sup>-1</sup>, Lateis; 0.57 eventi anno<sup>-1</sup>, Scangive); tuttavia i dati sono più omogenei tra i siti, sia per quanto riguarda le frequenze di disturbo che i tempi di ritorno degli eventi (Tabella 7a,b,c).

**Tabella 7a** Statistiche riepilogative dei rilasci di crescita basimetrica per i siti alpini di Zwielauf, Geißlucke, Kholersgraben e Lateis.

	Periodo	Rilasci Totali (RT)	Rilasci Moderati (RM)	Rilasci Intensi (RI)	RT/anno	Tempo ritorno RT	RM/anno	Tempo ritorno RM	RI/anno	Tempo ritorno RI
<b>Zwi</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	2	2	0	0.04	25.0	0.04	25.0	0.00	100.0*
	1750-1799	6	6	0	0.12	8.3	0.12	8.3	0.00	100.0*
	1800-1849	4	4	0	0.08	12.5	0.08	12.5	0.00	100.0*
	1850-1899	6	6	0	0.12	8.3	0.12	8.3	0.00	100.0*
	1900-1949	24	21	3	0.48	2.1	0.42	2.4	0.06	16.7
	1950-1999	29	19	10	0.58	1.7	0.38	2.6	0.20	5.0
	<b>Totale</b>	<b>71</b>	<b>58</b>	<b>13</b>	<b>0.24</b>	<b>4.2</b>	<b>0.19</b>	<b>5.2</b>	<b>0.04</b>	<b>23.1</b>
<b>Gei</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1750-1799	3	3	0	0.06	16.7	0.06	16.7	0.00	100.0*
	1800-1849	10	10	0	0.2	5.0	0.2	5.0	0.00	100.0*
	1850-1899	4	4	0	0.08	12.5	0.08	12.5	0.00	100.0*
	1900-1949	13	10	3	0.26	3.8	0.2	5.0	0.06	16.7
	1950-1999	30	21	9	0.6	1.7	0.42	2.4	0.18	5.6
	<b>Totale</b>	<b>60</b>	<b>48</b>	<b>12</b>	<b>0.24</b>	<b>4.2</b>	<b>0.19</b>	<b>5.2</b>	<b>0.05</b>	<b>20.8</b>
<b>Kho</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1750-1799	7	5	2	0.14	7.1	0.1	10.0	0.04	25.0
	1800-1849	2	2	0	0.04	25.0	0.04	25.0	0.00	100.0*
	1850-1899	9	8	1	0.18	5.6	0.16	6.2	0.02	50.0
	1900-1949	18	13	5	0.36	2.8	0.26	3.8	0.10	10.0
	1950-1999	26	18	8	0.52	1.9	0.36	2.8	0.16	6.2
	<b>Totale</b>	<b>62</b>	<b>46</b>	<b>16</b>	<b>0.25</b>	<b>4.0</b>	<b>0.18</b>	<b>5.4</b>	<b>0.06</b>	<b>15.6</b>
<b>Lat</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	0	0	0	0	100.0*	0	100.0*	0.00	100.0*
	1750-1799	0	0	0	0	100.0*	0	100.0*	0.00	100.0*
	1800-1849	5	5	0	0.1	10.0	0.1	10.0	0.00	100.0*
	1850-1899	12	12	0	0.24	4.2	0.24	4.2	0.00	100.0*
	1900-1949	27	25	2	0.54	1.9	0.5	2.0	0.04	25.0
	1950-1999	58	47	11	1.16	0.9	0.94	1.1	0.22	4.5
	<b>Totale</b>	<b>102</b>	<b>89</b>	<b>13</b>	<b>0.34</b>	<b>2.9</b>	<b>0.30</b>	<b>3.4</b>	<b>0.04</b>	<b>23.1</b>

N.B. Per consentire il calcolo dei valori medi stazionali, nei periodi con frequenza annuale di rilascio pari a 0, il tempo di ritorno dei disturbi è stato posto uguale a 100 anni, ovvero il tempo di ritorno per una frequenza annua di disturbo pari a 0.01 eventi anno<sup>-1</sup>. I valori così determinati sono contrassegnati da un asterisco \*

**Tabella 7b** Statistiche riepilogative dei rilasci di crescita basimetrica per i siti appenninici di Scangive, Coppo del Morto, Val Cervara e Coppo del Principe.

	Periodo	Rilasci Totali (RT)	Rilasci Moderati (RM)	Rilasci Intensi (RI)	RT/anno	Tempo ritorno RT	RM/anno	Tempo ritorno RM	RI/anno	Tempo ritorno RI
<b>Sca</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	4	4	0	0.08	12.5	0.08	12.5	0.00	100.0*
	1750-1799	15	13	2	0.3	3.3	0.26	3.8	0.04	25.0
	1800-1849	20	18	2	0.4	2.5	0.36	2.8	0.04	25.0
	1850-1899	44	39	5	0.88	1.1	0.78	1.3	0.10	10.0
	1900-1949	41	30	11	0.82	1.2	0.6	1.7	0.22	4.5
	1950-1999	46	32	14	0.92	1.1	0.64	1.6	0.28	3.6
	<b>Totale</b>	<b>170</b>	<b>136</b>	<b>34</b>	<b>0.57</b>	<b>1.8</b>	<b>0.45</b>	<b>2.2</b>	<b>0.11</b>	<b>8.8</b>
<b>Com</b>	1550-1599	0	0	0	0	100.0*	0	100.0*	0.00	100.0*
	1600-1649	0	0	0	0	100.0*	0	100.0*	0.00	100.0*
	1650-1699	2	2	0	0.04	25.0	0.04	25.0	0.00	100.0*
	1700-1749	9	8	1	0.18	5.6	0.16	6.2	0.02	50.0
	1750-1799	10	6	4	0.2	5.0	0.12	8.3	0.08	12.5
	1800-1849	24	18	6	0.48	2.1	0.36	2.8	0.12	8.3
	1850-1899	28	25	3	0.56	1.8	0.5	2.0	0.06	16.7
	1900-1949	38	30	8	0.76	1.3	0.6	1.7	0.16	6.2
	1950-1999	38	30	8	0.76	1.3	0.6	1.7	0.16	6.2
	<b>Totale</b>	<b>149</b>	<b>119</b>	<b>30</b>	<b>0.33</b>	<b>3.0</b>	<b>0.26</b>	<b>3.8</b>	<b>0.07</b>	<b>15.0</b>
<b>Vch</b>	1550-1599	0	0	0	0.00	100.0*	0.00	100.0*	0.00	100.0*
	1600-1649	0	0	0	0.00	100.0*	0.00	100.0*	0.00	100.0*
	1650-1699	0	0	0	0.00	100.0*	0.00	100.0*	0.00	100.0*
	1700-1749	2	2	0	0.04	25.0	0.04	25.0	0.00	100.0*
	1750-1799	21	19	2	0.42	2.4	0.38	2.6	0.04	25.0
	1800-1849	39	34	5	0.78	1.3	0.68	1.5	0.10	10.0
	1850-1899	57	36	21	1.14	0.9	0.72	1.4	0.42	2.4
	1900-1949	66	49	17	1.32	0.8	0.98	1.0	0.34	2.9
	1950-1999	45	32	13	0.9	1.1	0.64	1.6	0.26	3.8
	<b>Totale</b>	<b>230</b>	<b>172</b>	<b>58</b>	<b>0.51</b>	<b>2.0</b>	<b>0.38</b>	<b>2.6</b>	<b>0.13</b>	<b>7.8</b>
<b>Cop</b>	1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1700-1749	3	3	0	0.06	16.7	0.06	16.7	0.00	100.0*
	1750-1799	10	8	2	0.20	5.0	0.16	6.2	0.04	25.0
	1800-1849	24	20	4	0.48	2.1	0.4	2.5	0.08	12.5
	1850-1899	26	13	13	0.52	1.9	0.26	3.8	0.26	3.8
	1900-1949	16	11	5	0.32	3.1	0.22	4.5	0.10	10.0
	1950-1999	26	18	8	0.52	1.9	0.36	2.8	0.16	6.2
	<b>Totale</b>	<b>105</b>	<b>73</b>	<b>32</b>	<b>0.35</b>	<b>2.9</b>	<b>0.24</b>	<b>4.1</b>	<b>0.11</b>	<b>9.4</b>

N.B. Per consentire il calcolo dei valori medi stazionali, nei periodi con frequenza annuale di rilascio pari a 0, il tempo di ritorno dei disturbi è stato posto uguale a 100 anni, ovvero il tempo di ritorno per una frequenza annua di disturbo pari a 0.01 eventi anno<sup>-1</sup>. I valori così determinati sono contrassegnati da un asterisco \*

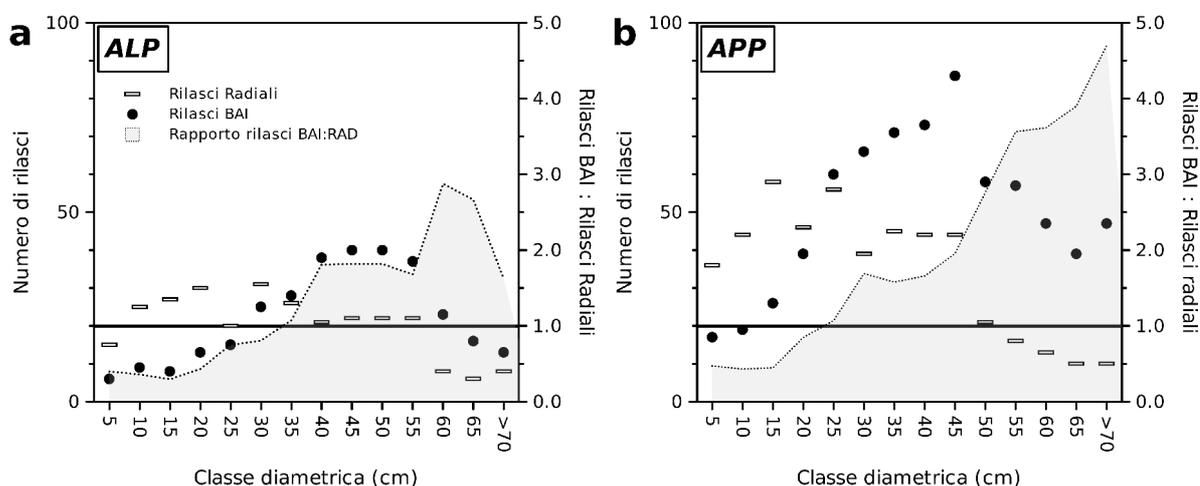
**Tabella 7c** Statistiche riepilogative dei rilasci di crescita basimetrici per il sito appenninico del Pollino.

Periodo	Rilasci Totali (RT)	Rilasci Moderati (RM)	Rilasci Intensi (RI)	RT/anno	Tempo ritorno RT	RM/anno	Tempo ritorno RM	RI/anno	Tempo ritorno RI
1550-1599	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1600-1649	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1650-1699	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1700-1749	1	1	0	0.02	50.0	0.02	50.0	0.00	100.0*
<b>Pol</b> 1750-1799	4	4	0	0.08	12.5	0.08	12.5	0.00	100.0*
1800-1849	10	9	1	0.2	5.0	0.18	5.6	0.02	50.0
1850-1899	10	10	0	0.2	5.0	0.2	5.0	0.00	100.0*
1900-1949	18	16	2	0.36	2.8	0.32	3.1	0.04	25.0
1950-1999	19	16	3	0.38	2.6	0.32	3.1	0.06	16.7
<b>Totale</b>	<b>62</b>	<b>56</b>	<b>6</b>	<b>0.21</b>	<b>4.8</b>	<b>0.19</b>	<b>5.4</b>	<b>0.02</b>	<b>50.0</b>

N.B. Per consentire il calcolo dei valori medi stazionali, nei periodi con frequenza annuale di rilascio pari a 0, il tempo di ritorno dei disturbi è stato posto uguale a 100 anni, ovvero il tempo di ritorno per una frequenza annua di disturbo pari a 0.01 eventi anno<sup>-1</sup>. I valori così determinati sono contrassegnati da un asterisco \*

Due aspetti legati ai rilasci basimetrici sono particolarmente degni di considerazione. In primo luogo si nota come in ogni sito pur rimanendo preponderante la componente di disturbo legata ad eventi di moderata severità, i tempi di ritorno di disturbi intensi registrati come variazioni di area basimetrica sono più che dimezzati, in particolare sulle Alpi dove si registra un disturbo intenso ogni  $20.65 \pm 1.76$  anni (mentre in termini di crescita radiale il tempo di ritorno medio era di  $49.75 \pm 11.94$  anni). Sugli Appennini è interessante il caso di Coppo del Morto, dove molti rilasci che in termini radiali erano registrati come moderati vengono identificati come intensi dalla boundary line di area basimetrica, tanto che il tempo di ritorno di disturbi intensi risulta 10 volte più basso (un evento ogni 15 anni) rispetto all'analisi della crescita radiale (un evento ogni 150 anni). Questa osservazione ci porta al secondo aspetto interessante emerso dalle cronologie di disturbo, ovvero la maggiore capacità della boundary line di area basimetrica di registrare gli eventi nella fase adulta delle piante (osservabile anche graficamente in Fig.9-10-11) a fronte invece di una minore abilità nel catturare i rilasci nella fase giovanile dei siti. Sarebbe pertanto che i due metodi possano essere considerati complementari: l'analisi dei pattern di crescita radiali ci fornisce, nel lungo periodo e a condizione che il campionamento copra sia il piano dominato che quello dominante, una valida indicazione della frequenza di disturbo e del tempo di ritorno medio degli eventi, mentre nel breve-medio termine (in questo caso circa 200 anni) il BAI sembra fornire una migliore caratterizzazione del regime di disturbo, in particolare su individui dominanti. Infatti osservando il numero di rilasci totale individuato dalle due boundary lines radiale e basimetrica raggruppati in base al diametro delle piante al momento del rilascio (Fig. 12; i diametri sono espressi come classi diametriche di 5 cm a partire da DBH>2.5 cm) si nota

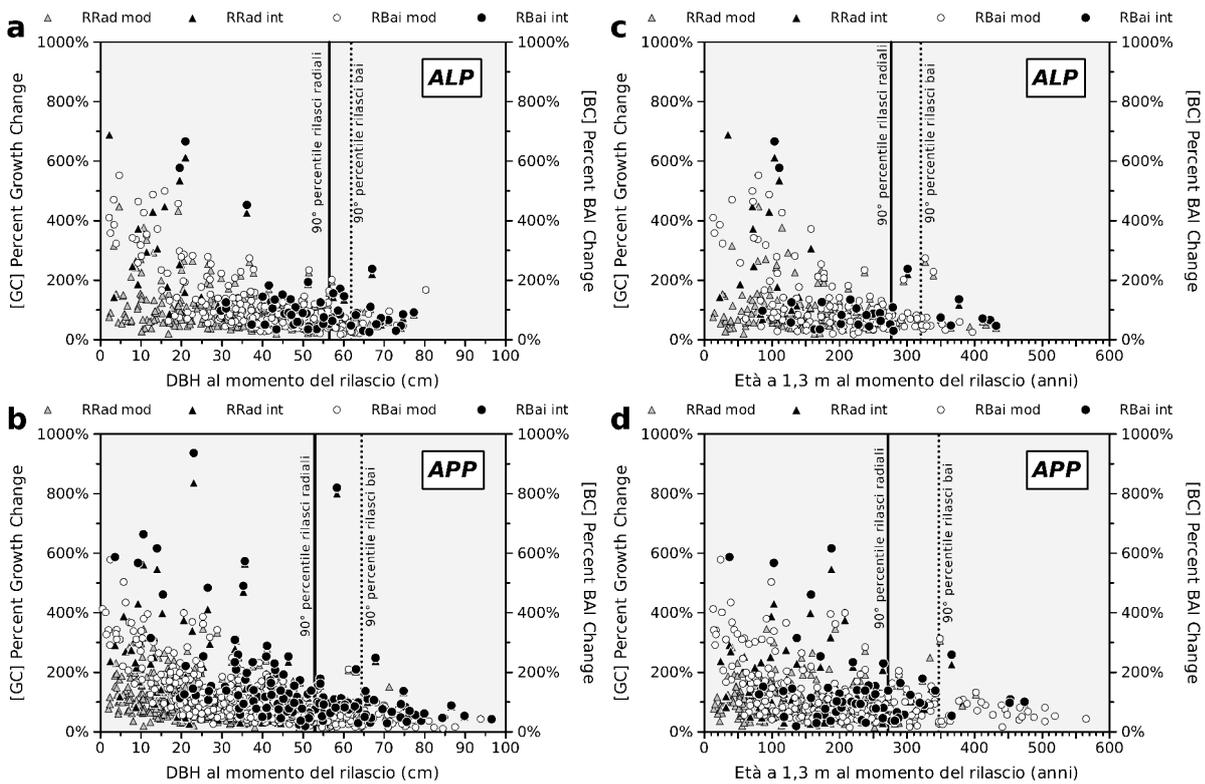
immediatamente come il numero dei rilasci radiali sia maggiore rispetto a quello dei rilasci di BAI nelle classi diametriche minori (classe diametrica 35 sulle Alpi, 25 sugli Appennini), mentre a partire dalle piante di dimensioni intermedie (~40 cm sulle Alpi, ~30 cm sugli Appennini) i rilasci vengano registrati in misura maggiore in termini di area basimetrica.



**Fig. 12** Numero totale di rilasci radiali e basimetrici individuati nei siti alpini (sinistra) e appenninici (destra) distinti per classi diametriche di 5 cm. L'area in grigio rappresenta il rapporto tra numero di rilasci di area basimetrica/numero di rilasci radiali (la linea nera rappresenta il rapporto atteso 1:1).

