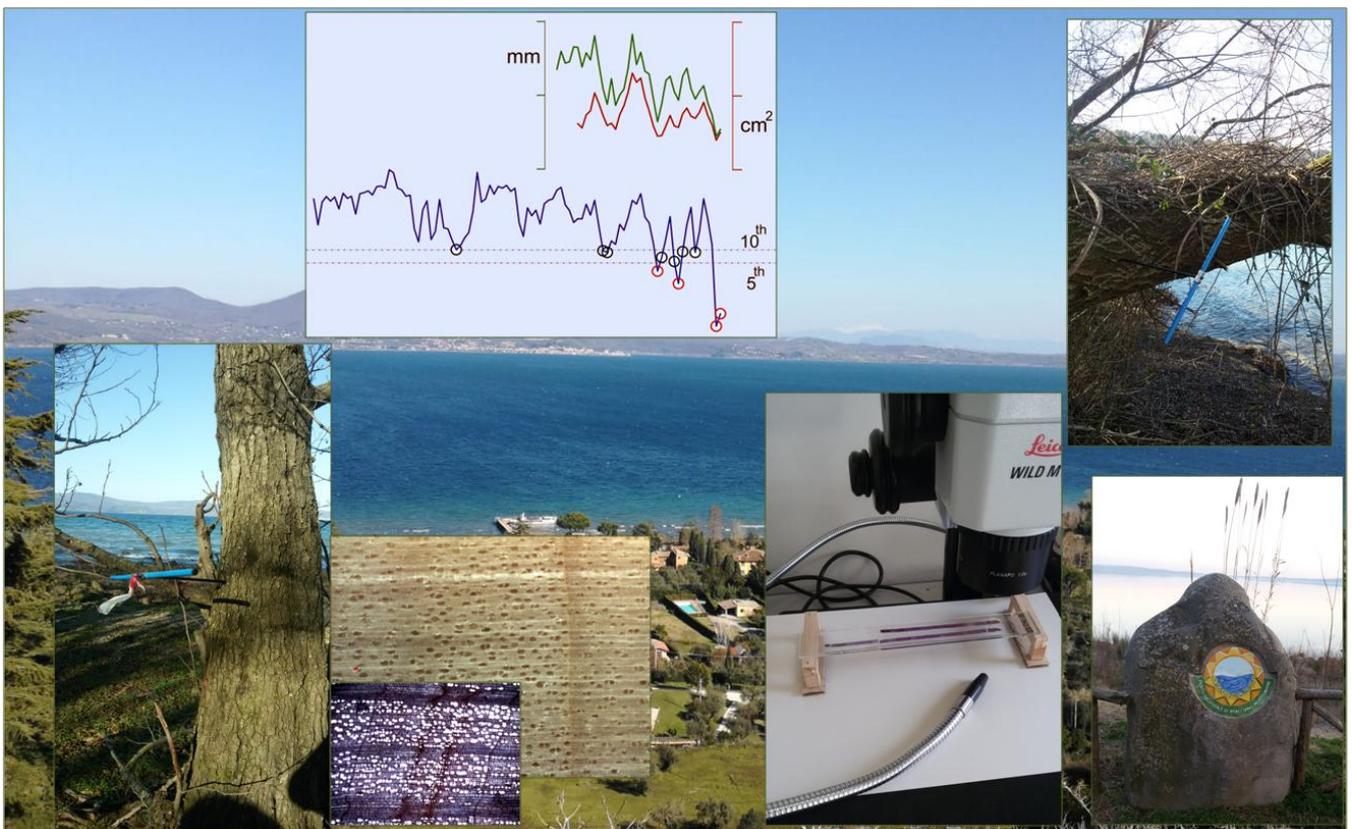


*“Effetto delle fluttuazioni del livello idrometrico dei laghi di Bracciano e Martignano  
sulle dinamiche di crescita degli ecosistemi forestali ripariali”*



Relazione finale

Arezzo, 31/05/2019

A cura di: **Gianluigi Mazza**, Claudia Becagli, Roberta Proietti e Piermaria Corona

## Introduzione

Le foreste e i boschi ripariali sono un'importante e delicata interfaccia tra l'ambiente acquatico e il territorio circostante e contengono una rilevante biodiversità, per questo molti sono tutelati dalla Direttiva "Habitat" (43/92/CEE).

La fascia litoranea e le zone umide peri-lacustri dipendono in larga misura dalle variazioni del livello idrometrico (Smith, 1980; Wetzel, 1990). La periodicità delle fluttuazioni del livello idrometrico (*water level fluctuation* - WLF) influenza in modo decisivo la composizione e la struttura delle comunità vegetali idro-igrofile e ripariali e, più in generale delle biocenosi presenti. Si tratta di ambienti molto reattivi, in grado di rispondere rapidamente anche a WLF in apparenza di scarsa rilevanza, dell'ordine dei decimetri, che possono però indurre fenomeni di stress idrico a carico delle comunità vegetali litorali e di sponda.