### Effetti delle dimensioni e dell'età delle piante sulla risposta al disturbo

Una volta sviluppate le cronologie di disturbo, compresi i rapporti tra eventi moderati ed intensi e stabiliti la frequenza e i tempi di ritorno dei disturbi, sia in base alla crescita radiale che alle variazioni di area basimetrica, è stata spostata l'attenzione sulla risposta delle piante ai disturbi in funzione delle dimensioni e dell'età degli individui. Ogni rilascio, quindi, è stato descritto non solo attraverso le coppie di valori di PG e GC (o PB e BC) necessari per l'applicazione della boundary lines e la discriminazione tra eventi moderati ed intensi, ma anche attraverso i valori di diametro ed età (quando disponibili) che le piante con rilascio avevano al momento del disturbo. In particolare le variazioni percentuali di crescita radiale e basimetrica sono state messe in relazione prima con il diametro a petto d'uomo (1,3 m d'altezza lungo il fusto) e successivamente con l'età (intesa come età a 1,3 m) (Fig.13).



**Fig. 13** Rapporto tra variazioni di crescita radiale (GC) e basimetrica (BC) con diametro ed età relative ai soli rilasci di crescita individuati attraverso le boundary lines sui siti alpini (in alto) e appenninici (in basso). Le linee continue verticali rappresentano la soglia diametrica e cronologica per i rilasci radiali (definita come 90° percentile della distribuzione delle variabili diametro ed età), le linee tratteggiate la soglia diametrica e cronologica per i rilasci di area basimetrica.

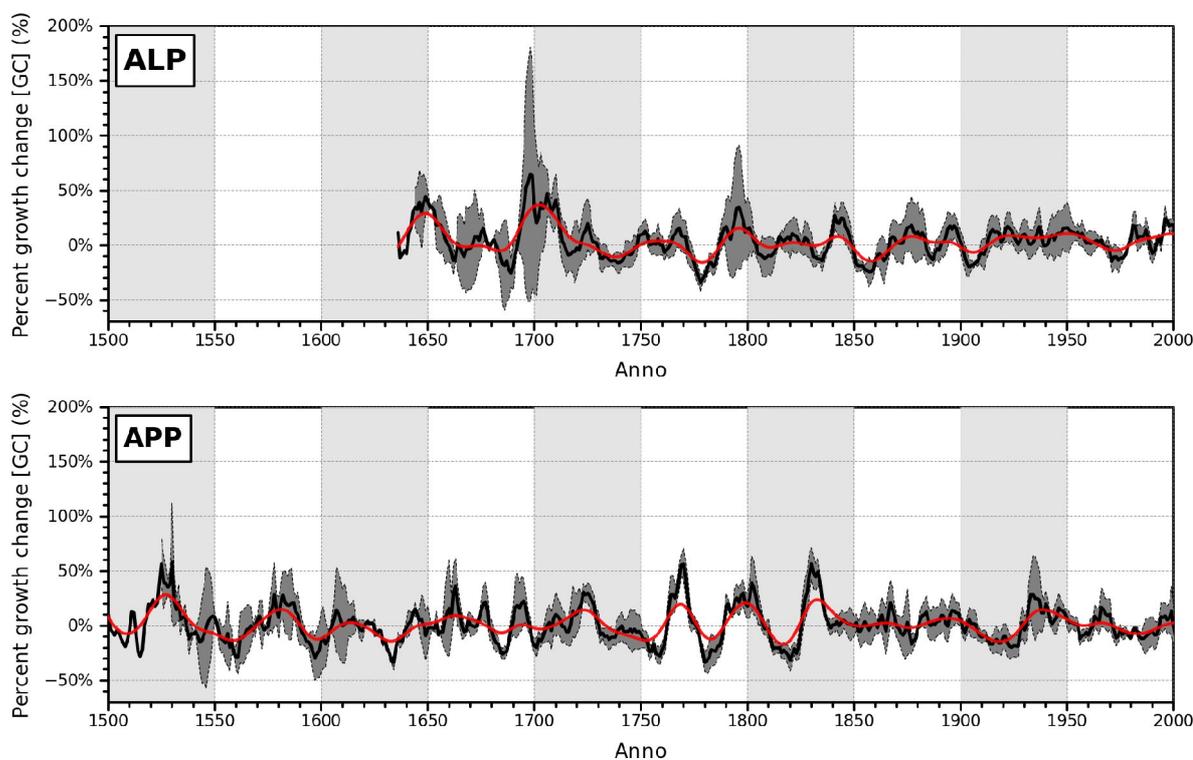
È interessante la somiglianza tra i valori soglia (definiti in termini statistici come il 90° percentile della distribuzione dei diametri e delle età associate ai rilasci) tra siti Alpini ed Appenninici. Per quanto riguarda il diametro, infatti, nei siti alpini la soglia per i rilasci radiali è pari a 56 cm mentre nei siti appenninici è di poco inferiore (53 cm); le soglie diametriche per i rilasci di BAI invece sono maggiori, ma ancora una volta simili, sulle Alpi (62 cm) come sugli Appennini (64 cm). Nel complesso sulle Alpi sono stati individuati rilasci di crescita sia radiali che basimetrici fino a ~80 cm di diametro, mentre negli Appennini anche individui di quasi 100 cm di diametro hanno manifestato rilasci. Questa informazione, tuttavia, non fornisce un dato confrontabile in quanto legato alla densità dei grandi alberi, la cui presenza varia nei siti campionati soprattutto in funzione del diverso livello di naturalità. Per tale ragione si è preferito definire le soglie di rilascio in termini statistici, attraverso un parametro (es. i percentili) legato alla distribuzione dell'intero campione.

Anche per quanto riguarda l'età le soglie massime di rilascio sono simili tra Alpi e Appennini in termini di rilasci radiali (276 e 272 anni rispettivamente), mentre la differenza si allarga considerando i rilasci di area basimetrica (320 anni sulle Alpi; 347 anni sugli Appennini). Pur

considerando la relatività del dato, per le ragioni già dette, è comunque notevole la capacità di risposta al disturbo del faggio che ha prodotto rilasci (anche intensi) fino a ~450 anni nei popolamenti alpini e oltre 550 anni (precisamente 556 anni) nei popolamenti appenninici.

#### Effetti del clima sul regime di disturbo a scala regionale

Analizzando le cronologie medie regionali di Percent Growth Change (GC) (Fig. 14) si osserva non solo la presenza di oscillazioni periodiche, ma anche come tali oscillazioni siano comuni a tutti i siti, in particolare per gli Appennini. Le cronologie regionali di GC, al pari delle cronologie di disturbo, rivelano pertanto la presenza di possibili pattern climatici di medio-lungo termine alla base delle fluttuazioni di crescita, le quali a loro volta sono conseguenza diretta (es. crescita sostenuta nei periodi freschi e umidi) o indiretta del clima (es. maggior frequenza di disturbo durante periodi di passaggio di aree cicloniche = maggior numero di schianti e aumento della mortalità degli individui dominanti = migliori condizioni di crescita per le piante rimanenti). Le cronologie medie regionali di GC risultano essere legate con le serie storiche strumentali degli indici AMO e NAO attraverso una correlazione diretta per quanto riguarda l'AMO e inversa per quanto riguarda il NAO (Tabella 8).



**Fig. 14** Cronologie medie annue di Percent Growth Change (GC) per le Alpi (in alto) e gli Appennini (in basso). Le cronologie sono state ottenute mediando i valori di GC medio di ogni sito; l'area in grigio rappresenta  $\pm 2$  errori standard; la linea rossa rappresenta una smoothing spline cubica a 30 anni.

**Tabella 8** Coefficiente di correlazione  $r$  (Pearson product-moment) delle cronologie stagionali di *Percent Growth Change* con l'*Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO)* e con la *North Atlantic Oscillation (NAO)* per il periodo 1865-1994.

	Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) index <sup>1</sup> 1865-1994	North Atlantic Oscillation (NAO) index <sup>2</sup> 1865-1994
<b>AMO index</b>		-0.20
<b>NAO index</b>	-0.20	
<i>Zwielauf</i>	0.51	-0.16
<i>Gëißlucken</i>	0.17	0.21
<i>Kholersgraben</i>	-0.08	0.42
<i>Lateis</i>	0.37	0.12
<b>Media Alpi</b>	0.42	0.20
<i>Scangive</i>	0.43	-0.35
<i>Val Cervara</i>	0.41	-0.09
<i>Coppo del Principe</i>	0.63	0.13
<i>Coppo del Morto</i>	0.32	-0.27
<i>Pollino</i>	0.48	0.05
<b>Media Appennini</b>	0.69	-0.17

<sup>1</sup> Kaplan SST V2 data, NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA  
<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.sm.long.data>

<sup>2</sup> Hurrell (1995),  
[http://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/cas\\_data\\_files/asphilli/nao\\_station\\_monthly\\_2.txt](http://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/cas_data_files/asphilli/nao_station_monthly_2.txt)

La cronologia media di GC appenninica è meglio correlata con l'indice AMO ( $r = 0.69$ ; Pearson product-moment) rispetto a quella alpina ( $r = 0.42$ ); anche a livello di singoli siti la correlazione tra l'Appennino e l'AMO si mantiene elevata e sempre diretta per tutti i popolamenti, mentre le faggete alpine mostrano una correlazione diretta mediamente più bassa con l'indice AMO, e addirittura inversa nel sito di Kholersgraben. La correlazione tra cronologie GC e l'indice NAO, viceversa, non è univoca tra Alpi ( $r = 0.20$ ) e Appennini ( $r = -0.17$ ), né a livello di cronologia media né tra siti: tra le faggete alpine 3 su 4 presentano una correlazione diretta con il NAO e solo una (Zwielauf) una correlazione inversa, mentre nelle faggete appenniniche le variazioni di crescita sono per lo più anticorrelate con il NAO, eccezion fatta per i siti di Coppo del Principe e del Pollino. Si nota infine come gli stessi indici AMO e NAO siano tra loro anticorrelati ( $r = -0.20$ ). In particolare i due indici sono responsabili delle traiettorie dei cicloni nord-atlantici sull'Europa: durante le fasi di AMO positivo le aree cicloniche di bassa pressione transitano alle basse latitudini, portando perturbazioni e condizioni di maggiore umidità sul Mediterraneo, mentre durante le fasi di AMO negativo i cicloni atlantici passano sull'Europa continentale, provocando condizioni più aride sul Mediterraneo (Voskresenskaya & Maslova 2011). Il NAO invece si comporta in

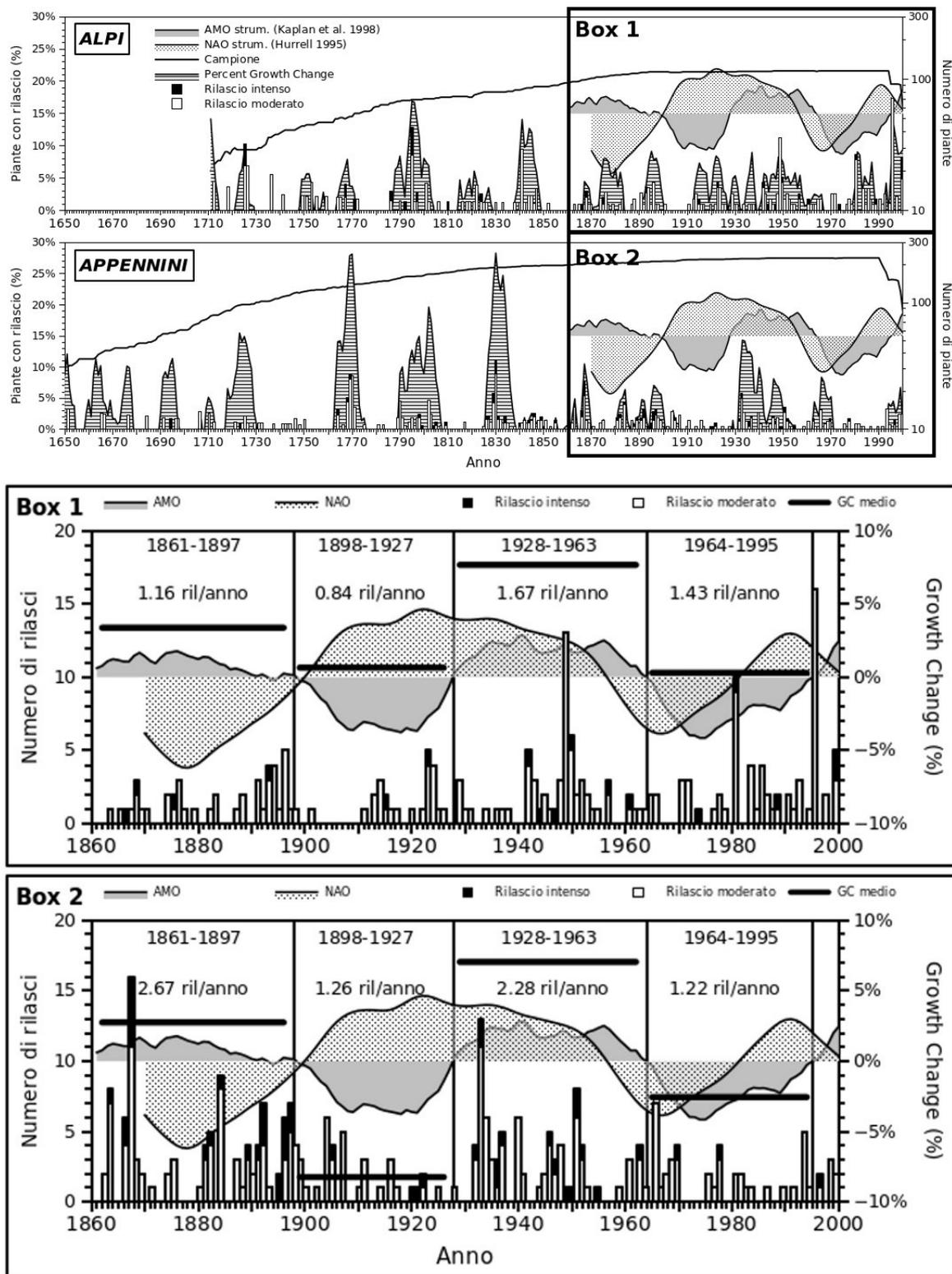
maniera opposta all' AMO, quindi fasi negative del NAO aumentano la frequenza di passaggio di aree cicloniche sul Mediterraneo mentre durante le fasi positive di NAO le perturbazioni passano più a nord (Polonskii 2008).

Per analizzare il rapporto tra regime di disturbo e clima sono state riorganizzate le cronologie di disturbo su base semi-decadale mostrate in precedenza in modo tale da riportare la frequenza di disturbo annuale, unendo i siti alpini ed appenninici. Le cronologie di disturbo regionali con risoluzione annuale valide per le Alpi e per gli Appennini sono riportate in Fig.15 (parte alta), insieme alle cronologie di Percent Growth Change radiale e agli indici della Multidecadal Atlantic Oscillation (Indice AMO) e della North Atlantic Oscillation (Indice NAO): queste cronologie sono state sviluppate a partire dall'anno in cui erano disponibili, nell'ambito di ciascuna macroregione, almeno 20 serie dendrocronologiche datate (1710-2000 sulle Alpi; 1650-2000 sugli Appennini). Poichè le cronologie di Growth Change e BAI Change stagionali e regionali hanno concordanza totale per quanto riguarda il segno +/- delle variazioni interannuali e magnitudo delle oscillazioni pressochè identiche lungo tutto l'arco temporale coperto, considerata la migliore capacità descrittiva della storia del disturbo nel medio-lungo periodo della crescita radiale cui si è fatto riferimento precedentemente, i risultati d'ora in avanti verranno riportati solo per le analisi della crescita radiale. I risultati in termini di area basimetrica, infatti, sono pienamente coerenti in termini quali-quantitativi con quelli ottenuti per la crescita radiale.

Gli aspetti interessanti che emergono lungo tutto il periodo considerato si possono riassumere in due punti principali. In primo luogo sono evidenti singoli anni in cui un gran numero di piante hanno registrato un evento di disturbo in tutti i siti, aspetto che era meno apprezzabile nell'analisi su scala semi-decadale. Sulle Alpi, ad esempio, negli anni 1841 (8 rilasci), 1949 (13 rilasci), 1981 (10 rilasci) e 1996 (16 rilasci) tutti i siti mostrano un forte segnale di disturbo (il picco del 1795, con 9 rilasci, è generato esclusivamente dal sito di Kholersgraben). Sugli Appennini, invece, più che di singole annate (es. 1830, 21 rilasci; 1867, 16 rilasci) si può parlare di periodi di alcuni anni (5÷15 anni) in cui si hanno concentrati un numero notevole di eventi (es. 1768-1771, 36 rilasci; 1789-1798, 27 rilasci; 1826-1835, 57 rilasci; 1840-1851, 32 rilasci; 1866-1869, 27 rilasci; 1887-1899, 44 rilasci; 1932-1937, 34 rilasci).