La dinamica di tali ecosistemi è condizionata dal livello idrometrico che a sua volta è condizionato sia dall'andamento di fattori meteo-climatici, quali siccità meteorologica (scarsità di precipitazioni) che determina a sua volta siccità idrologica (apporto idrico relativamente scarso nel suolo, nei corsi d'acqua, o nelle falde acquifere), che da fattori di natura antropica (pressioni esercitate sul corpo idrico e sul suo bacino idrogeologico, prelievi per fabbisogni idrici).

Nel complesso sistema di interazioni tra vegetazione arborea e ambiente circostante (suolo, atmosfera, corpi idrici) gli anelli di crescita radiale sono un importante archivio di informazioni che ci permettono di capire la storia, e quindi l'evoluzione nel tempo di tali interazioni.

Le serie storiche degli anelli di crescita degli alberi rappresentano, infatti, una delle principali fonti di "*proxy data*" di facile reperibilità, a basso costo e disponibili per la maggior parte degli ecosistemi forestali esistenti. Vengono ampiamente utilizzate per la ricostruzione di variabili climatiche e idrologiche di lungo termine così come per studi di tipo ecologico sulle dinamiche di accrescimento, sulla sensibilità di una o più specie ai parametri climatici e ambientali e quindi la capacità di adattamento ai cambiamenti climatici, sulle risposte incrementali agli interventi colturali.

Negli ecosistemi lacustri e ripariali, molti studi hanno evidenziato una relazione molto significativa tra le fluttuazioni del livello idrometrico e la variabilità dell'accrescimento arboreo (Bégin 2001; Polacek et al. 2006; Singer et al. 2014; Gholami et al. 2015; van der Maaten et al. 2015),

evidenziando la sensibilità e la reattività di queste specie ai disturbi esterni strettamente collegati con il livello idrometrico dei corpi idrici.

Alcune specie appartenenti a formazioni ripariali quali il *Populus* sp., *Alnus glutinosa*., *Salix* sp. presentano legno eteroxilo a porosità diffusa. I vasi sono infatti distribuiti in maniera più o meno regolare nell'anello annuale (Wheeler et al., 1989), hanno lume simile e la chiusura dell'anello è contraddistinta da una zona priva di vasi, con poche file (2-4) di cellule appiattite (legno di chiusura), che demarcano il confine tra 2 anelli di crescita successivi.

L'identificazione delle cerchie annuali nelle sezioni trasversali di xilema a porosità diffusa è più complessa non solo rispetto al legno omoxilo delle conifere (es. *Pinus pinea*), ma anche rispetto al legno eteroxilo a porosità anulare come la *Quercus pubescens*. In quest' ultima specie i vasi prodotti all'inizio della stagione vegetativa (legno primaverile) hanno un lume significativamente maggiore rispetto a quello del legno estivo e formano una corona circolare all'inizio di ogni anello (Wheeler et al., 1989; Takahashi et al., 2013), che rende facilmente identificabile la successione dei diversi anni di crescita.

L'accrescimento annuale radiale, e quindi lo spessore degli anelli, è correlato a fattori abiotici (stress climatici, tipo di suolo...), biotici (presenza di patologie..) ed alle caratteristiche genetiche della specie. Nel corso della stagione vegetativa, a causa di questi fattori, la crescita dell'anello può rallentare o arrestarsi per riprendere prima della fine della stagione vegetativa; causando fluttuazioni nella densità del legno (Intra-Annual Density Fluctuations, IADFs), con presenza di cellule primarie del legno estivo all'interno del legno primaverile, o la formazione nello stesso anno di 2 o più anelli ovvero falsi anelli (De Micco et al., 2010; Battipaglia et al., 2016).

In questo studio è stata effettuata un'indagine dendroecologica al fine di valutare: i) la sensibilità climatica delle principali specie arboree degli habitat forestali ripariali situati in due ecosistemi lacustri soggetti ad un diverso grado di disturbo e/o pressione antropica (Lago di Bracciano con maggiore disturbo e lago di Martignano) e ii) l'effetto delle fluttuazioni idrometriche sull'accrescimento radiale della vegetazione arborea ripariale del lago di Bracciano.

## **Monitoraggio dendroecologico: metodologie di indagine**

### **Dati idro-climatici**

Nel presente studio sono stati utilizzati i dati meteorologici della stazione di Bracciano (Prato Pianciano - 247 m s.l.m.). Le serie storiche dei dati meteo a partire dal 1951 sono state acquisite dalla Regione Lazio (Agenzia Regionale di Protezione Civile, Centro Funzionale Regionale) ed

integrate con i dati del servizio agrometeorologico dell'agenzia Arsiat (Regione Lazio) per il periodo 2004-2018. I dati storici delle variazioni del livello idrometrico sono stati forniti dall' Ente Parco relativamente al lago di Bracciano (1921-2018), in quanto per il quello di Martignano gli idrometri sono stati installati nell'estate 2017.