Il secondo punto interessante da rimarcare è la concordanza tra la frequenza degli eventi di disturbo, sia moderati che intensi, e le oscillazioni del Growth Change. Si nota infatti come durante fasi ricche di eventi di disturbo il GC medio regionale sia positivo, mentre durante le fasi di GC negativo la frequenza di disturbo sia bassissima o nulla, sulle Alpi ma in modo

particolare sugli Appennini. Nel primo caso si hanno periodi di disturbo accompagnati da picchi di GC positivo tra il 1785 e il 1805 (anche se il contributo di Kholersgraben per quanto riguarda l'evento del 1795 sbilancia l'informazione verso un solo sito), tra il 1838 e il 1849, tra il 1870 e il 1885, mentre dopo il 1910 gli eventi di disturbo diventano più frequenti e il GC si mantiene tendenzialmente positivo per molti anni. Sugli Appennini, invece, i periodi di GC positivo associati a fasi di disturbo sono ben distinti tra loro, sia nella porzione più antica della cronologia (es. 1658-1679; 1689-1697; 1717-1731) che nel tratto centrale e recente dove, per esempio, per circa 80 anni (approssimativamente tra il 1760 e il 1840), le oscillazioni di GC tra tutti i siti appenninici, da Scangive al Pollino, sono fortemente concordi tra loro (si veda anche Fig. 14). L'associazione tra oscillazione del Growth Change e frequenza degli eventi di disturbo non è un aspetto banale come potrebbe sembrare, ma nasconde in realtà delle importanti implicazioni che ci aiutano a comprendere le dinamiche del disturbo. Se da un lato è infatti intuitivo come valori elevati di Growth Change portino all'individuazione di un maggior numero di rilasci, è altrettanto chiaro che, come si può osservare in Fig. 15, non sempre a picchi di GC positivo è associata una uguale frequenza di disturbo e che comunque la magnitudo del GC supera generalmente la frequenza di disturbo anche in quei periodi in cui si hanno molti rilasci (si faccia per esempio riferimento ai periodi poc'anzi citati). Questo perché la cronologia di Growth Change e la frequenza di eventi di disturbo veicolano sostanzialmente due informazioni simili nella sostanza ma distinte nella forma. Basti pensare a come l'apertura di una o più buche nella volta arborea in popolamenti chiusi e composti da specie tolleranti dell'ombra come le faggete, provochi un generale miglioramento delle condizioni di illuminazione nel sottobosco. In questi casi non solo gli individui ai margini della buca beneficiano della maggior quantità di luce disponibile, ma anche, seppur marginalmente, quelli che si trovano entro una certa distanza dalla stessa. Tutte le piante nell'area intorno alla buca, quindi, rispondono manifestando delle variazioni di crescita positive, che saranno tanto maggiori quanto più intenso (es. schianto di più piante) e diffuso sarà il disturbo (es. apertura contemporanea di più buche in conseguenza dello stesso evento). Tuttavia solo nelle piante ai margini o all'interno della buca, dove la risposta al disturbo è più intensa, tale variazione di GC sarà registrata come un rilascio dalla boundary line e quindi associata al disturbo. Pertanto mentre la boundary line ci fornisce un'indicazione quantitativa del disturbo (es. il numero di piante che lo hanno registrato), l'analisi visuale dei pattern di Growth Change ci dà un'informazione qualitativa circa la diffusione del disturbo nel popolamento o nell'area geografica considerata.

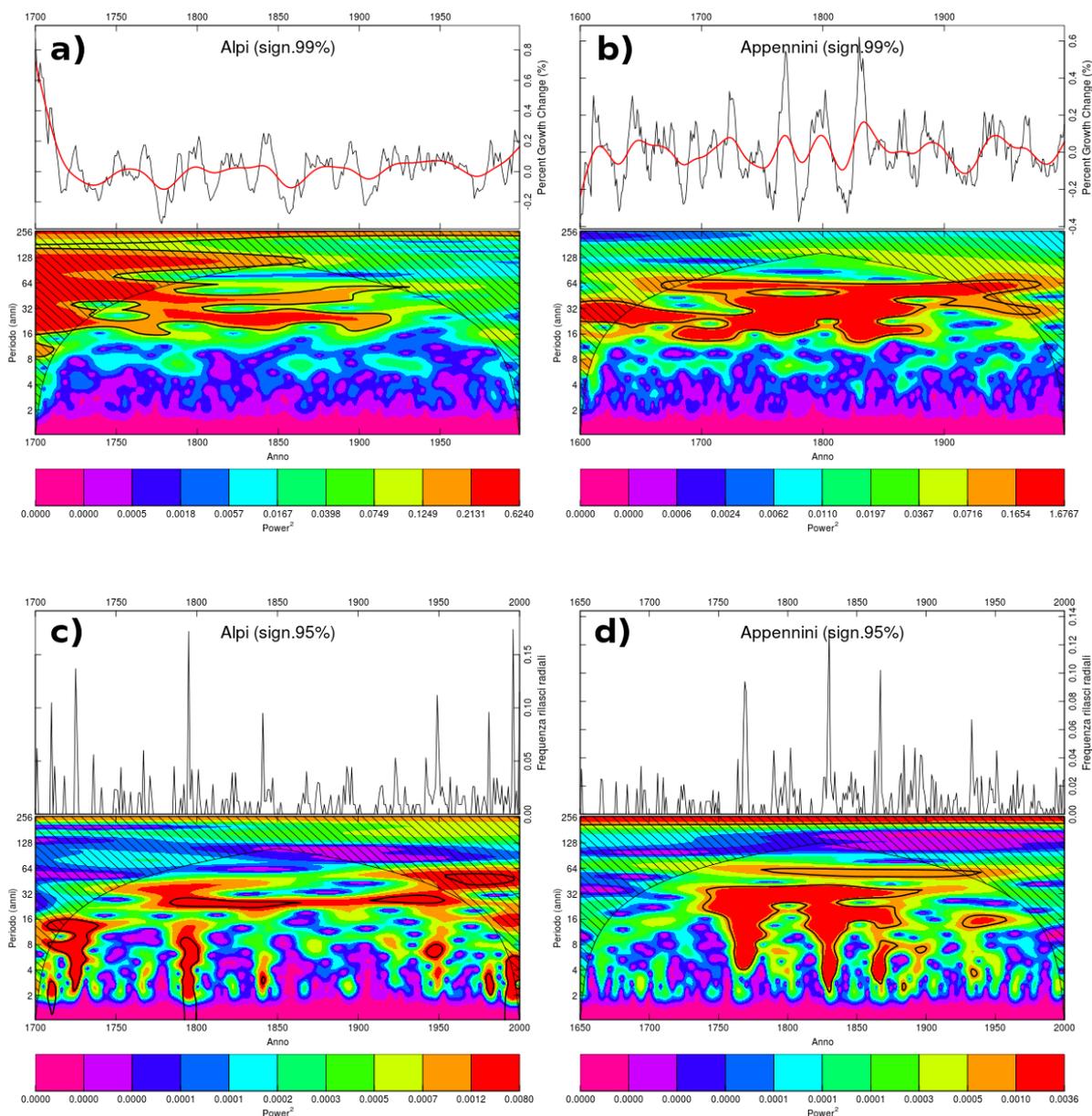


**Fig. 15** (In alto) Cronologie di disturbo con risoluzione annuale valide per le Alpi e per gli Appennini; i rilasci sono riportati in termini relativi (% sul totale del campione di piante presenti); il GC è nella stessa scala della frequenza di disturbo (asse y di sinistra). (In basso) Cronologie di disturbo espresse in valori assoluti (n° di rilasci) per il periodo 1860-2000 valide per le Alpi (BOX1) e gli Appennini (BOX2).

Le considerazioni fatte fin qui circa il rapporto tra disturbo e variazioni di crescita rafforzano l'ipotesi che dietro i picchi di disturbo e di Growth Change riscontrati sia nelle Alpi che negli Appennini vi sia una forte componente climatica. Un ulteriore elemento a favore di questa tesi emerge osservando la parte recente della cronologia di disturbo annuale, quella in cui è possibile sovrapporre alla registrazione dei disturbi anche gli indici AMO e NAO (Fig.15, Box1 e Box2). Osservando la Fig. 15 (parte alta) e i BOX1 e 2, relativi rispettivamente alle Alpi e agli Appennini, emerge il legame tra gli indici, in particolare l'AMO, la frequenza di disturbo, il numero assoluto di eventi di rilascio, e il GC medio, legame che si manifesta attraverso una maggiore frequenza, sia relativa (Fig. 15 parte alta) che assoluta (BOX1, BOX2), di rilasci durante le fasi positive dell'indice AMO. Nei periodi di AMO positivo (1861-1897; 1928-1963) sono stati registrati mediamente più rilasci di quanto non avvenuto nei periodi di AMO negativo (1898-1927; 1964-1995): sulle Alpi rispettivamente 1.16 rilasci anno<sup>-1</sup> e 1.67 rilasci anno<sup>-1</sup> e sugli Appennini (dove l'influenza dell'indice AMO sul regime di disturbo è più forte) rispettivamente 2.67 rilasci anno<sup>-1</sup> e 2.28 rilasci anno<sup>-1</sup>. Al contrario il numero di disturbi rilevati durante le fasi di AMO negativo è minore sulle Alpi (0.84 rilasci anno<sup>-1</sup>; 1.43 rilasci anno<sup>-1</sup>) ma soprattutto sugli Appennini, dove il numero di rilasci è quasi dimezzato (1.26 rilasci anno<sup>-1</sup>; 1.22 rilasci anno<sup>-1</sup>). Significativo è anche il dato relativo al Growth Change medio registrato durante le oscillazioni dell'indice AMO. Sulle Alpi durante le fasi positive dell'AMO, infatti, le variazioni di crescita radiale medie annue sono ampiamente positive (+3.4% nel periodo 1861-1897; +7.7% nel periodo 1828-1963) mentre nelle fasi di AMO negativo l'incremento radiale medio annuo è quasi nullo (+0.6% nel periodo 1898-1927; +0.3% nel periodo 1964-1995) (Fig.15 BOX1). Come già emerso dall'analisi di correlazione (Tabelle 8), nei siti Appenninici l'effetto delle oscillazioni dell'indice AMO sulle variazioni di crescita è ancora più evidente, tanto che i siti manifestano variazioni di crescita annue positive durante fasi positive dell'AMO (+2.7% nel periodo 1861-1897; +7.0% nel periodo 1828-1963) e addirittura fasi di decremento durante i periodi di AMO negativo (-8.2% nel periodo 1898-1927; -2.6% nel periodo 1964-1995) (Fig.15 BOX2). L'indice NAO, invece, non svolge un ruolo primario nel modificare i pattern di rilascio e di GC nelle due macroregioni, ma piuttosto sembra amplificare o smorzare l'effetto dell'AMO. Durante il periodo 1861-1897, per esempio, con AMO in fase positiva e NAO in fase negativa si verifica la condizione ottimale per il passaggio delle aree cicloniche atlantiche sul Mediterraneo, e quindi per avere un maggior numero di eventi di disturbo: infatti in questo periodo la frequenza media di eventi di rilascio individuati e il GC medio sono alti, in particolare sugli Appennini. Nel

periodo successivo (1898-1927) si verifica la situazione inversa, con AMO negativo e NAO positivo, e infatti il numero dei disturbi cala sensibilmente, insieme al Growth Change medio, in entrambe le macroregioni.

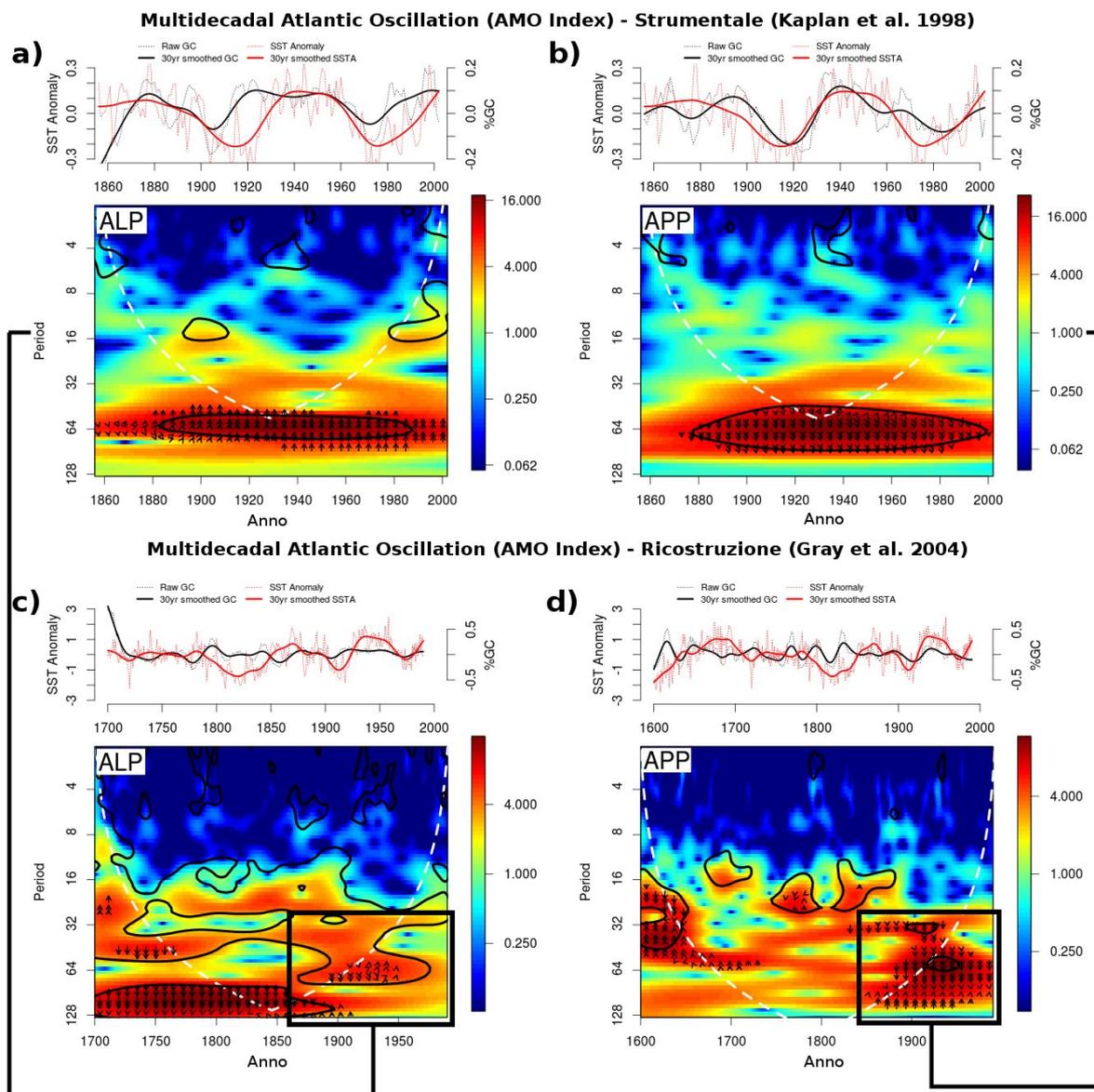
In base ai risultati fin qui illustrati emerge chiaramente come la Multidecadal Atlantic Oscillation (Indice AMO) abbia un ruolo importante nel plasmare il regime di disturbo all'interno delle faggete altimontane distribuite lungo l'arco appenninico (più che sulle Alpi) e il forte legame che esiste tra le variazioni di crescita dei popolamenti (esprese come medie mobili su base decennale attraverso il parametro del Percent Growth Change [GC]) e le oscillazioni dell'indice AMO. Per valutare più approfonditamente l'entità di tale legame è stata condotta una analisi *wavelet* sulle cronologie medie di GC alpine ed appenniniche. La wavelet analysis è stata effettuata su due distinte serie: prima sulle cronologie medie di GC alpine ed appenniniche (Fig. 16a,b) poi sulle cronologie di disturbo con risoluzione annuale di Fig.15. In quest'ultimo caso, tuttavia, le frequenze degli eventi di disturbo sono state trattate come una serie continua, in cui però alla frequenza relativa degli eventi intensi è stato assegnato un peso doppio rispetto a quello degli eventi moderati. La funzione wavelet madre applicata è quella di Morlet (Torrence & Compo 1998). Per quanto riguarda le cronologie di GC i risultati più interessanti riguardano sicuramente le faggete appenniniche (considerate nel periodo 1600-2000), in cui la wavelet analysis ha evidenziato la presenza di un segnale persistente e significativo (sign. 99%) centrato su una banda di ~65-70 anni nelle oscillazioni del GC nel periodo compreso tra il 1670 e il 1990 (Fig.16b). Nelle Alpi, viceversa, non emerge una ciclicità così ben distinta nelle variazioni di crescita radiale (Fig.16b), e in generale la potenza del segnale è molto minore rispetto agli Appennini. Considerando invece le serie storiche delle frequenze di disturbo sulle Alpi è visibile, pur se molto debole, una periodicità di circa 25-30 anni tra il 1800 e il 1850, e poi ancora tra il 1910 e il 1950 (sign.99%) (Fig.16c). Anche sugli Appennini emerge una ciclicità analoga a quella delle Alpi (circa 30 anni) per quanto riguarda la frequenza degli eventi di disturbo; tuttavia anche in questo caso si registra, debole in termini di potenza ma comunque statisticamente significativo al 95%, un segnale persistente centrato intorno alla banda di ~65 anni nel periodo compreso tra il 1770 e il 1940 (Fig.16d). La presenza di una ciclicità persistente di circa 65 anni è una evidenza estremamente importante per confermare il legame tra Indice AMO e regime di disturbo nell'area del Mediterraneo: infatti 65-70 anni è anche la ciclicità della Multidecadal Atlantic Oscillation (AMO), riconosciuta da Schlesinger & Ramankutty (1994), che si riflette sulla variabilità climatica dell'intero emisfero boreale.



**Fig.16** Wavelet analysis condotta sulle cronologie medie di percent growth change alpine (a), appenniniche (b) e sulle cronologie di disturbo radiale con risoluzione annuale valide per le Alpi (c) e gli Appennini (d). Le aree contornate di nero indicano le ciclicità statisticamente significative secondo il livello di significatività riportato nell'intestazione di ogni grafico. L'area tratteggiata rappresenta il "cono di influenza", in cui l'effetto margine diventa importante e può distorcere il risultato dell'analisi. Per meglio rappresentare graficamente l'andamento della ciclicità del GC, le cronologie medie sono state filtrate con una smoothing spline a 40 anni (linea rossa in (a) e (b) ).