Per la caratterizzazione climatica del sito di studio è stato utilizzato anche l'indice di aridità (SPEI – *Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*), calcolato utilizzando l'evapotraspirazione potenziale (PET) secondo la formula di *Thornthwaite*, come implementato nella libreria SPEI sviluppata nell'ambiente statistico R (Vicente-Serrano et al., 2010).

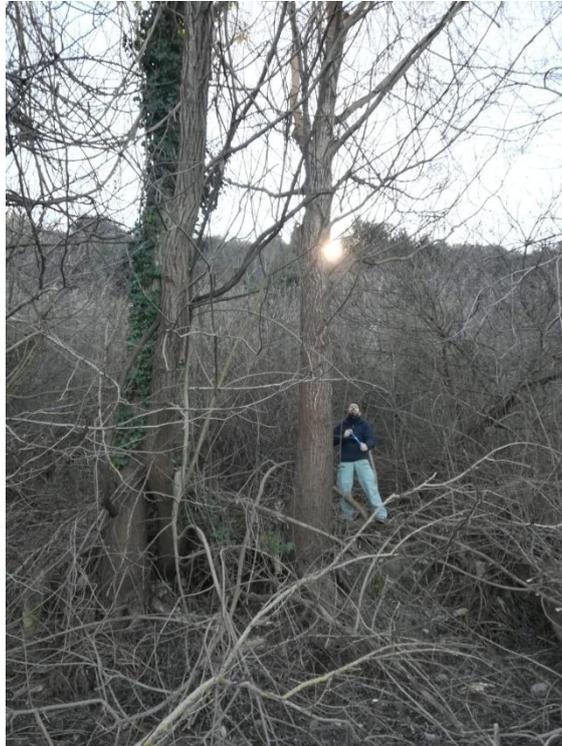
### **Prelievo e preparazione campioni legnosi**

Fase 1. La fase preliminare dello studio è stata quella di individuare i punti accessibili alle rive del lago di Bracciano e Martignano che presentassero un numero consistente e rappresentativo di piante arboree. A tale scopo si è utilizzato la Carta della Vegetazione Fisionomica fornitaci dall'Ente Parco. In tal modo è stato possibile individuare le zone dove era presente una maggiore formazione boschiva, per lo più costituita da vegetazione ripariale (*Salix* spp., *Alnus glutinosa* e *Populus* spp.). Per caratterizzare i popolamenti presenti lungo le rive di entrambi i laghi si è preceduto alla rilevazione delle specie arboree e dei diametri misurati ad 1.30 m.

Successivamente si è proceduto alla mappatura dei punti facilmente accessibili sull'intero perimetro dei laghi nell'intorno dei quali si è effettuato il prelievo delle carote legnose:



Ai fini dello studio sono stati selezionati gli alberi dominanti e/o codominanti con diametro maggiore in modo da avere una sequenza cronologica più lunga possibile, con buona conformazione del fusto, della chioma e senza ferite.



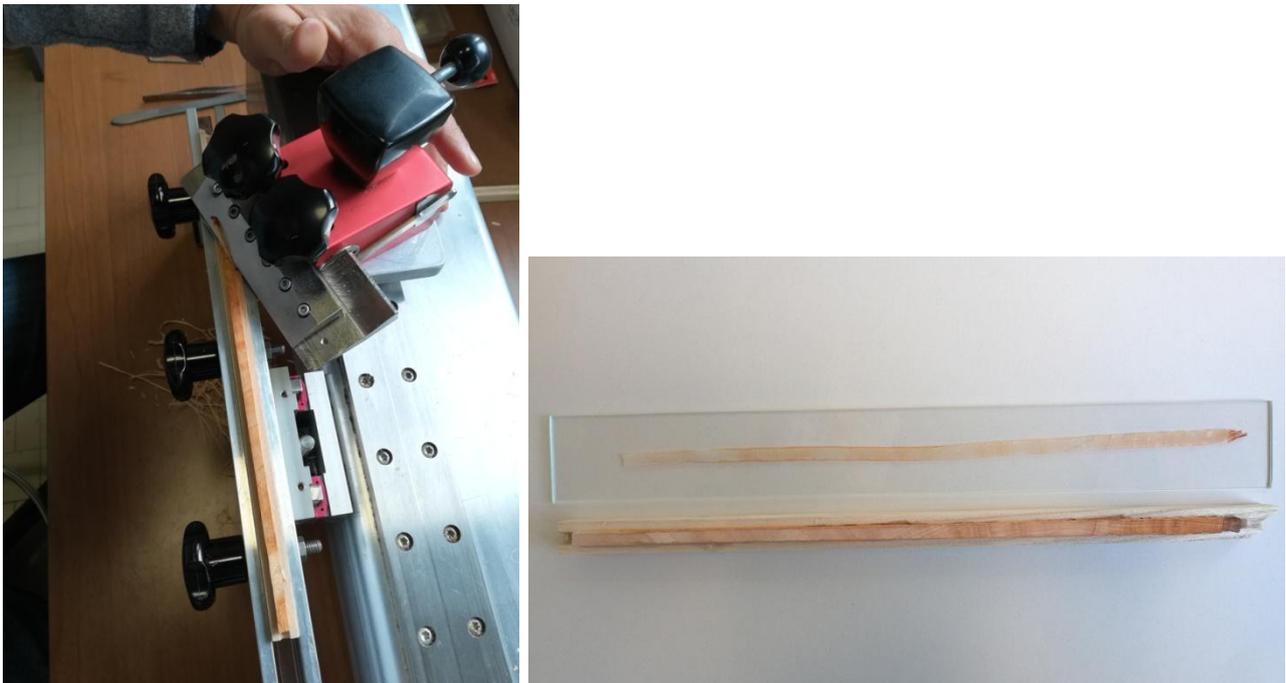
**Foto 1.** Pianta target per il campionamento dendroecologico.

Per ogni pianta individuata sono state prelevate 2 carote incrementali di 5 mm di diametro con la trivella di Pressler a circa a 1.30 m dal suolo. Il prelievo è stato eseguito in direzione perpendicolare all'inclinazione del piano di campagna, considerando l'ipotetica formazione di legno di reazione (Fritts 1976) e mirando a raggiungere il midollo. La scelta delle piante da carotare è stata effettuata per ridurre, nelle ampiezze anulari, la presenza di disturbi causati ad esempio da legno cicatriziale dovuto a ferite meccaniche, da torsioni del fusto che rendono di difficile lettura ogni ampiezza annuale, da riduzioni dell'accrescimento dovute alla competizione intraspecifica (tipiche delle piante dominate e/o sottoposte). Ogni carota prelevata è stata inserita in una cannuccia ed è stata classificata (specie, diametro della pianta, luogo di prelievo con l'individuazione del punto di riferimento sulla mappa ).

Fase 2. La preparazione dei campioni è avvenuta secondo le procedure standard utilizzate in dendrocronologia (Fritts 1976; Schweingruber 1989). Le carote prelevate sono state montate provvisoriamente su appositi supporti in modo da impedire torsioni o curvature dovute al rapido

disseccamento. In laboratorio si è proceduto alla preparazione dei campioni. Le carote sono state trasferite su appositi supporti legnosi ed incollate con colla vinilica, facendo attenzione all'inclinazione delle fibre (osservabili ai due estremi della carota), che deve essere perpendicolare al supporto in modo da ottenere, dopo la levigatura, una sezione trasversale e quindi permettere un agevole conteggio e misurazione degli anelli. Le carote costituite da più segmenti sono state ricomposte e, nel caso di porzioni presentanti torsione delle fibre, la verticalità è stata ripristinata.

Successivamente tutti i campioni sono stati levigati con l'apposito microtomo a slitta WSL-Core-microtome (Gärtner e Nievergelt, 2010; Gärtner e Schweingruber, 2013) per facilitarne la lettura:



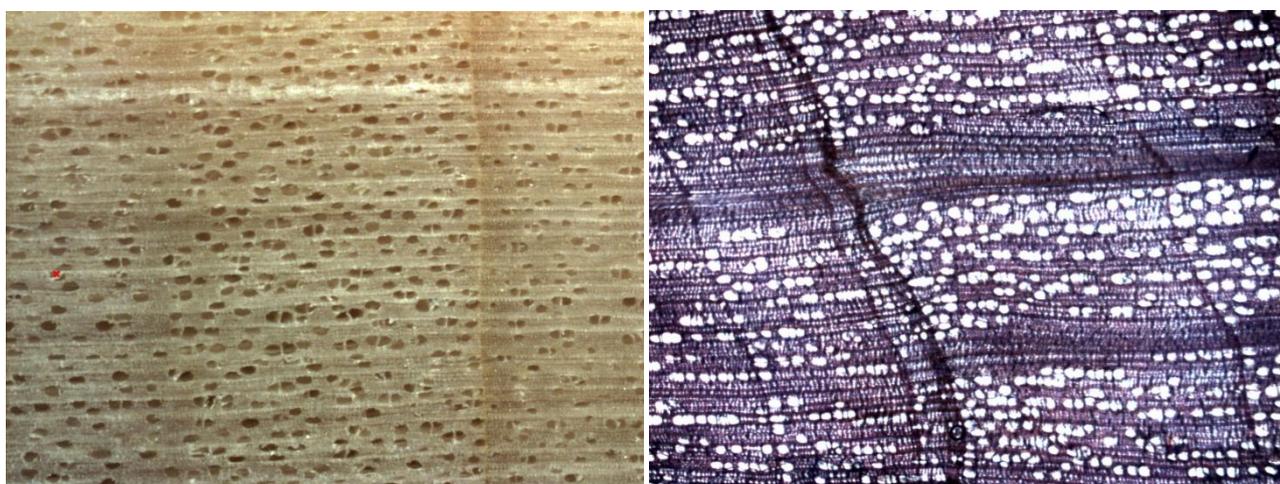
**Foto 2.** Microtomo per la levigatura e microsezione dell'intera carota legnosa.