Alla luce della relazione emersa tra Percent Growth Change ed indice AMO, sia statisticamente che graficamente, è stata eseguita la crosswavelet analysis (Grinsted et al. 2004), per evidenziare potenze e ciclicità comuni tra le due variabili. Il confronto tra il GC e la serie storica strumentale dell'Indice AMO (1856-2000; Kaplan et al. 1998), mostra un segnale persistente e significativo centrato intorno alla banda di ~65 anni per quasi tutto il periodo analizzato (Fig.17a,b). Purtroppo data la brevità delle misurazioni strumentali

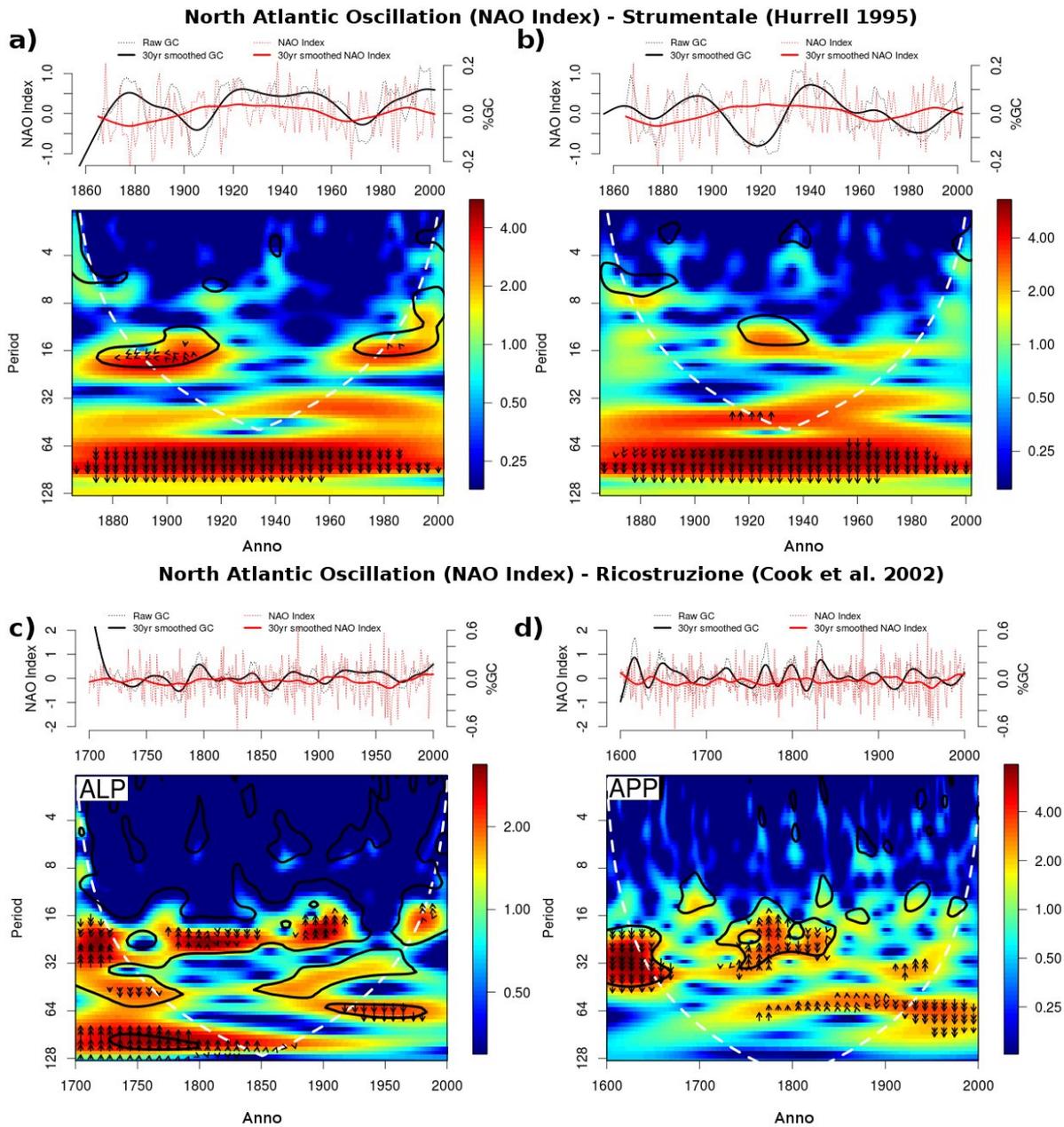
dell'AMO (~150 anni), la banda in questione ricade all'interno del cono di influenza, in cui l'effetto marginale potrebbe alterare l'analisi: tuttavia, almeno per il periodo centrale (1900-1960) il risultato può essere considerato consistente. È interessante come anche sulle Alpi, dove il segnale dell'AMO è meno forte, la crosswavelet analysis evidenzia una concordanza con le oscillazioni del GC in termini di potenza per cicli di ~65 anni (Fig.17a).



**Fig.17** Trasformate cross-wavelet delle cronologie medie regionali di Percent Growth Change delle Alpi (a,c) e degli Appennini (b,d) con le misurazioni strumentali dell'indice AMO (1856-2000; Kaplan et al. 1998) (a,b) e con la ricostruzione basata su cronologie di ampiezze anulari (Gray et al. 2004) (c,d). Le frecce tendenti verso destra indicano periodi "in fase", le frecce tendenti verso sinistra indicano periodi "in antifase", mentre le frecce verso l'alto (o verso il basso) indicano che una delle due variabili "anticipa" (o "segue") l'altra formando un angolo di fase di 90°. Livello di significatività = 95%.

Tuttavia nei siti appenninici, rispetto a quelli alpini, le due variabili (GC e AMO) sono per lunghi periodi *quasi* in fase (frece senza stanghetta tendenti verso destra), cioè ad oscillazioni negative dell'una corrispondono oscillazioni negative dell'altra (come si può vedere anche graficamente dalle splines in Fig.17b). Le oscillazioni dell'AMO, inoltre, anticipano leggermente (es. pochi anni) quelle del GC, il che è coerente con una interazione di tipo causa-effetto tra il clima e il regime di disturbo sugli Appennini. Sulle Alpi diversamente il GC e l'AMO, pur presentando una ciclicità comune, non sono in fase in quanto l'oscillazione dell'AMO tende a seguire quella del GC (frece con stanghetta rivolte verso l'alto; Fig.17a). Questo non consente quindi di stabilire una relazione causale tra le oscillazioni dell'AMO e il regime di disturbo nelle Alpi, confermando l'ipotesi di un regime di disturbo alpino le cui dinamiche sono probabilmente il risultato di interazioni tra pattern climatici differenti, sia atlantici che artico-continentali. La crosswavelet analysis eseguita utilizzando la ricostruzione dell'indice AMO di Gray et al. (2004), basata su cronologie di ampiezze anulari, non ha mostrato un segnale comune con le cronologie di GC alpine (periodo 1700-2000) ed appenniniche (periodo 1600-2000) (Fig. 17c,d). Ciò potrebbe essere dovuto alla diversa provenienza geografica delle serie di ampiezza anulare che sono state utilizzate come variabili proxy (Stati Uniti orientali, Europa centrale, Scandinavia, nord Africa e medio Oriente) (Gray et al. 2004), ma potrebbe anche essere indicativo di imprecisioni nella ricostruzione dell'Indice AMO che, almeno per quanto riguarda il XVII e XVIII secolo, non sembra catturarne le oscillazioni nell'area del Mediterraneo. È infatti interessante come considerando gli ultimi 150 anni, quando cioè si entra nel range delle misurazioni strumentali, il segnale comune di 65 anni tra il GC e la ricostruzione dell'indice AMO torna a manifestarsi, più persistente per quanto riguarda i siti alpini ma più potente sull'Appennino (Fig.17c,d).

La crosswavelet analysis tra il GC e le serie storiche dell'indice NAO strumentale (1865-2000; Hurrell 1995) e ricostruito (1600-2000) non ha portato invece a risultati particolarmente interessanti, come era ipotizzabile alla luce delle precedenti considerazioni (Fig. 18). Dal confronto con la serie strumentale non emerge nessun segnale comune persistente sufficientemente a lungo da giustificare una relazione causale tra le due variabili: sulle Alpi, ad esempio, il NAO e il GC tra 1870 e il 1920 presentano un segnale comune intorno alla banda di 15-20 anni, e le due oscillazioni sono in antifase (Fig.18a), coerentemente con i risultati emersi dall'analisi di correlazione e dai pattern di disturbo.



**Fig. 18** Trasformate cross-wavelet delle cronologie medie regionali di Percent Growth Change delle Alpi (a,c) e degli Appennini (b,d) con le misurazioni strumentali dell'indice NAO (1865-2000; Hurrell 1995) (a,b) e con la ricostruzione di Cook et al. 2002 c,d). Le frecce tendenti verso destra indicano periodi "in fase", le frecce tendenti verso sinistra indicano periodi "in antifase", mentre le frecce verso l'alto (o verso il basso) indicano che una delle due variabili "anticipa" (o "segue") l'altra formando un angolo di fase di 90°. Livello di significatività = 95%.

Sugli Appennini, invece, non emerge nessun segnale comune di rilievo (Fig. 18b). Sulle Alpi, come sugli Appennini, si nota solamente un lungo periodo in cui le due variabili si trovano *quasi* in fase (frecce verso il basso in Fig.18a,b), centrato sulle bande comprese tra 64 e 128 anni: tuttavia il segnale non è statisticamente significativo. Anche la crosswavelet analysis con la serie ricostruita dell'indice NAO non consente l'individuazione di potenze o ciclicità comuni nel segnale (Fig.18c,d).

## Discussioni

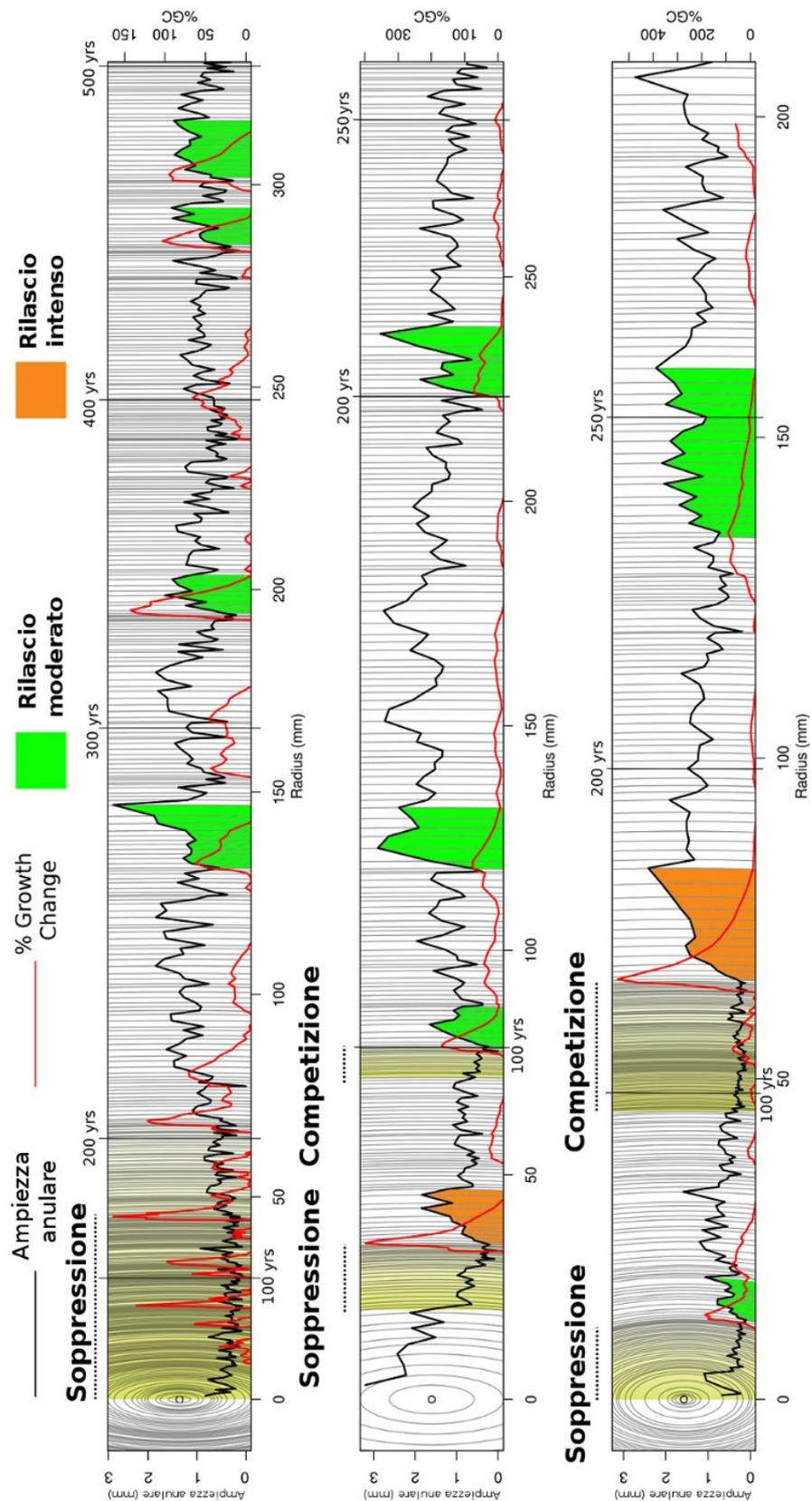
### Indicatori cronologici di vetustà

Un gran numero di indicatori è stato usato in passato per l'individuazione e il monitoraggio di popolamenti vetusti, per comparare strutture forestali vetuste con quelle di popolamenti “secondari”, o ancora per valutare l'efficacia di programmi di restauro forestale definendo il grado di naturalità raggiunto da foreste precedentemente gestite e successivamente lasciate all'evoluzione naturale (Keddy & Drummond 1996; Emborg et al. 2000; Nilsson et al. 2003; Vandekerckhove et al. 2005; Vaillancourt et al. 2008; Blasi et al. 2010; Corona et al. 2010; Liira & Kohv 2010; Marchetti et al. 2010; Piovesan et al. 2010; Ziaco et al. 2012a). Il numero di potenziali indicatori presenti in letteratura è impressionante: Maes et al. (2011) hanno analizzato 157 potenziali indicatori per sviluppare un indice di valutazione degli effetti della gestione selvicolturale sulla struttura, la composizione specifica e sull' integrità ecologica di popolamenti forestali in Belgio; Liira & Kohv (2010), hanno definito un set di 35 indicatori per stabilire il grado di vetustà e gli effetti del disturbo antropico su popolamenti forestali distribuiti lungo un gradiente di produttività in Estonia. La maggior parte di questi indicatori, tuttavia, prendono in considerazione aspetti strutturali, composizionali o funzionali (Maes et al. 2011). Stabilire il grado di naturalità di un popolamento può essere infatti estremamente costoso in termini di tempo, risorse economiche e conoscenze richieste (Bauhus et al. 2009) quindi il cosiddetto “approccio strutturale” per lo studio delle caratteristiche di vetustà forestale è ancora il più diffuso. La struttura di un popolamento forestale rappresenta infatti un “surrogato facilmente misurabile per funzioni (es. produttività) e per organismi (es. specie animali e vegetali legate a microhabitat tipici di popolamenti vetusti) che sarebbero altrimenti difficili da misurare direttamente” (Franklin et al. 2002). A fronte dell'ampia gamma di indicatori strutturali, composizionali e di processo rinvenibili in letteratura, emerge una carenza di indicatori cronologici, che consentano cioè di integrare le informazioni strutturali con dati relativi all'età delle piante e alla loro distribuzione all'interno del popolamento (Ziaco et al. 2012b). La struttura per età dei popolamenti naturali è invece tra gli indicatori più validi, in quanto essa è direttamente collegata agli eventi di disturbo che causano la nascita, l'insediamento e la morte delle coorti forestali (Wirth et al. 2009). È innegabile che la determinazione dell'età delle piante richieda tempo e attrezzature adeguate per la lettura delle serie dendrocronologiche (tantopiù in popolamenti caratterizzati dalla presenza di piante annose): ad esempio in uno studio volto a

individuare le caratteristiche di vetustà di 13 popolamenti forestali Kneeshaw & Burton (1998) hanno determinato l'età di 2720 piante. Tuttavia è altrettanto vero che se per definizione una foresta vetusta si distingue dai popolamenti gestiti per ospitare individui plurisecolari (Motta et al. 2008), allora è doveroso considerare la componente “cronologica” nel momento in cui ci si appresta a descriverne il livello di vetustà. La dendrocronologia, inoltre, non solo consente di determinare l'età del popolamento, ma permette anche di avere una prospettiva di medio-lungo termine ad alta risoluzione (anno per anno) riguardo le fluttuazioni e i trend di crescita di un popolamento (Biondi 1999) o la sua storia del disturbo (Di Filippo et al. 2004; Ziaco et al. 2012b). Ciò non toglie che gli indicatori cronologici debbano comunque rispettare i criteri di a) facilità di misurazione, b) facilità di interpretazione, c) capacità descrittiva, d) validità scientifica ed e) economicità che contribuiscono a definire la bontà di un indicatore (Maes et al. 2011). Tali indicatori, infine, devono essere integrati (ed integrabili) con i più tradizionali indicatori strutturali/funzionali (es. area basimetrica, densità di grandi alberi, quantitativi di necromassa, tessitura del mosaico forestale). Infatti identificare come vetusti popolamenti solo in base all'età delle piante o alle dimensioni delle stesse sarebbe restrittivo e poco obiettivo, in quanto eccessivamente vincolato ad una visione antropocentrica della Natura (Frelich & Reich 2003). Gli indicatori cronologici di vetustà riportati in questo studio possono essere distinti in due gruppi: quelli basati sulla *lunghezza* delle serie e quelli derivati invece dall'analisi dell'*età* delle serie. Nel primo caso ( $Age_5$ ,  $Age_{Max}$ ) gli indicatori si ricavano semplicemente contando gli anelli presenti su una serie, senza nessuna correzione legata alla stima del numero di anelli mancanti in caso di carote incomplete; nel secondo caso ( $Age_{Canopy}$ ,  $SD$ ) gli indicatori sono invece calcolati utilizzando le serie storiche di età, ovvero quelle serie dendrocronologiche in cui ad ogni anello è stata assegnata l'età al momento della formazione stimando, nel caso di carote incomplete, il numero di anelli mancanti dal midollo della pianta. I parametri  $Age_5$  ed  $Age_{Max}$  forniscono un dato interessante e di facile misurazione che consente di stimare l'età del popolamento, sia attraverso un valore massimo riscontrato che dando un'indicazione media relativa però alle sole cinque piante più vecchie. Poiché il calcolo di questi due indicatori non richiede correzioni sulle serie dendrocronologiche (in teoria sarebbe sufficiente il semplice conteggio degli anelli, anche senza l'utilizzo di un microscopio se gli anelli risultano ben leggibili), essi appaiono di semplice applicazione tanto da poter essere determinati anche da personale non-specializzato. È importante però differenziare l'informazione che i due parametri trasmettono. L' $Age_{Max}$ , definendo l'età massima riscontrata in un popolamento, dovrebbe consentire, in teoria, di stabilire il massimo potenziale di longevità espresso in una