La misurazione dell'ampiezza anulare è stata effettuata (con la precisione di 0,01 mm) con il sistema ottico semi-automatico LINTAB™, costituito da un binocolare con crocefilo ed un piano mobile i cui spostamenti, corrispondenti alle ampiezze anulari espresse in 1/100 mm, vengono registrati dal software collegato TSAP-Win (Time Series Analysis and Presentation, TSAP, Frank Rinn, Heidelberg, Germany).

Le caratteristiche anatomiche del legno a porosità diffusa insieme alla presenza di falsi anelli hanno reso difficoltosa, in alcuni casi, l'analisi delle serie tree ring e il cross-dating. Per questo motivo la misurazione degli anelli non è stata effettuata solamente con il LINTAB™, ma anche attraverso l'osservazione al microscopio di micro sezioni (Gärtner et al., 2015). Questa doppia

lettura dei campioni ha permesso di evidenziare in maniera più definita e precisa la successione delle cerchie annuali. Le microsezioni sono state ottenute dall'intera carota incrementale tagliando con il microtomo a slitta WSL-Core-microtome sezioni trasversali di 15-20 µm di spessore. Le sezioni sono state colorate con una soluzione costituita da safranina e acido acetico (Werf van der *et al.*, 2007). L'eccesso di colorante è stato rimosso risciacquando le sezioni con acqua distillata. Quindi il campione è stato deidratato con etanolo a diversa concentrazione (in sequenza: 75%; 90%; 100%; Gärtner *et al.*, 2015; Piermattei *et al.*, 2014). Questo ultimo passaggio consente anche di fissare la colorazione. Infine le sezioni sono state montate su vetrini con una soluzione di glicerolo al 50%. Sono stati preparati dei vetrini porta-oggetto di lunghezza compresa tra 15 e 25 cm sui quali fosse possibile montare l'intera sezione trasversale. In questo modo non è necessario dividere la carota incrementale in più parti di 4-5 cm di lunghezza (Carrer *et al.*, 2018), e successivamente ricostruire la sequenza annuale degli anelli. I vetrini porta-oggetto normalmente impiegati in laboratorio sono infatti più piccoli (dimensioni 26x76 mm).

Le microsezioni sono state osservate al microscopio a luce trasmessa ZEISS AXIO Lab. A1 con un ingrandimento 50X. Questo ingrandimento è superiore rispetto a quello del LINTAB™ e quindi consente di discriminare meglio possibili anomalie di crescita presenti nell'anello annuale. Inoltre al microscopio è collegata una fotocamera ZEISS AxioCam che consente l'acquisizione delle immagini e la loro analisi grazie al software ZEISS AxioVision 4.8.2 SP1. Dopo aver approfondito la struttura anatomica del campione al microscopio ottico, la microsezione è stata osservata al LINTAB™ per la misurazione degli incrementi annuali preparando un apposito supporto per collocare il vetrino.



**Foto 3.** Esempio di campione legnoso a porosità diffusa di *Alnus glutinosa*

## Analisi dendrocronologia e dendroclimatica

La prima fase di elaborazione dei dati di ampiezze anulari ha riguardato il *cross-dating* o “datazione incrociata”. Le correzioni di eventuali errori di misurazione sono stati effettuati con approccio statistico, mediante le funzioni *corr.rwl.seg*, *corr.series.seg* e *ccf.series.rwl* del pacchetto statistico di R “*dplR - Dendrochronology Program Library in R*”.

La sincronizzazione tra le serie individuali è stata valutata attraverso il test non parametrico Glk – *Gleichlaufigkeit*, ritenendo buone quelle serie la cui cross-datazione ha un valore di Glk > 60%. Il Glk considera l'aumento o la diminuzione delle pendenze di ampiezze anulari successive che vanno nella stessa direzione tra due cronosequenze, e le quantifica rispetto alla lunghezza totale delle serie cronologiche.

A partire dalle curve medie sono state, quindi, calcolate le statistiche descrittive relative ai principali parametri dendrocronologici quali l'ampiezza anulare media (M); la sensibilità media (SM), calcolata secondo la formula dell'equazione 2 presente in Biondi and Qeadan (2008):

$$SM = \frac{n}{n-1} \frac{\sum_{t=2}^n |w_t - w_{t-1}|}{\sum_{t=1}^n w_t}$$

dove  $n$  è la lunghezza totale della serie,  $w$  è l'ampiezza anulare e  $t=1, 2, \dots, n$  è l'anno. Tale equazione tiene conto dell'influenza del trend biologico tipico delle serie dendrocronologiche e di altre caratteristiche quali le deformazioni causate da ferite o altre ingiurie, che possono incidere sulla sensibilità. Questo parametro misura la variazione media di ampiezza fra due anelli successivi di una determinata serie (Fritts, 1976) e biologicamente evidenzia le capacità reattive della pianta alle variazioni interannuali dei fattori ecologici presenti. È stato calcolato, infine, il coefficiente di autocorrelazione di 1° ordine, che misura l'influenza di un anno sulla crescita dell'anno successivo.

Per l'analisi dendroclimatica è stata effettuata una standardizzazione delle serie al fine di rimuovere il trend negativo legato all'età (“*detrending*”) dovuto alla crescente circonferenza dell'albero. Sulle serie standardizzate sono state inoltre calcolate le correlazioni medie tra tutti i campioni e l'“*Expressed Population Signal*” (EPS – Wigley et al. 1984):

$$EPS(N) = \frac{Nr_{bt}}{Nr_{bt} + (1 - r_{bt})}$$

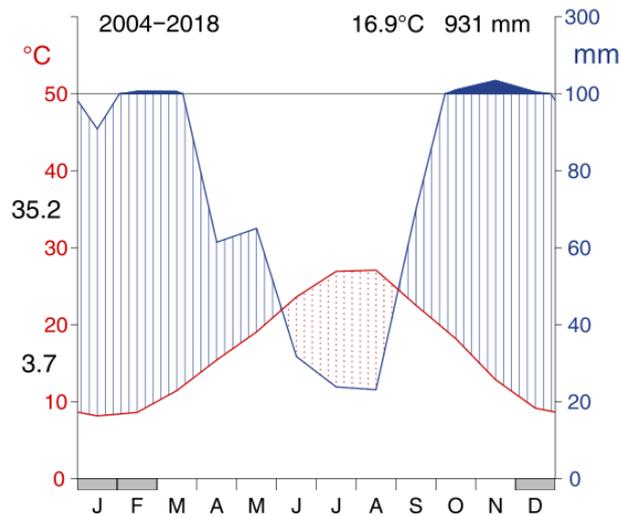
dove  $N$  è il numero dei campioni e  $r_{bt}$  è la correlazione media tra gli alberi. Tale parametro, di cui è stata presa in considerazione la soglia minima di 0.85, fornisce una stima indicativa dell'affidabilità della cronologia quantificando la variabilità comune in tutte le serie anulari di un particolare sito.

L'influenza del clima e delle fluttuazioni del livello idrometrico sull'accrescimento radiale delle specie forestali ripariali è stata valutata attraverso la significatività dei coefficienti di correlazione di Pearson ( $r$ ) tra le serie standardizzate e le variabili idro-climatiche (precipitazione, SPEI e livello idrometrico). Nelle relazioni calcolate la variabile dipendente è rappresentata dalle cronologie anulari standardizzate, mentre le variabili indipendenti sono i parametri idro-climatici (regressori). Le variabili climatiche sono state testate a diverse scale temporali, per valutare l'effetto sia di segnali ad alta frequenza (a breve termine) quali quelli mensili e/o stagionali che a bassa frequenza (a lungo termine) quali ad esempio l'effetto di uno o più anni precedenti l'anno di formazione dell'anello legnoso. Nel dettaglio, le variabili mensili vanno da Settembre dell'anno precedente alla formazione dell'anello legnoso fino a Dicembre dell'anno corrente; quelle stagionali sono state suddivise in due gruppi (3 e 6 mesi) a partire da Agosto dell'anno precedente fino a Dicembre dell'anno corrente e spostate ogni volta di un mese fino a coprire tutto l'intervallo temporale considerato.