stazione. Questo parametro, tuttavia, è sensibile alla storia di gestione del popolamento tanto che l'Age<sub>Max</sub> registrato non è quasi mai l'effettivo potenziale massimo di longevità, in particolare nel caso di foreste con alle spalle una storia di utilizzazione (Di Filippo et al. 2012). La capacità descrittiva dell'Age<sub>Max</sub> è inoltre inficiata dal fatto che anche all'interno di popolamenti impattati dall'attività antropica, più o meno severamente, possono sopravvivere al taglio (o ad un disturbo intenso) isolati individui. L'Age<sub>Max</sub>, in questo senso, può risultare utile per individuare lembi di foresta più vecchi, risparmiati dalle utilizzazioni, anche all'interno di popolamenti forestali gestiti (es. si veda il caso di Morino in Ziaco et al. 2012a). Per avere invece una rappresentazione migliore dell'età media del popolamento e utilizzare questa informazione come criterio cronologico di vetustà sembra più indicato utilizzare il parametro Age<sub>5</sub>, che è comunque correlato all'Age<sub>Max</sub> ( $r = 0.85$ ,  $p < 0.01$ ) ma attenua il peso dei valori di età estremi, soprattutto se questi si manifestano su uno o pochi individui. Age<sub>Max</sub> ed Age<sub>5</sub> non vengono calcolati considerando l'eventuale presenza o assenza del midollo nella carota e sono pertanto da intendersi come valori “minimi” di età (McCarthy & Weetman 2006). Anche se è pratica comune assegnare all'anello più interno di una serie dendrocronologica età biologica uguale a 1 (Briffa et al. 1992), questa assunzione può generare grandi errori, in particolare quando si opera su piante con fusti irregolari, in quanto anche la serie dendrocronologica più lunga potrebbe in realtà mancare di molti anelli (Biondi & Qeadan 2008b). Il problema è ancora più accentuato quando si opera su specie (es. il faggio) capaci di sopravvivere sotto copertura per periodi di tempo lunghissimi, fino a ~160 anni (Piovesan et al. 2005b).

Se gli indicatori Age<sub>5</sub> ed Age<sub>Max</sub> hanno il vantaggio di non richiedere correzioni e quindi sono utili qualora si voglia avere una stima rapida dell'età di un popolamento, la presenza di numerose carote incomplete è un problema comune quando si campionano alberi annosi, di grandi dimensioni e con fusti spesso cariati (Rozas 2004). Un'analisi di dettaglio delle età del popolamento, con particolare attenzione ai valori medi (Age<sub>Canopy</sub>) e alla dispersione delle età (Range e SD) degli individui nel piano dominante, basata su stime corrette per includere il numero di anelli mancanti, è quindi preferibile. Il parametro Age<sub>Canopy</sub> non è sempre correlato con Age<sub>5</sub> ed Age<sub>Max</sub> e rispetto a questi (in particolare rispetto all'Age<sub>5</sub>) può dare risultati differenti, sostanzialmente a causa di differenze nel campione utilizzato. Il campione che si analizza, infatti, può essere diverso per i due indicatori, con uno (Age<sub>5</sub>) che prende in considerazione tutte le piante campionate e l'altro (Age<sub>Canopy</sub>) che invece considera solo quelle oltre una certa soglia diametrica (es. DBH > 40 cm), ovvero quelle che appartengono al piano dominante.



**Fig. 19** Rappresentazione grafica dei rilasci di crescita e fasi di soppressione in tre serie dendrocronologiche incluse in questo studio. Si noti la presenza di fasi multiple di soppressione e rilascio, tipiche di piante in popolamenti vetusti, e come la curva di Percent Growth Change (linea rossa), per i rilasci individuati mediante la boundary line, abbia il suo massimo in corrispondenza del primo anello la cui ampiezza è maggiore rispetto alla media dei 10 anni precedenti (cfs. Fig.2).

Inoltre poichè in popolamenti pluristratificati e di specie tolleranti dell'ombra come il faggio non esiste un legame tra dimensioni ed età delle piante, individui plurisecolari possono presentarsi anche nel piano dominato (Di Filippo et al. 2012). Tuttavia è importante caratterizzare la struttura cronologica del solo piano dominante poiché se è vero che la presenza di una struttura multicoorte pluristratificata è già di per sé indicativa di condizioni di elevata naturalità e di limitato impatto antropico sulla struttura forestale (Di Filippo & Piovesan 2010), lo è ancora di più quando tale eterogeneità a livello cronologico si riscontra nelle piante dominanti, in quanto ciò testimonia che gli individui che costituiscono il soprassuolo sono stati reclutati in epoche successive. Nel caso dei siti alpini ed appenninici oggetto di studio si è visto come tali fasi di reclutamento di individui nel piano dominante possano durare, in assenza di severi disturbi a scala di popolamento, anche più di 400 anni. A questo proposito gli indicatori di dispersione (Range e SD) possono essere utili per integrare l'informazione veicolata dai precedenti indicatori, in particolare  $Age_5$  ed  $Age_{Canopy}$ : quest'ultimi infatti consentono di stimare l'età media della coorte più vecchia, mentre il range di età e la deviazione standard delle età delle piante permettono di capire se sono presenti più coorti. Range di età comparabili a quelli dei siti con il più alto grado di vetustà sono stati individuati in popolamenti vetusti di faggio dei Carpazi (range > 300 anni) (Trotsiuk et al.2012), anche se in base ad un campione che non distingue piante dominate e dominanti: considerando le piante con  $DBH > 40$  cm, infatti, il range di età si restringe a ~200 anni (Fig. 5 in Trotsiuk et al. 2012). Rozas (2004) riporta invece per alberi dominanti di farnia (*Quercus robur* L.) maturi e vetusti (stramaturi) all'interno di un ex pascolo arborato nel nord della Spagna un range di età di ~330 anni. Nei popolamenti appenninici la dispersione delle età intorno ai valori medi è la vera discriminante tra faggete in cui, altrimenti, l'età media del piano dominante non permetterebbe una chiara distinzione tra vari livelli di vetustà (Tabella 4 e Fig. 7):  $Age_{Canopy}$  si attesta infatti su un valore medio di  $309 \pm 12.5$  anni nei 9 siti oggetto di studio. Un valore sorprendentemente simile (313 anni) è stato individuato da Wirth et al. (2009) come età mediana emersa dall'analisi di 14 studi condotti in foreste vetuste temperate di latifoglie decidue. Si può quindi affermare che attraverso gli indicatori di dispersione è possibile stimare da quanto tempo i processi di disetaneizzazione della foresta siano in atto, mentre gli indicatori di tendenza centrale (in particolare l' $Age_{Canopy}$ ) indicano a che punto è arrivato tale processo, in relazione a quello che è il massimo potenziale di longevità della specie, che nel caso del faggio è superiore ai 5 secoli (Piovesan et al.2010).

L'indicatore MSI si distingue dai restanti perchè non considera la lunghezza delle serie bensì prende in esame l'ampiezza anulare delle serie durante particolari momenti di vita della

pianta, ovvero le fasi di ridotta crescita a causa della soppressione o di intensa competizione con le altre piante del piano dominante. A questo proposito è giusto sottolineare che si dovrebbe parlare di “soppressione” nella fase giovanile della vita di un individuo, quando cioè la pianta rimane sotto copertura; successivamente (DBH>40 cm) periodi di ridotta crescita (con incrementi radiali al di sotto della soglia di soppressione) sono più correttamente da attribuire a processi di “competizione”. La soppressione è uno dei principali fattori che contribuiscono ad aumentare la longevità di un albero nelle foreste dense (Black et al. 2008), ma la presenza di numerose fasi di soppressione/competizione è anche indicatrice di una eterogeneità strutturale che si mantiene elevata durante tutta la vita di una pianta. La storia di crescita delle piante in foreste vetuste è infatti caratterizzata da fasi multiple di soppressione e rilascio (Peters 1997) (Fig. 19). In una faggeta vetusta dei Carpazi (Ucraina), Trotsiuk et al. (2012) hanno trovato tempi di permanenza medi della rinnovazione sotto copertura pari a 65 anni, fino ad un massimo di oltre 170 anni; valori simili (165 anni) sono stati riportati da Piovesan et al. (2005b) per la faggeta vetusta della Val Cervara. Nelle foreste gestite, al contrario, le pratiche selvicolturali (es. diradamenti), riducendo i livelli di competizione, non solo riducono la frequenza media dei periodi di soppressione/competizione ma riducono anche la longevità potenziale dei grandi alberi (Di Filippo et al. 2012). In quest’ottica l’indicatore MSI può essere visto come un punto di contatto tra gli indicatori cronologici e i più tradizionali indicatori strutturali (es. distribuzione diametrica; densità dei grandi alberi; necromassa; etc...) rispetto ai quali gli indicatori cronologici devono comunque essere sempre contestualizzati. Paradossalmente, infatti, anche un popolamento con una struttura coetanea o coetaneiforme se non gestito potrebbe raggiungere età medie considerevoli (almeno prima che i processi di mortalità abbiano inizio), pur non presentando caratteristiche di eterogeneità strutturale tipiche di foreste vetuste. È inoltre importante analizzare le storie auxologiche dei popolamenti, ovvero la relazione tra incremento diametrico cumulato ed età. In questo modo è possibile osservare la struttura per coorti della foresta, individuando esemplari giovani, maturi e vetusti (Rozas 2004), ed individuare i diversi pattern di crescita che si manifestano sulle piante in presenza di strutture eterogenee (Piovesan et al. 2010).

#### Boundary lines e regimi di disturbo

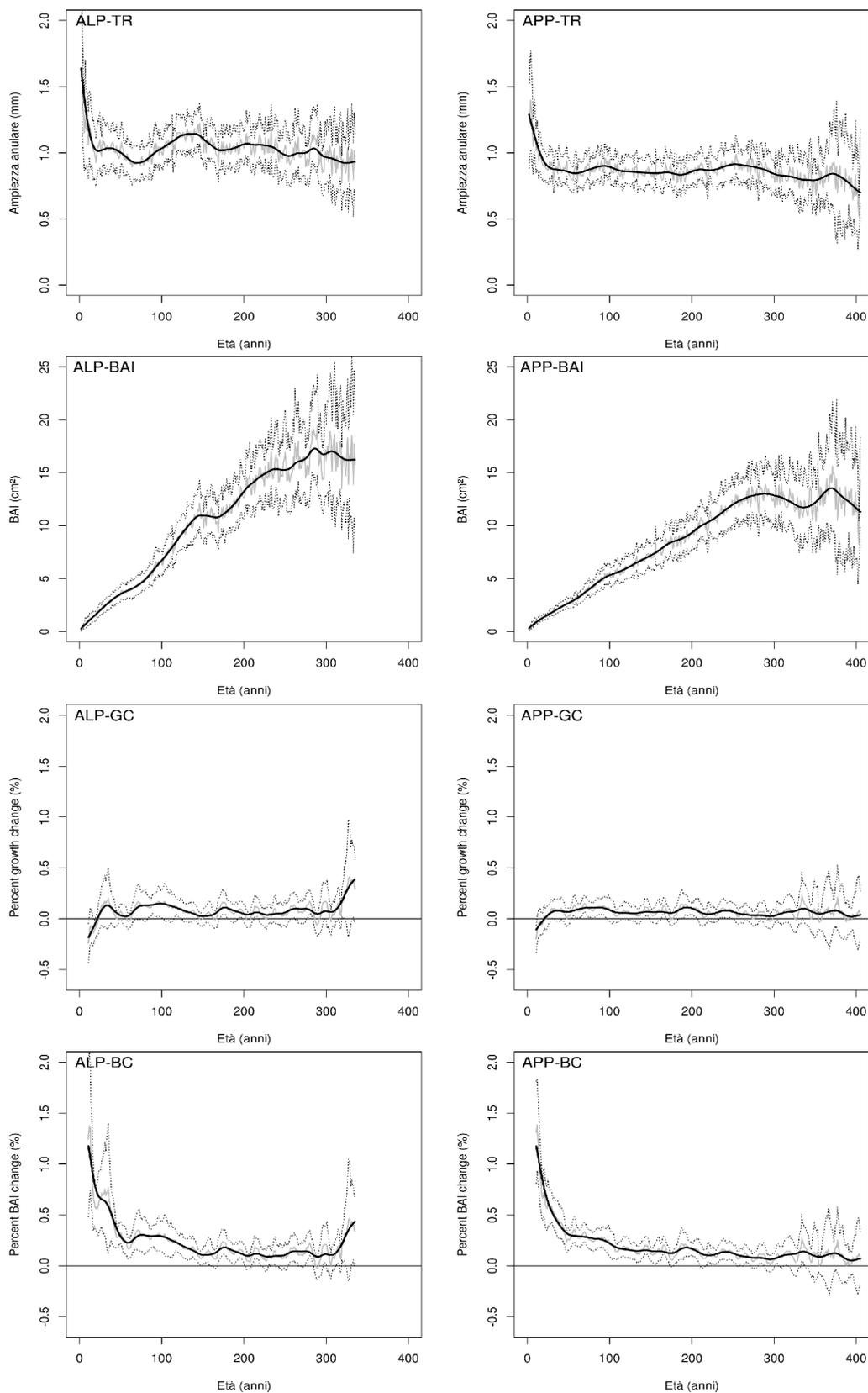
Il rapporto che lega il regime di disturbo e la presenza di popolamenti vetusti è molto forte, in quanto i disturbi ecologici possono, in base alla loro intensità, implementare o azzerare il grado di vetustà di un popolamento (Wirth et al. 2009), influenzandone le

caratteristiche cronologiche e strutturali. In ambienti boreali dove il regime di disturbo prevalente implica il periodico passaggio di eventi molto severi a scala di popolamento che rimpiazzano in un sol colpo tutta la copertura forestale (es. incendi; tempeste) (Korpilahti & Kuuluvainen 2002), si è soliti definire l'età del popolamento come “il tempo medio trascorso dall'ultimo grande disturbo in seguito al quale è stata sostituita la copertura forestale” (Garet et al. 2012). La struttura per età di una foresta non-gestita è quindi principalmente controllata dalla frequenza, la severità e la distribuzione spaziale dei disturbi che consentono l'insediamento delle nuove coorti (Turner et al. 1993). Nondimeno il regime di disturbo plasma le caratteristiche strutturali dei popolamenti forestali anche nel caso di foreste interessate da regimi di disturbo riconducibili alla cosiddetta “dinamica a buche” (*gap dynamic*), in ambiente boreale (McCarthy & Weetman 2006) ma soprattutto in contesti di foreste temperate a prevalenza di latifoglie (Piovesan et al. 2005b; Nagel et al. 2007; Šamonil et al. 2009; Kucbel et al. 2010). Ad esempio la dinamica di disturbo a buche è l'unica in grado di generare e mantenere stabili nel tempo distribuzioni diametriche di tipo “sigmoide-ruotato” (McCarthy & Weetman 2006; Kucbel et al. 2012; Trotsiuk et al., 2012), tipiche di popolamenti vetusti (Westphal et al. 2006), anche a scale spaziali < 1 ha (Alessandrini et al. 2011), producendo quindi un elevato livello di *patchiness* o mosaicatura delle coorti (Paluch 2007).