## **Risultati**

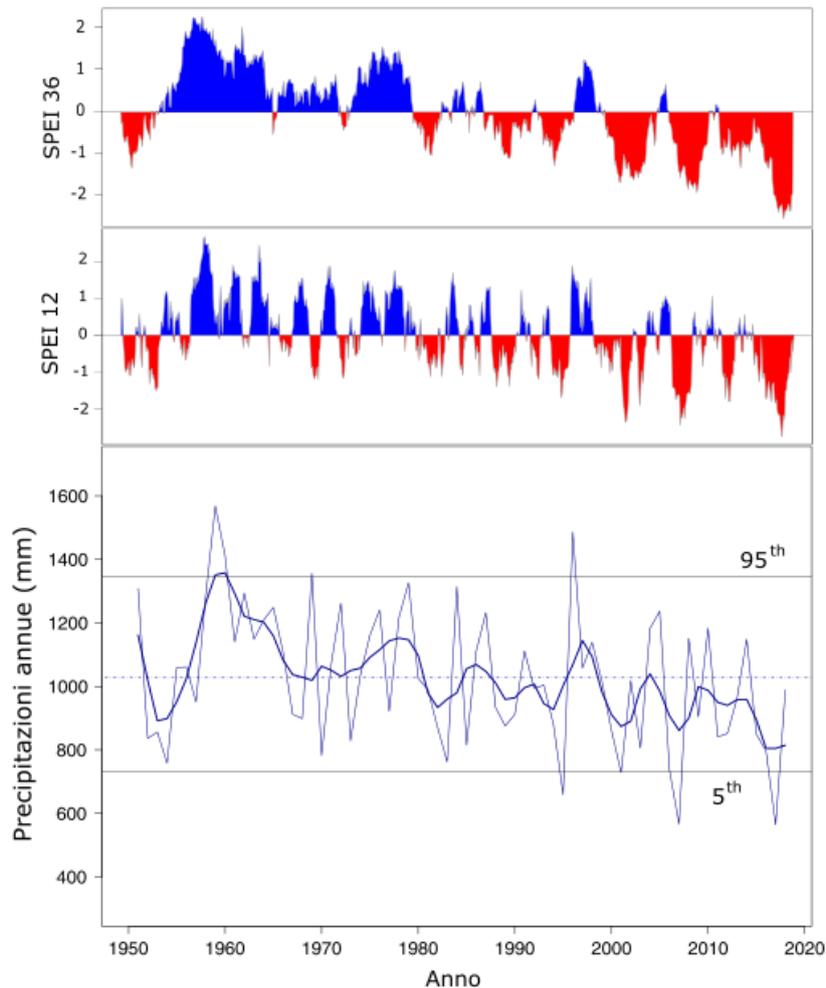
### **Caratterizzazione climatica**

Nell'area di studio il clima è tipicamente mediterraneo (Figura 1), con una piovosità media annua (periodo 2004-2018) di circa 930 mm, concentrata nei mesi autunno-invernali e un'estate secca, ed una temperatura media annua da 16.9 °C. Luglio e agosto con 23.8 e 23.1 mm, rispettivamente, sono risultati i mesi con le minori quantità di precipitazioni, mentre Ottobre e soprattutto Novembre quelli più piovosi, con una media di precipitazioni superiore ai 110 mm.



**Figura 1** – Diagramma termo-pluviometrico di *Walter & Lieth* caratteristico dell’ area di ubicazione geografica dei laghi di Bracciano e Martignano. L’area ombreggiata al centro indica il periodo di aridità.

A partire dagli anni sessanta, l’andamento delle precipitazioni annue evidenzia un trend significativamente negativo (*Mann-Kendall* test:  $\tau = -0.31$  con  $P < 0.001$ ). Nell’ultimo ventennio (2000-2018) è stata, infatti, registrata una riduzione delle precipitazioni di circa il 9 % rispetto al ventennio precedente (1980-1999) e di circa il 15% rispetto a tutto il periodo precedente disponibile (1951-1999). Inoltre, dalla fine degli anni novanta sono stati registrati valori di precipitazioni estremamente bassi, inferiori al 95% percentile (Figura 2). Questa significativa riduzione delle precipitazioni in corrispondenza di un aumento significativo della temperatura ha determinato dalla fine degli anni novanta il verificarsi di condizioni particolarmente siccitose, come evidenziato dall’indice SPEI a risoluzione temporale di 12 e 36 mesi (Figura 2). L’indice SPEI a 12 mesi, infatti, negli ultimi 20 anni circa (2000-2018) è passato rispetto al ventennio precedente da circa 0 a -0.26, mentre nel periodo 1951-1980 era positivo e pari a circa 0.19.



**Figura 2** – Andamento delle precipitazioni annue e delimitazione dei valori sopra e sotto la media con i relativi valori estremi maggiori del quinto percentile (in basso). Andamento dell'indice SPEI – *Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*, a 12 e 36 mesi (in alto).