La descrizione accurata dei regimi di disturbo nelle foreste vetuste è di importanza cruciale per comprendere come le interazioni tra disturbi di diversa severità ed estensione contribuiscano a regolare il dinamismo strutturale dei popolamenti forestali (Black & Abrams 2003) e per determinare se mosaici forestali complessi possano essersi originati da processi competitivi e/o demografici piuttosto che da eventi di disturbo localizzati (Ziaco et al. 2012b). Ma l'andamento dei disturbi nel tempo svela anche la storia di utilizzazione del popolamento, in particolare evidenziando la presenza o meno di interventi selvicolturali, e quindi consentendo di valutare se vi sia stato e quanto sia stato intenso l'impatto antropico sulla foresta (Firm et al. 2009). È ben noto, infatti, che il taglio o il diradamento di un bosco producono nelle piante rimaste in piedi un brusco aumento di crescita, legato alla maggiore disponibilità di luce e nutrienti e alla ridotta competizione, che si manifesta come un rilascio radiale (e basimetrico) del tutto analogo a quello che si manifesta in conseguenza di un disturbo naturale (Wiser et al. 2005). Pertanto i patterns di disturbo assumono importanza anche come indicatori di naturalità (Peters & Poulson 1994). I dendrocronologi hanno sviluppato un gran numero di metodi per l'individuazione dei rilasci di crescita basati su diversi approcci, ognuno dei quali presenta aspetti innovativi ed altri controversi (Rubino &

McCarthy 2004). In particolare il dibattito si è focalizzato sulla soggettività dei parametri scelti per distinguere variazioni di crescita legate al clima. Tutti i metodi di individuazione dei rilasci di crescita condividono la medesima necessità di stabilire adeguati valori soglia (Fraver & White 2005) e di superare le difficoltà legate alla molteplicità di fattori che, più o meno direttamente, entrano in gioco nel definire la variabilità inter- e intra-specifica dei rilasci. L'adozione di un parametro piuttosto che un altro può portare le cronologie di disturbo ad avere sostanziali differenze nel numero, la durata e l'inizio degli eventi di rilascio, e quindi anche a diversi tempi di ritorno (Ziaco et al. 2012b). Il criterio della boundary line in questo senso rappresenta una forte innovazione nel computo dei rilasci di crescita. La boundary line infatti non solo esprime il potenziale massimo di rilascio per una pianta di una data specie, ma consente anche di scalare tale potenziale in base ai livelli di crescita precedente - sia essa radiale, come nel metodo canonico, che basimetrica, come riportato per la prima volta in questo studio - i quali sono a loro volta dipendenti dall'età e dalle dimensioni delle piante (Black & Abrams 2003; Black & Abrams 2004). Così facendo si compensano eventuali differenze specie-specifiche di risposta ai disturbi e si facilitano confronti diretti tra le cronologie di disturbo relative a specie e/o siti diversi (Black et al. 2009). Il metodo della boundary line ha dimostrato di catturare la frequenza di disturbo anche in ambienti temperati caratterizzati da regimi di disturbo a scala fine, trovando ampia applicazione in Europa centrale (Splechna et al. 2005; Nagel et al. 2007; Firm et al. 2009; Šamonil et al. 2009) e recentemente anche meridionale (Ziaco et al. 2012b). I risultati ottenuti in questo studio hanno evidenziato per le faggete vetuste altimontane la presenza di un regime di disturbo moderato, contraddistinto dal frequente passaggio di eventi di intensità prevalentemente moderata, che provocano lo schianto e la morte di una o poche piante, nel corso degli ultimi 4-5 secoli: questi patterns di disturbo sono coerenti con quelli osservati in popolamenti vetusti di faggio in Europa (Westphal et al. 2006; Motta et al. 2011) e sottolineano l'importanza della dinamica a buche per il mantenimento di popolamenti puri di faggio. Il faggio, infatti, è ben adattato al regime di disturbo a buche grazie alla sua elevata plasticità fisiologica e morfologica (Canham 1988) che permette alla rinnovazione di insediarsi anche dentro buche di piccole dimensioni, piuttosto che ad eventi a larga scala che invece tenderebbero a sincronizzare l'accesso alla chioma delle nuovi coorti e potrebbero alterare i rapporti di composizione specifica all'interno dei soprassuoli a vantaggio di specie maggiormente eliofile (Runkle 1982), potenzialmente fino al punto di innescare processi di successione nelle stazioni maggiormente esposte agli effetti dei cambiamenti climatici (Maxime & Hendrik 2011).

Nonostante le boundary lines radiali e basali siano risultate pressochè identiche, l'applicazione del metodo nelle due diverse formulazioni ha evidenziato delle differenze. Infatti se da un lato entrambi i metodi catturano i principali rilasci e concordano sulla loro datazione, dimostrando la validità di entrambi gli approcci, è stato osservato come il metodo radiale identifichi come rilasci un maggior numero di eventi nella fase giovanile delle piante. In particolare esso cattura il momento del primo rilascio, quello con cui le giovani piantine escono dallo strato dominato per accedere alla volta forestale, tendendo invece a “perdere” alcuni rilasci che si manifestano nella fase adulta della vita degli individui, una volta che i processi competitivi entrano in gioco. Viceversa l'approccio basale tende a sottostimare i rilasci giovanili, mentre risulta migliore per catturare gli episodi di disturbo che avvengono in età adulta. La boundary line di area basimetrica, quindi, registra un maggior numero di eventi, anche intensi, nel periodo finale della cronologia (XIX e XX secolo) mentre ne perde molti nella porzione più antica. L'analisi delle variazioni di crescita radiale, invece, sembra produrre cronologie di disturbo più omogenee lungo tutto il periodo considerato. Le cause di questo diverso comportamento delle due boundary lines sono da ricondurre ai trend biologici che influenzano i valori di ampiezza anulare e di BAI (Fig.20). Il *trend biologico* di crescita è generalmente definito come la graduale diminuzione delle ampiezze anulari che si verifica con l'aumentare delle dimensioni della pianta per via delle limitazioni geometriche imposte dall'aggiunta di nuovi strati di legno su una superficie in espansione (Fritts 1976). Le ampiezze anulari quindi diminuiscono con l'età delle piante, tendendo verso un limite asintotico (Cook & Peters 1997) e questo trend è generalmente maggiore nelle specie eliofile rispetto a quelle tolleranti dell'ombra (Biondi & Qeadan 2008b). Per le opposte ragioni, invece, gli incrementi di area basimetrica (BAI) presentano un trend inverso, ovvero la superficie annua prodotta aumenta con l'età e le dimensioni della pianta, fino a stabilizzarsi intorno ad un valore medio (Johnson & Abrams 2009). Le cronologie medie di ampiezza anulare e BAI sviluppate in relazione all'età delle piante (Fig. 20) mostrano in dettaglio questi andamenti; in particolare si nota come il trend decrescente di ampiezza anulare sia meno pronunciato (essendo il faggio una specie fortemente tollerante dell'ombra) rispetto al trend crescente del BAI. Il BAI infatti aumenta seguendo un trend quasi lineare fino a circa 250 anni di età, dopodichè raggiunge un plateau che è simile tra Alpi (~15 cm<sup>2</sup>/anno) e Appennini (~12 cm<sup>2</sup>/anno) a testimonianza dell'importante influenza esercitata dal bioclimate sui processi di crescita delle piante (Piovesan et al. 2005a) e sul potenziale di rilascio delle specie (Ziaco et al. 2012b). La presenza degli opposti trend nelle cronologie anulari e di BAI si ripercuote sul percent growth change (GC) e sul percent BAI change (BC).



**Fig. 20** Cronologie regionali di quattro parametri (ampiezza anulare = TR; incrementi di area basimetrica = BAI; percent growth change = GC; percent BAI change = BC) espressi in funzione dell'età delle piante, per i siti alpini (sinistra) ed appenninici (destra). I valori medi (linea grigia continua) sono riportati insieme a  $\pm 2$  errori standard (linea nera tratteggiata) ed ad una smoothing splines cubica usata per interpolare i valori medi con una frequenza di risposta del 50% a 1/2 della lunghezza della serie. Le cronologie sono state sviluppate a partire da classi di età con numerosità del campione  $\geq 10$ .

Da un lato il GC medio calcolato in funzione dell'età (Fig. 20) non mostra alcun tipo di trend, oscillando intorno ad un valore che rimane sempre mediamente positivo, tranne nei primissimi anni di vita delle piante (<30) quando per effetto del trend biologico il fattore  $M_2$  (crescita media nei 10 anni successivi; si veda la formula per il calcolo del GC nella sezione *Materiali e metodi*) risulta sempre minore di  $M_1$  (crescita media nei 10 anni precedenti) producendo quindi valori di GC negativi. Per via del trend crescente del BAI, invece, il percent BAI change si comporta in maniera esattamente opposta, quindi nella fase giovanile della pianta le variazioni del BAI sono sempre positive, e poiché  $M_2 > M_1$  il valore di BC si mantiene alto nei primi 100 anni di vita delle piante per poi stabilizzarsi intorno ad un valore medio che è comunque sempre leggermente superiore al GC. Tuttavia nel momento in cui il BC viene messo in relazione al prior BAI (PB) per sviluppare la boundary line, appare evidente come nella fase giovanile (es. i primi 100 anni di vita) a valori elevati di BC si associno valori molto piccoli di prior BAI (Fig. 20). A causa dell'andamento esponenziale negativo della boundary line, per prior BAI ridotti (es.  $PB < 5 \text{ cm}^2/\text{anno}$ ) sono necessari impulsi di BC molto grandi affinché venga riconosciuto un rilascio ( $BC > 150\sim 200\%$ ; si veda Fig.8); ne consegue che i valori elevati di BC che si registrano in piante giovani e/o di piccole dimensioni non vengono comunque individuati come rilasci dalla boundary line basimetrica. Invece oltre i 200-250 anni di età le maggiori oscillazioni dell'area basimetrica rispetto all'ampiezza anulare, associate a elevati livelli di prior BAI, fanno sì che nella parte terminale della boundary line il BAI consenta di individuare un maggior numero di rilasci rispetto a quanto non faccia l'analisi della crescita radiale (Fig. 8). Questo perché mentre con le ampiezze anulari si cercano i rilasci in base ad un parametro unidimensionale, nel caso del BAI si ha a che fare con un parametro bidimensionale (es. una superficie) (Biondi & Qeadan 2008b), che quindi presenta oscillazioni maggiori. Il BAI, inoltre, essendo maggiormente influenzato dal trend di crescita e dall'intensità dei processi competitivi risponde più rapidamente e meglio rispetto alle ampiezze anulari a variazioni delle condizioni ambientali esterne su piante dominanti (Piutti & Cescatti 1997) e pertanto consente di individuare rilasci di crescita associati a disturbi anche su piante vecchie e di grandi dimensioni, come emerso dalle cronologie di disturbo. Pochi studi hanno affrontato l'analisi dei rilasci, sia in conseguenza di disturbi naturali che di attività selvicolturali, analizzando le variazioni di area basimetrica piuttosto che la crescita radiale (Jones et al. 2009; Stan & Daniels 2010). In entrambi i casi i rilasci di BAI sono stati analizzati utilizzando un parametro analogo al percent BAI change (BC) utilizzato in questo studio, senza però che questo venisse messo in relazione alla storia di crescita recente della pianta, come invece avviene nella boundary line.

Di conseguenza avendo utilizzato le sole oscillazioni del parametro BC Jones et al. (2009) e Stan & Daniels (2010) hanno osservato un maggior numero di rilasci in termini di area basimetrica associati ad eventi di disturbo nella fase giovanile delle piante e nelle classi diametriche minori. I risultati di questo studio, invece, dimostrano l'importanza di scalare gli impulsi di rilascio, siano essi radiali o basimetrici, rispetto alla crescita precedente, come teorizzato dagli sviluppatori del metodo delle boundary lines (Black & Abrams 2003). Infatti osservazioni condotte recentemente nelle faggete di Val Cervara e Coppo del Principe (*dati non pubblicati*) hanno messo in evidenza come piante adulte ai margini di buche, anche di dimensioni medio-grandi (500-1000 m<sup>2</sup>), createsi a seguito dello schianto di più grandi individui dominanti, non mostrassero un risposta radiale al disturbo, nonostante i minori livelli di competizione e la vicinanza alle buche. Queste piante, al contrario, manifestavano una risposta in termini di area basimetrica tale da essere riconosciuta come rilascio dalla boundary line basimetrica. Queste osservazioni aprono importanti prospettive per gli studi di ecologia del disturbo. In particolare quando si cerca di ricostruire la storia del disturbo in popolamenti vetusti di specie tolleranti dell'ombra, che quindi risentono in maniera minore del trend biologico di crescita, sembra consigliabile in prima battuta studiare i rilasci utilizzando la boundary line radiale canonica, avendo però cura di campionare piante appartenenti a tutte le classi diametriche, non concentrandosi quindi solo sulle piante dominanti bensì includendo nel campione anche piante piccole, finanche sottoposte, in modo da mediare gli effetti di sotto- e sovra-stima degli episodi legati alle dimensioni degli individui. Successivamente si può applicare la boundary line di area basimetrica, limitatamente alle piante dominanti di dimensioni maggiori (es. DBH>40 cm), per affinare il dettaglio delle cronologie di disturbo, in particolare per quanto riguarda il periodo più recente (es. gli ultimi 100-150 anni). Il metodo della boundary line, infine, rispetto al metodo di Nowacki & Abrams (1997) (di cui rappresenta un'estensione) sembra essere migliore per l'identificazione dei rilasci, perchè limita l'utilizzo di parametri la cui scelta potrebbe essere influenzata da criteri soggettivi (es. durata del rilascio, soglie di rilascio etc...), e standardizza i risultati rispetto alla crescita precedente (Black & Abrams 2003).

#### Effetti delle dimensioni e dell'età delle piante sulla risposta al disturbo

La caratterizzazione degli eventi di rilascio basata sulla risposta delle piante al disturbo in funzione delle loro dimensioni ed età ha evidenziato come il faggio sia in grado di manifestare incrementi di crescita, sia radiali che basimetrici, in conseguenza di un disturbo

fino a grandi dimensioni ed età considerevoli. Coerentemente con quanto detto in precedenza le soglie diametriche e cronologiche oltre le quali diminuisce significativamente il numero di rilasci sono maggiori nei rilasci di area basimetrica rispetto a quelli radiali. Considerando che la massima longevità riscontrata per il faggio è 560 anni (Ziaco et al. 2012a), le soglie di rilascio di BAI – identificate come il 90° percentile della distribuzione delle età in cui le piante hanno rilasciato – coprono all'incirca il 57% (320 anni; Alpi) e il 62% (347 anni; Appennini) del massimo potenziale di longevità della specie. La presenza di rilasci di area basimetrica fino a 400 anni sulle Alpi ed oltre 550 anni sugli Appennini (Fig. 13) dimostra come le soglie di età indicate possano in realtà essere sottostimate a causa del ridotto campione di individui > 500 anni. Black et al. (2009), confrontando la boundary line con coppie di osservazioni PG/GC in popolamenti vetusti di *Tsuga canadensis*, specie dal temperamento sciafilo affine a quello del faggio, riportano soglie dimensionali e cronologiche oltre cui le piante smettono di rilasciare pari a 70 cm di diametro e 350 anni d'età. Gli stessi Autori evidenziano come l'andamento delle variazioni percentuali di crescita in funzione dell'età e delle dimensioni sia fortemente condizionato dall'ecologia delle specie: specie esigenti di luce mostrano un rapissimo calo della capacità di rilascio (già a 50 anni e 30 cm di diametro in *Quercus stellata*; 100 anni e 20 cm di diametro in *Quercus macrocarpa*) laddove quelle tolleranti dell'ombra la mantengono molto più a lungo (Black et al. 2009). Studiando gli effetti di un taglio per piccoli gruppi sulla crescita in popolamenti di *Nothofagus menziesii* (Hook. F.) Oerst. della Nuova Zelanda si è visto come le piante abbiano manifestato una risposta di crescita fino ad oltre 450 anni (Wiser et al. 2005).

#### Influenza del clima sui regimi di disturbo

L'analisi delle variazioni percentuali di crescita radiale e basimetrica sulle serie dendrocronologiche ha consentito, attraverso la boundary line, di ricostruire i disturbi registrati da singole piante, per poi sviluppare cronologie di disturbo stazionali raggruppando gli eventi in periodi di tempo discreti (es. semi-decadi) (Fig. 9-10-11). Ne è emersa una generale prevalenza di disturbi a scala fine, di intensità moderata ed alta frequenza, come riportato per altre faggete vetuste in Europa (Westphal et al. 2006). Recentemente, tuttavia, un numero sempre maggiore di studi hanno ipotizzato che sporadici eventi intensi a larga scala (es. tempeste di vento) possano svolgere un ruolo più importante di quanto non si pensasse in precedenza nel regolare i regimi di disturbo di foreste temperate decidue (Nagel & Diaci 2006; Nagel et al. 2007; Nagel & Svoboda 2008; Kucbel et al. 2010; Piovesan et al. 2010;

Ziaco et al. 2012b; Trotsiuk et al. 2012). Questi eventi generano buche di grandi dimensioni (fino a 0.40 ha), e possono causare lo schianto anche di alcune decine di piante (Dröβer & von Lupke 2005); Nagel & Svoboda (2008) hanno inoltre osservato in foreste vetuste di faggio della Bosnia come buche di dimensioni intermedie tendano, nel 70% dei casi, ad allargarsi gradualmente nel tempo, in quanto le piante ai margini delle grandi buche si ritrovano maggiormente esposte agli agenti di disturbo atmosferici, in particolare il vento. Il regime di disturbo in popolamenti montani e altimontani dell'Europa centrale e meridionale è stato tradizionalmente pensato essere guidato da processi di mortalità endogeni (es. processi densità-dipendenti), anche in popolamenti maturi o vetusti (Leibundgut 1987; Korpel 1995). La presenza di picchi di disturbo su larga scala riscontrata in questo studio (in particolare nei siti appenninici) come nei lavori suddetti, e la sincronicità di tali eventi sia all'interno dei popolamenti che tra i popolamenti, smentisce in parte la tradizionale visione del disturbo in ambiente temperato, evidenziando invece una componente climatica nella frequenza temporale dei disturbi, in particolare quelli di maggiore severità. Periodi di elevato disturbo, testimoniati da numerosi rilasci ed elevati valori medi di GC, sono risultati sorprendentemente comuni alle faggete italiane e spagnole (Rozas 2001), ad esempio nel quinquennio 1828-1832 (sugli Appennini; Fig.15) o nel periodo 1840-1847 (sulle Alpi). Come dimostrato dalle analisi wavelet e crosswavelet questi periodici eventi a scala regionale sono connessi al passaggio di aree cicloniche di origine Atlantica sul Mediterraneo, in particolare di quelle accompagnate da forti venti di superficie e abbondanti precipitazioni (Nissen et al. 2010). Voskresenskaya & Maslova (2011) hanno evidenziato una correlazione tra le oscillazioni degli indici AMO e NAO e le caratteristiche dei cicloni atlantici (frequenza, intensità ed estensione) in transito sull'area del Mediterraneo e del Mar Nero; in particolare fasi di AMO positivo spingono i cicloni a transitare maggiormente a sud, sul Mediterraneo (correlazione positiva), situazione analoga a quanto si verifica durante fasi di NAO negativo (correlazione inversa). Il principale meccanismo con cui l'indice AMO influenza il clima delle regioni adiacenti l'Atlantico settentrionale è legato alla risposta atmosferica alle anomalie termiche di temperatura sulla superficie dell'oceano che alterano le direzioni di propagazione delle aree cicloniche ed anticicloniche (Polonskii 2008); il NAO invece influenza l'intensità e l'estensione delle aree cicloniche, in particolare nel Mediterraneo occidentale (Voskresenskaya & Maslova 2011). Ulteriori disturbi di natura climatica (es. gelicidi causati da venti freddi dal nord) potrebbero essere legati ad altri pattern climatici quali ad esempio l'*East Atlantic – West Russian pattern (EAWR)*, in particolare sull'arco alpino e nelle stazioni esposte a settentrione (es. Val Cervara; Coppo del Principe) (Nissen et al. 2010). I numerosi disturbi presenti nelle

cronologie alpine ed appenniniche nella seconda metà del 1700 potrebbero invece essere stati generati dalla cosiddetta anomalia Maldá, un periodo di considerevoli variazioni nei centri d'azione atmosferica (in particolare nel periodo 1780-1795) che hanno dato luogo nel Mediterraneo occidentale a repentini episodi di siccità e violente precipitazioni, come non si è più verificato nel XIX e XX secolo (Barriendos & Llasat 2003). In ogni caso il passaggio dei cicloni e delle perturbazioni ad essi associati sull'Europa meridionale, in particolare se accompagnati da forti venti, genera le condizioni ideali affinché si verifichino schianti all'interno dei popolamenti forestali, in particolare laddove vi sono alberi annosi e deperienti. Inoltre la maggiore disponibilità idrica e le temperature più fresche generate dal passaggio delle perturbazioni, associate ai maggiori livelli di luce disponibili per le piante rimaste in piedi, creano le condizioni favorevoli per indurre le piante ai margini delle buche a manifestare un rilascio di crescita ancora più sostenuto. Quindi per il faggio, che ha nella penisola italiana il limite meridionale del proprio areale, i rilasci ecologici (legati ai disturbi) e i rilasci climatici sono in qualche modo connessi, in quanto durante le fasi climatiche “positive” per la crescita (es. AMO positivo/NAO negativo) si hanno anche le condizioni migliori perché avvengano i disturbi (maggiori perturbazioni) ed inoltre condizioni migliori perché le piante rimaste possano manifestarsi incrementi di crescita sostanziali (maggiore umidità). Il segnale della North Atlantic Oscillation (NAO) nelle ampiezza anulari del faggio era stato individuato anche da precedenti studi (Piovesan & Schirone 2000), in cui era emerso come tale segnale, pur di natura climatica, emergesse maggiormente nelle serie dendrocronologiche non-standardizzate, quindi quelle in cui era mantenuta la componente legata ai disturbi endogeni ed esogeni (Cook & Kairiukstis 1990). Il rapporto causa-effetto emerso da questo studio tra la frequenza dei disturbi e le risposte di crescita delle piante, sia in termini radiali che basimetrici, contribuisce quindi a spiegare il meccanismo di azione dei grandi pattern climatici atlantici sulle faggete italiane, in particolare nell'Appennino. Sulle Alpi, al contrario, le caratteristiche dei regimi di disturbo potrebbero essere il risultato dell'interazione complessa di più pattern climatici, quali ad esempio il già menzionato *East Atlantic – West Russian Index* o lo *Scandinavian (SCAND) Index* (Nissen et al. 2010). Ciò che è sicuro è la presenza di una componente climatica anche nei siti alpini, nonostante sia difficile individuarne i principali drivers: ad esempio il gran numero di rilasci individuati nei 3 siti austriaci nel 1996 in termini radiali (16, tutti moderati) ma soprattutto in termini di area basimetrica (26 rilasci, di cui 12 intensi), sono senz'altro da ricondurre ad un evento climatico che abbia avuto una certa rilevanza quantomeno a livello locale. Analizzando i dati storici disponibili in letteratura non è emerso nessun evento di particolare rilevanza registrato in

quell'anno: l'unica ipotesi al momento potrebbe essere legata agli strascichi dell'uragano Iris, la cui coda ha colpito l'Europa occidentale nel settembre 1995 (Hickey 2011) e che quindi avrebbe potuto generare schianti i cui effetti sulle piante si sono manifestati nella successiva stagione vegetativa.

## Conclusioni

I risultati di questa ricerca hanno consentito di approfondire tre principali aspetti legati alle caratteristiche strutturali di popolamenti vetusti e all'ecologia del disturbo delle faggete vetuste altimontane, i popolamenti forestali con il maggiore livello di naturalità presenti nel nostro Paese. In primo luogo si è contribuito a migliorare la qualità degli indicatori di vetustà dei popolamenti forestali, sviluppando degli indicatori cronologici, basati quindi sull'analisi della distribuzione delle età all'interno della copertura forestale. Ciò ha permesso di colmare parzialmente un gap conoscitivo nell'ambito del monitoraggio forestale, creando le basi per l'applicazione di nuovi indicatori che consentano una facile individuazione di strutture forestali caratterizzate da elevata naturalità. Tali indicatori hanno dimostrato di essere integrabili con i più tradizionali indicatori strutturali (es. distribuzioni diametriche; necromassa; etc.), rispetto ai quali hanno fornito risultati assolutamente coerenti e comparabili. In secondo luogo è stato applicato un metodo per la ricostruzione dei regimi di disturbo (le *boundary lines*) che aveva avuto finora ampia diffusione in ambienti boreali e/o temperati dell'Europa centrale, ma nessuna applicazione in ambiente mediterraneo. È stato possibile quindi caratterizzare le dinamiche di disturbo prevalenti che influenzano il dinamismo strutturale delle faggete altimontane distribuite lungo l'arco appenninico fino alle Alpi orientali. È stata confermata la presenza di un regime di disturbo caratterizzato da episodi frequenti e di bassa severità che sottolinea l'importanza della dinamica “a buche” come driver fondamentale dei processi di rinnovamento strutturale in ambiente temperato. In relazione a quanto detto circa gli indicatori di vetustà, inoltre, le cronologie di disturbo valide in alcuni casi per oltre 400 anni hanno confermato l'assenza di disturbi antropici su larga scala nella maggior parte dei popolamenti studiati, in particolare nei siti dell'Appennino centrale, confermando l'elevato grado di naturalità di queste foreste, tra le più vecchie dell'interno emisfero boreale. Attraverso una analisi quali-quantitativa sono state inoltre definite delle soglie dimensionali e di età oltre le quali le piante cessano di rispondere agli eventi di disturbo (quantomeno da un punto di vista della crescita, mentre meriterebbero ulteriori studi le risposte al disturbo in termini fisiologici e biochimici). Gli elevati valori soglia sia in termini

dimensionali che cronologici dimostrano come anche gli esemplari di maggiori dimensioni e gli esemplari più vecchi (distinguendo attentamente le due categorie, in considerazione del fatto che come si è visto dimensioni ed età non vanno di pari passo in foreste vetuste) siano capaci di reagire agli stimoli esterni e di rispondere alle mutate condizioni ambientali: ciò conferma che le foreste vetuste sono tutt'altro che comunità “moribonde” o inerti, come purtroppo troppo spesso si è voluto far credere, al solo scopo di mascherare ben altri interessi di natura economica. Il terzo e forse più significativo risultato è stato infine dimostrare il legame tra il regime di disturbo nei popolamenti forestali in ambiente mediterraneo-montano e i pattern climatici di origine atlantica (es. Indice AMO, Indice NAO), i cui effetti sulle dinamiche forestali, in particolare nel nostro Paese, erano stati da tempo ipotizzati in linea teorica ma non ancora quantificati materialmente.

## Bibliografia

1. Aldrich E (2012). *wavelets: A package of functions for computing wavelet filters, wavelet transforms and multiresolution analyses*. R package version 0.2-9. <http://CRAN.R-project.org/package=wavelets>
2. Aniol RW (1983). *Tree-ring analysis using CATRAS*. **Dendrochronologia** 1: 45-53
3. Aniol RW (1987). *A new device for Computer Assisted Measurement of Tree-Ring Widths*. **Dendrochronologia** 5:135-141
4. Alessandrini A, Biondi F, Di Filippo A, Ziaco E, Piovesan G (2011). *Tree size distribution at increasing spatial scales converges to the rotated sigmoid curve in two old-growth beech stands of the Italian Apennines*. **Forest Ecology and Management** 262:1950–1962
5. Arabas KB, Black B, Lentile L, Speer J, Sparks J (2008). *Disturbance history of a mixed conifer stand in Central Idaho, USA*. **Tree-Ring Research** 64:67–80
6. Barriendos M & Llasat C (2003). *The case of the ‘Maldá’ anomaly in the western Mediterranean basin (AD 1760–1800): an example of a strong climatic variability*. **Climatic Change** 61:191–216
7. Bauhus J, Puettmann K, Messier C (2009). *Silviculture for old-growth attributes*. **Forest Ecology and Management** 258:525–537
8. Bengtsson J, Nilsson SG, Franc A, Menozzi P (2000). *Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests*. **Forest Ecology and Management** 132: 39–50
9. Biondi F (1993). *Climatic signals in tree-rings of *Fagus sylvatica* L. from the central Apennines, Italy*. **Acta Oecologica** 14:57–71
10. Biondi F. & Visani S. (1996). *Recent development in the analysis of an Italian tree-ring network with emphasis on European beech (*Fagus sylvatica* L.)*. In: Dean JS, Meko DM, Swetnam TW (eds.). *Tree rings, environment and humanity*. **Radiocarbon**: 713–725
11. Biondi F (1999). *Comparing tree-ring chronologies and repeated timber inventories as forest monitoring tools*. **Ecological Applications** 9:216–227
12. Biondi F & Qeadan F (2008a). *Inequality in Paleorecords*. **Ecology** 89:1056–1067
13. Biondi F & Qeadan F (2008b). *A theory-driven approach to tree-ring standardization: defining the biological trend from expected basal area increment*. **Tree-Ring Research** 64:81–96

14. Black BA & Abrams MD (2003). *Use of boundary-line growth patterns as a basis for dendroecological release criteria*. **Ecological Applications** 13:1733–1749
15. Black BA & Abrams MD (2004). *Development and application of boundary-line release criteria*. **Dendrochronologia** 22:31–42
16. Black BA, Colbert JJ, Pederson N (2008). *Relationships between radial growth rates and lifespan within North American tree species*. **Ecoscience** 15:349–357
17. Black BA, Abrams MD, Rentch JS, Gould PJ (2009). *Properties of boundary-line release criteria in North American tree species*. **Annals of Forest Science** 66:205  
<http://dx.doi.org/10.1051/forest/2008087>.
18. Blasi C, Marchetti M, Chiavetta U, Aleffi M, Audisio P, Azzella MM, Brunialti G, Capotorti G, Del Vico E, Lattanzi E, Persiani AM, Ravera S, Tilia A, Burrascano S (2010). *Multitaxon and forest structure sampling for identification of indicators and monitoring of old-growth forest*. **Plant Biosystems** 144:160–170
19. Briffa KR, Jones PD, Bartholin TS, Eckstein D, Schweingruber FH, Karlén W, Zetterberg P (1992). *Fennoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales*. **Climate Dynamics** 7:111–119
20. Bunn AG (2010). *Statistical and visual crossdating in R using the dplR library*. **Dendrochronologia** 28:251–258
21. Bunn AG, Korpela M, Biondi F, Campelo F, Mérian P, Qeadan F, Zang C (2012). *dplR: Dendrochronology Program Library in R*. R Package Version 1.5.5  
<http://CRAN.R-project.org/package=dplR>.
22. Canham CD (1988). *Growth and canopy architecture of shade-tolerant trees: response to canopy gaps*. **Ecology** 69:786–795
23. Canham CD (1990). *Suppression and release during canopy recruitment in *Fagus grandifolia**. **Bulletin of the Torrey Botanical Club** 117:1–7
24. Cook ER & Kairiukstis LA (1990). *Methods of dendrochronology - Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers.
25. Cook ER & Peters K (1997). *Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change*. **The Holocene** 7:361–370
26. Cook ER, D'Arrigo RD, Mann ME (2002). *A Well-Verified, Multiproxy Reconstruction of the Winter North Atlantic Oscillation Index since A.D. 1400*. **Journal of Climate** 15:1754–1764  
([ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/treering/reconstructions/nao\\_cook2002.txt](ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/treering/reconstructions/nao_cook2002.txt))

27. Copenheaver CA, Black BA, Stine MB, McManamay RH, Bartens J (2009). *Identifying dendroecological growth releases in American beech, jack pine, and white oak: within-tree sampling strategy*. **Forest Ecology and Management** 257:2235–2240
28. Corona P, Blasi C, Chirici G, Facioni L, Fattorini L, Ferrari B (2010). *Monitoring and assessing old-growth forest stands by plot sampling*. **Plant Biosystems** 144:171–179
29. D’Amato AW, Orwig DA, Foster DR (2008). *The influence of successional processes and disturbance on the structure of Tsuga canadensis forests*. **Ecological Applications** 18:1182–1199
30. Di Filippo A, Piovesan G, Schirone B (2004). *La dendroecologia applicata alle foreste vetuste: il caso delle faggete italiane*. In: Casagrandi R & Melià P (eds). **Atti del XIII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia**, pp. 49-54. Aracne, Roma.
31. Di Filippo A, Biondi F, Cufar K, De Luis M, Grabner M, Maugeri M, Presutti Saba E, Schirone B, Piovesan G (2007). *Bioclimatology of beech (Fagus sylvatica L.) in the Eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network*. **Journal of Biogeography** 34:1873–1892
32. Di Filippo A & Piovesan G (2010). *Le foreste vetuste in Italia: dagli attributi strutturali ai processi ecologici in una rete di faggete vetuste*. In: *Restauro della foresta mediterranea*. Roberto Mercurio. p. 63-77, BOLOGNA:Clueb, ISBN: 978-88-491-3399-8
33. Di Filippo A, Biondi F, Maugeri M, Schirone B, Piovesan G (2012). *Bioclimate and growth history affect beech lifespan in the Italian Alps and Apennines*. **Global Change Biology** 18:960–972
34. Dröbber L & von Lupke B (2005). *Canopy gaps in two virgin beech forest reserves in Slovakia*. **Journal of Forest Science** 51:446–457
35. Emborg J, Christensen M, Heilmann-Clausen J (2000). *The structural dynamics of Suserup Skov, a near-natural temperate deciduous forest in Denmark*. **Forest Ecology and Management** 126:173–189
36. Enfield DB, Mestas-Nuñez AM, Trimble PJ (2001). *The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S.* **Geophysical Research Letters** 28:2077–2080

37. Firm D, Nagel TA, Diaci J (2009). *Disturbance history and dynamics of an old-growth mixed species mountain forest in the Slovenian Alps*. **Forest Ecology and Management** 257:1893–1901
38. Franklin JF, Spies TA, Van Pelt R, Carey AB, Thornburgh DA, Berg DR, Lindenmayer DB, Harmon ME, Keeton WS, Shaw DC, Bible K, Chen J (2002). *Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example*. **Forest Ecology and Management** 155:399–423
39. Fraver S & White AS (2005). *Identifying growth releases in dendrochronological studies of forest disturbance*. **Canadian Journal of Forest Research** 35:1648–1656
40. Frelich LE (2002). *Forest dynamics and disturbance regimes: studies from temperate evergreen-deciduous forests*. Cambridge University Press, Cambridge.
41. Frelich LE & Reich PB (2003). *Perspectives on development of definitions and values related to old-growth forests*. **Environmental Reviews** 11:S9–S22
42. Fritts HC (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London.
43. Führer E (2000). *Forest functions, ecosystem stability and management*. **Forest Ecology and Management** 132:29–38
44. Garet J, Raulier F, Pothier Z, Cumming SG (2012). *Forest age class structures as indicators of sustainability in boreal forest: Are we measuring them correctly?* **Ecological Indicators** 23:202–210
45. Gilg O (2004). *Forêts à caractère naturel: caractéristiques, conservation et suivi*. Cahiers Techniques de l'ATEN: 74. ATEN, Montpellier, 96pp
46. Gouhier TC & Grinsted A (2013). *biwavelet: Conduct univariate and bivariate wavelet analyses*. R package version 0.13. <http://CRAN.R-project.org/package=biwavelet>
47. Gray ST, Graumlich LJ, Betancourt JL, Pederson GT (2004). *A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 A.D.* **Geophysical Research Letters** 31:L12205, doi:10.1029/2004GL019932.
48. Grinsted A, Moore JC, Jevrejeva S (2004). *Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series*. **Nonlinear Processes in Geophysics** 11:561–566
49. Grudd H, Briffa KR, Karlén W, Bartholin TS, Jones PD, Kromer B (2002). *A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales*. **The Holocene** 12:657–665

50. Henry JD & Swan JMA (1974). *Reconstructing forest history from live and dead plant material - An approach to the study of forest succession in southwest New Hampshire*. **Ecology** 55: 772–783
51. Hickey K (2011). *The Impact of Hurricanes on the Weather of Western Europe*. In: Lupo A (ed.). *Recent Hurricane Research - Climate, Dynamics, and Societal Impacts*. ISBN: 978-953-307-238-8, InTech.
52. Hurrell JW (1995). *Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation*. **Science** 269:676–679.  
([http://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/cas\\_data\\_files/asphilli/nao\\_station\\_monthly\\_2.txt](http://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/cas_data_files/asphilli/nao_station_monthly_2.txt))
53. Jones TA, Domke GA, Thomas SC (2009). *Canopy tree growth responses following selection harvest in seven species varying in shade tolerance*. **Canadian Journal of Forest Research** 39:430–440
54. Jump AS, Cavin L, Hunter P (2010). *Monitoring and managing responses to climate change at the retreating range edge of forest trees*. **Journal of Environmental Monitoring** 12:1791–1798
55. Kaplan A, Cane MA, Kushnir Y, Clement AC, Blumenthal MB, Rajagopala B (1998). *Analyses of global sea surface temperature 1856–1991*. **Journal of Geophysical Research** 103:18567–18589  
(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.sm.long.data>)
56. Keddy PA & Drummond CG (1996). *Ecological properties for the evaluation, management, and restoration of temperate deciduous forest ecosystems*. **Ecological Applications** 6:748–762
57. Kneeshaw DD, Burton PJ (1998). *Assessment of functional old-growth status: a case study in the sub-boreal spruce zone of British Columbia, Canada*. **Natural Areas Journal** 18:293–308
58. Korpel S (1995). *Die Urwälder der Westkarpaten*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Germany.
59. Korpilahti E & Kuuluvainen T (eds.) (2002). *Disturbance Dynamics in Boreal Forests: Defining the Ecological Basis of Restoration and Management of Biodiversity*. *Silva Fennica* 36(1). The Finnish Society of Forest Science & The Finnish Forest Research Institute.

60. Kucbel S, Jaloviar P, Saniga M, Vencurik J, Klimaš V (2010). *Canopy gaps in an old-growth fir-beech forest remnant of Western Carpathians*. **European Journal of Forest Research** 129:249–259
61. Kucbel S, Saniga M, Jaloviar P, Vencurik J (2012). *Stand structure and temporal variability in old-growth beech-dominated forests of the northwestern Carpathians: A 40-years perspective*. **Forest Ecology and Management** 264:125–133
62. Leibundgut H (1987). *Europäische Urwälder der Bergstufe*. Haupt, Bern, Switzerland.
63. Liira J & Kohv K (2010). *Stand characteristics and biodiversity indicators along the productivity gradient in boreal forests: defining a critical set of indicators for the monitoring of habitat nature quality*. **Plant Biosystems** 144:211–220
64. Lindroth A, Lagergren F, Grelle A, Klemedtsson L, Langvall O, Weslien P, Tuulik J (2009). *Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink*. **Global Change Biology** 15:346–355
65. Loehle C (1988). *Tree life history strategies: the role of defenses*. **Canadian Journal of Forest Research** 18:209–222
66. Lorimer CG, Frelich LE, Nordheim EV (1988). *Estimating gap origin probabilities for canopy trees*. **Ecology** 69:778–785
67. Lorimer CG & Frelich LE (1989). *A methodology for estimating canopy disturbance frequency and intensity in dense temperate forests*. **Canadian Journal of Forest Research** 19: 651–663
68. Maes WH, Fontaine M, Rongé K, Hermy M, Muys B (2011). *A quantitative indicator framework for stand level evaluation and monitoring of environmentally sustainable forest management*. **Ecological Indicators** 11:468–479
69. Marchetti M, Tognetti R, Lombardi F, Chiavetta U, Palumbo G, Sellitto M, Colombo C, Iovieno P, Alfani A, Baldantoni D, Barbati A, Ferrari B, Bonacquisti S, Capotorti G, Copiz R, Blasi C (2010). *Ecological portrayal of old-growth forests and persistent woodlands in the Cilento and Vallo di Diano National Park (southern Italy)*. **Plant Biosystems** 144:130–147
70. Maxime C & Hendrik D (2011). *Effects of climate on diameter growth of co-occurring *Fagus sylvatica* and *Abies alba* along an altitudinal gradient*. **Trees** 25:265–276
71. McCarthy JW & Weetman G (2006). *Age and size structure of gap-dynamic, old-growth boreal forest stands in Newfoundland*. **Silva Fennica** 40: 209–230

72. Motta R, Maunaga Z, Berretti R, Castagneri D, Lingua E, Meloni F (2008). *La riserva forestale di Lom (Repubblica di Bosnia Erzegovina): descrizione, caratteristiche, struttura di un popolamento vetusto e confronto con popolamenti stramaturi delle Alpi italiane*. **Forest@** 5: 100–111 [online: 2008-03-27] URL: <http://www.sisef.it/forest@/>.
73. Motta R, Berretti R, Castagneri D, Dukić V, Garbarino M, Govedar Z, Lingua E, Maunaga Z, Meloni F (2011). *Toward a definition of the range of variability of central European mixed Fagus–Abies–Picea forests: the nearly steady-state forest of Lom (Bosnia and Herzegovina)*. **Canadian Journal of Forest Research** 41:1871–1884
74. Nagel TA & Diaci J (2006). *Intermediate wind disturbance in an old-growth beech–fir forest in southeastern Slovenia*. **Canadian Journal of Forest Research** 36:629–638
75. Nagel TA, Levanic T, Diaci J (2007). *A dendroecological reconstruction of disturbance in an old-growth Fagus-Abies forest in Slovenia*. **Annals of Forest Sciences** 64:891–897
76. Nagel TA & Svoboda M (2008). *Gap disturbance regime in an old-growth Fagus–Abies forest in the Dinaric Mountains, Bosnia-Herzegovina*. **Canadian Journal of Forest Research** 38:2728–2737
77. Nilsson SG, Niklasson M, Hedin J, Aronsson G, Gutowski JM, Linder P, Ljungberg H, Mikusinski G, Ranius T (2003). *Densities of large and dead trees in old-growth temperate and boreal forests*. **Forest Ecology and Management** 161: 189–204
78. Nissen KM, Leckebusch GC, Pinto JG, Renggli D, Ulbrich S, Ulbrich U (2010). *Cyclones causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns*. **Natural Hazards and Earth System Sciences** 10:1379–1391
79. Norton DA, Palmer JG, Ogden J (1987). *Dendroecological studies in New Zealand. An evaluation of age estimates based on increment cores*. **New Zealand Journal of Botany** 25:373–383
80. Nowacki GJ & Abrams MD (1997). *Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement origin oaks*. **Ecological Monographs** 67:225–249
81. Oldemann RAA (1990). *Forest: Elements of Silvology*. Springer, Verlag New York, Berlin Heidelberg, 624 pp

82. Paluch JG (2007). *The spatial pattern of a natural European beech (Fagus sylvatica L.)–silver fir (Abies alba Mill.) forest: A patch-mosaic perspective*. **Forest Ecology and Management** 253:161–170
83. Peters R (1992). *Ecology of beech forests in the Northern Hemisphere*. Landbouwniversiteit Wageningen, 125 pp.
84. Peters R (1997). *Beech Forests*. Geobotany 24. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
85. Peters R & Poulson TL (1994). *Stem growth and canopy dynamics in a world-wide range of Fagus forests*. **Journal of Vegetation Science** 5:421–432
86. Pickett STA & White PS (1985). *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press.
87. Pignatti S. (1998). *Boschi d'Italia*. UTET, Torino
88. 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
89. 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
90. 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** 10:13–28
91. Piovesan G, Biondi F, Di Filippo A, Alessandrini A, Maugeri M (2008). *Drought-driven growth reduction in old beech (Fagus sylvatica L.) forests of the central Apennines, Italy*. **Global Change Biology** 14:1265–1281
92. Piovesan G, Alessandrini A, Baliva M, Chiti T, D'Andrea E, De Cinti B, Di Filippo A, Hermanin L, Lauteri M, Scarascia Mugnozza G, Schirone B, Ziaco E, Matteucci G (2010). *Structural patterns, growth processes, carbon stocks in an Italian network of old-growth beech forests*. **L' Italia Forestale e Montana** 65:557–590
93. Piovesan G, Alessandrini A, Biondi F, Di Filippo A, Schirone B, Ziaco E (2011). *Bioclimatology, growth processes, longevity and structural attributes in an Italian network of old-growth beech forests spreading from the Alps to the Apennines*. In: Knapp HD, Fichtner A (Eds.). *Beech Forests – Joint Natural Heritage of Europe*, BfN-Skripten n. 297, Bonn-Bad Godesberg, Bonn, Germany, pp. 173–192

94. Piutti E & Cescatti A (1997). *A quantitative analysis of the interactions between climatic response and intraspecific competition in European beech*. **Canadian Journal of Forest Research** 27:277–284
95. Polonskii AB (2008). *Atlantic Multidecadal Oscillation and its manifestations in the Atlantic–European region*. **Physical Oceanography** 18: 227–236
96. R Core Team (2012). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
97. 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*. **Annals of Forest Science** 58:237–251
98. Rozas V (2003). *Tree age estimates in *Fagus sylvatica* and *Quercus robur*: testing previous and improved methods*. **Plant Ecology** 167:193–212
99. Rozas V (2004). *A dendroecological reconstruction of age structure and past management in an old-growth pollarded parkland in northern Spain*. **Forest Ecology and Management** 195:205–219
100. Rubino DL & McCarthy BC (2004). *Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events*. **Dendrochronologia** 21:97–115
101. Runkle JR (1982). *Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America*. **Ecology** 63:1533–1546
102. Schirone B, Piovesan G, Romagnoli M, Bernabei M, Lo Monaco A (2003). *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.
103. Schlesinger ME & Ramankutty N (1994). *An oscillation in the global climate system of period 65–70 years*. **Nature** 367:723–726
104. Schlyter P, Stjernquist I, Barring L, Jönsson AM, Nilsson C (2006). *Assessment of the impacts of climate change and weather extremes on boreal forests in northern Europe, focusing on Norway spruce*. **Climate Research** 31:75–84
105. Schnitzler A & Borlea F (1998). *Lessons from natural forests as keys for sustainable management and improvement of naturalness in managed broadleaved forests*. **Forest Ecology and Management** 109:293–303

106. Splechtna BE, Gratzer G, Black BA (2005). *Disturbance history of a European old-growth mixed-species forest – a spatial dendro-ecological analysis*. **Journal of Vegetation Science** 16:511–522.
107. Stan AB & Daniels LD (2010). *Growth releases of three shade-tolerant species following canopy gap formation in old-growth forests*. **Journal of Vegetation Science** 21:74–87
108. Stokes MA & Smiley TL (1996). *An introduction to tree-ring dating*. University of Arizona Press, Tucson.
109. Swetnam TW, Allen CD, Betancourt JL (1999). *Applied historical ecology: using the past to manage for the future*. **Ecological Applications** 9:1189–1206
110. Šamonil P, Antolík L, Svoboda M, Adam D (2009). *Dynamics of windthrow events in a natural fir-beech forest in the Carpathian mountains*. **Forest Ecology and Management** 257:1148–1156
111. Thompson RD, Daniels LD, Lewis KJ (2007). *A new dendroecological method to differentiate growth responses to fine-scale disturbance from regional-scale environmental variation*. **Canadian Journal of Forest Research** 37:1034–1043
112. Torrence C & Compo GP (1998). *A practical guide to wavelet analysis*. **Bulletin of the American Meteorological Society** 79:61–78
113. Trewartha GT (1968). *An introduction to climate*. McGraw-Hill, New York.
114. Trotsiuk V, Hobi ML, Commarmot B (2012). *Age structure and disturbance dynamics of the relic virgin beech forest Uholka (Ukrainian Carpathians)*. **Forest Ecology and Management** 265:181–190
115. Trouet V, Esper J, Graham NE, Baker A, Scourse JD, Frank DC (2009). *Persistent positive North Atlantic Oscillation mode dominated the Medieval Climate Anomaly*. **Science** 324:78–80
116. Turner MG, Romme WH, Gardner RH, O'Neill RV, Kratz TK (1993). *A revised concept of landscape equilibrium: disturbance and stability on scaled landscapes*. **Landscape Ecology** 8:213–227
117. Turner MG (2010). *Disturbance and landscape dynamics in a changing world*. **Ecology** 91:2833–2849
118. Vaillancourt MA, Drapeau P, Gauthier S, Robert M (2008). *Availability of standing trees for large cavity-nesting birds in the eastern boreal forest of Québec, Canada*. **Forest Ecology and Management** 255: 2272–2285

119. Vandekerckhove K, De Keersmaecker L, Baeté H, Walley R (2005). *Spontaneous re-establishment of natural structure and related biodiversity in a previously managed beech forest in Belgium after 20 years of non intervention*. **Forest Snow and Landscape Research** 79: 145–146.
120. Voskresenskaya EN & Maslova VN (2011). *Winter-spring cyclonic variability in the Mediterranean-Black Sea region associated with global processes in the ocean-atmosphere system*. **Advances in Science & Research** 6:237–243
121. Wang X, Brown PM, Zhang Y, Song L (2011). *Imprint of the Atlantic Multidecadal Oscillation on Tree-Ring Widths in Northeastern Asia since 1568*. **PLoS ONE** 6(7): e22740. doi:10.1371/journal.pone.0022740
122. Westphal C, Tremer N, von Oheimb G, Hansen J, von Gadow K, Härdtle W (2006). *Is the reverse J-shaped diameter distribution universally applicable in European virgin beech forests?* **Forest Ecology and Management** 223:75–83
123. Wirth C, Messier C, Bergeron Y, Frank D, Fankhänel A (2009). *Old-growth forest definitions: a pragmatic view*. In: Wirth C, Gleixner G, Heimann M (eds.). *Old-Growth Forests*. Ecological Studies 207, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
124. Wiser SK, Allen RB, Benecke U, Baker G, Peltzer D (2005). *Tree growth and mortality after small-group harvesting in New Zealand old-growth Nothofagus forests*. **Canadian Journal of Forest Research** 35: 2323–2331
125. Zenner E (2005). *Development of tree size distributions in douglas-fir forests under differing disturbance regime*. **Ecological Applications** 15:701–714
126. Ziaco E, Di Filippo A, Alessandrini A, Baliva M, D’Andrea E, Piovesan G (2012a). *Old-growth attributes in a network of Apennines (Italy) beech forests: disentangling the role of past human interferences and biogeoclimate*. **Plant Biosystems** 146:153–166
127. Ziaco E, Biondi F, Di Filippo A, Piovesan G (2012b). *Biogeoclimatic influences on tree growth releases identified by the boundary line method in beech (*Fagus sylvatica* L.) populations of southern Europe*. **Forest Ecology and Management** 286:28-37
128. Ziaco E, Alessandrini A, Blasi S, Di Filippo A, Dennis S, Piovesan G (2012c). *Communicating old-growth forest through an educational trail*. **Biodiversity and Conservation** 21:131–144

## **Ringraziamenti**

*A Gianluca Piovesan per avermi concesso la possibilità di condurre questa ricerca che mi ha permesso di visitare alcuni tra i luoghi più belli d'Italia, per la stima sempre accordatami e per gli insegnamenti in questi anni di collaborazione...*

*A Franco Biondi per l'amicizia, la disponibilità e l'ospitalità durante i miei soggiorni a Reno (Nevada) e per avermi permesso di “rubare” un po' del suo sapere...*

*Ad Alfredo Di Filippo per l'aiuto e i consigli...*

*Ad amici e colleghi che hanno condiviso con me questo percorso, con l'augurio di buona fortuna per il futuro...*

*Ad Irene, per l'elevata capacità di sopportazione...*

## Allegati fotografici



*La faggeta vetusta primaria della Val Cervara (Parco Nazionale d'Abruzzo, Lazio e Molise)*



*Buca apertasi in seguito allo schianto di alcune piante dominanti all'interno della faggeta della Val Cervara. Si nota la presenza di abbondante necromassa al suolo e i maggiori livelli di radiazione luminosa che raggiunge il terreno nell'intorno della buca*



*Abbondante rinnovazione di faggio insediatasi in prossimità di una buca nella copertura forestale*



*La faggeta vetusta di Coppo del Principe. Si noti la minore densità delle piante nella zona meno acclive in primo piano che testimonia una passata gestione a pascolo arborato*



*Grande esemplare dominante morto in piedi, probabilmente in conseguenza di ripetute fasi di stress idrico. Si noti come la morte di questa pianta ha generato l'apertura di una buca anche senza lo schianto del fusto, a causa delle grandi dimensioni della chioma*



*Pianta di grandi dimensioni con fusto completamente cavo nella faggeta vetusta primaria di Coppo del Morto circondata da abbondante rinnovazione. In lontananza sulla sinistra si nota la presenza di un grande esemplare di faggio morto in piedi*



*Vecchie tracce della presenza dell'uomo nelle faggete altimontane appenniniche. Segni di questo tipo sono frequenti in prossimità dei nuclei vetusti di faggio mentre non sono evidenti segni di passate utilizzazioni*



*Esemplare di faggio di circa 60 cm di diametro campionato nella faggeta di Coppo del Morto. L'età di questa pianta è risultata essere maggiore di 530 anni. Si noti la particolare corteccia di questo esemplare plurisecolare, riconducibile al tipo *quercooides* o *leucodermis**



*La faggeta di Lateis (Alpi orientali) in una foto d'epoca (in alto) e come appare oggi (in basso). Questo popolamento vetusto è posto a protezione dell'omonimo villaggio e quindi non è stato mai interessato da tagli su larga scala*



*Apparato radicale di un grande esemplare di faggio schiantatosi nella faggeta di Gëißlucke (Alta Austria). Il movimento di grandi quantità di terreno in conseguenza del sollevamento degli apparati radicali di piante crollate a terra porta alla luce il fertile strato minerale sottostante, su cui si insedia rapidamente la rinnovazione. Con il tempo la graduale decomposizione delle radici genera la cosiddetta “microtopografia a fosso e dosso” che, essendo legata agli schianti delle piante in conseguenza di eventi naturali, è caratteristica di popolamenti vetusti esposti al naturale regime di disturbo*



*Operazioni di carotaggio nella faggeta di Kholersgraben (Alta Austria). Si noti l'acclività della stazione, che è caratteristica comune tra le foreste vetuste altimontane: la difficile accessibilità dei siti, infatti, ha contribuito nei secoli a limitare gli impatti selvicolturali sulla foresta, permettendo a questi ecosistemi forestali di mantenere un aspetto prossimo alle condizioni di naturalità*



*La faggeta vetusta altimontana di Zwielauf*



*Porzione di albero morto in piedi (snag) attaccato da funghi decompositori della specie Fomes fomentarius. La presenza di snags, oltre ad essere indicatrice di naturalità della foresta, fornisce cibo e riparo a numerose specie di microartropodi, insetti, micromammiferi e specie epifite, contribuendo quindi ad incrementare notevolmente la biodiversità forestale*