Sia le precipitazioni che l'indice di aridità SPEI hanno evidenziato un'influenza significativa sulle variazioni annuali del livello idrometrico del lago di Bracciano, in particolare considerando l'effetto di più anni precedenti (Tabella 1). Di conseguenza l'effetto di un singolo anno particolarmente siccitoso sarebbe meno influente rispetto, ad esempio, a 3 e 4 anni consecutivi di scarsa piovosità. L'effetto delle condizioni climatiche passate sulle variazioni del livello idrometrico è anche evidente a scala stagionale. Considerando il livello idrometrico nel periodo più critico, ossia quello estivo (Giugno, Luglio, Agosto), sono risultate più significative le precipitazioni da settembre a maggio di 2 e 3 anni precedenti (Tabella 1).

**Tabella 1** – Coefficienti di correlazione di *Pearson* a scala annuale e intra-annuale tra precipitazioni/SPEI e livello idrometrico del lago di Bracciano, considerando sia l'anno corrente (t) che l'effetto cumulato fino a 5 anni precedenti (t + t<sub>5</sub>).

<i>r</i> (Pearson)	Anno	Annuale		Settembre - Maggio	
		Precipitazione	SPEI	Precipitazione	SPEI
Bracciano (1951-2018)	t	0.40**	0.53***	0.60***	0.61***
	t + t <sub>1</sub>	0.66***	0.74***	0.74***	0.78***
	t + t <sub>2</sub>	0.75***	0.82***	0.77***	0.79***
	t + t <sub>3</sub>	0.74***	0.78***	0.73***	0.79***
	t + t <sub>4</sub>	0.71***	0.75***	0.69***	0.76***
	t + t <sub>5</sub>	0.71***	0.75***	0.65***	0.62***

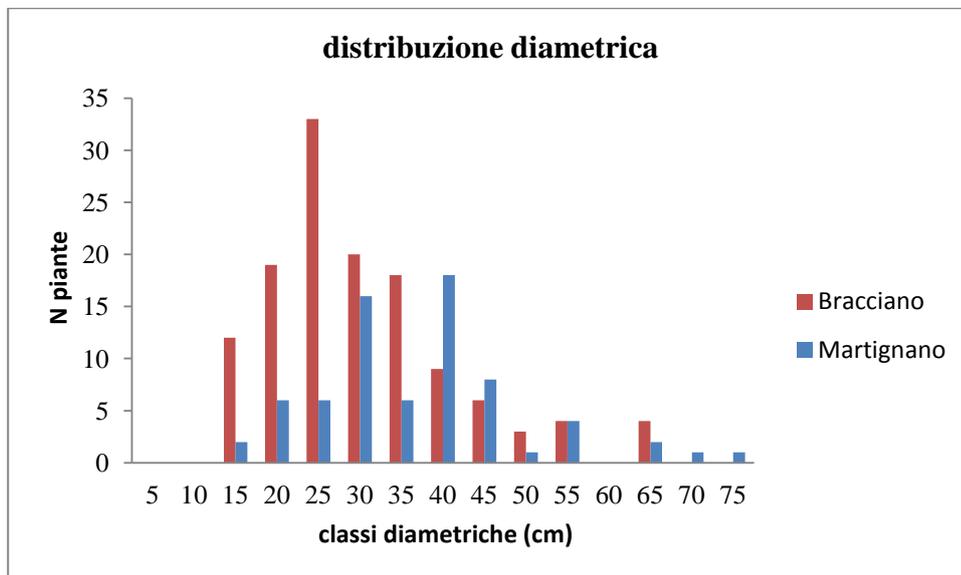
### Caratterizzazione dendrometrica

In Tabella 2 sono riportati i principali parametri dendrometrici (numero delle piante, area basimetrica per specie - g e diametro medio - dbh) delle specie rilevate. Come si evince dalla tabella, la maggior parte delle specie campionate sono caratterizzate da legno eteroxilo a porosità diffusa.

Specie	Bracciano			Martignano			caratteristiche morfo-anatomiche
	N piante	g m <sup>2</sup>	dbh (cm)	N piante	g m <sup>2</sup>	dbh (cm)	
<b>Ag</b>	96	4.09	23.3	16	1.00	28.2	legno eteroxilo a porosità diffusa
<b>Rp</b>	4	0.48	38.9	–	–	–	legno eteroxilo a porosità diffusa
<b>Pn</b>	6	0.60	35.6	–	–	–	legno eteroxilo a porosità diffusa
<b>Pp</b>	3	0.85	60.2	–	–	–	legno omoxilo
<b>Sa spp.</b>	15	1.21	32.1	36	4.33	39.2	legno eteroxilo a porosità diffusa
<b>Pt</b>	–	–	–	19	1.19	28.2	legno eteroxilo a porosità diffusa
<b>Pl</b>	2	0.28	42.5	–	–	–	legno eteroxilo a porosità diffusa
<b>Qp</b>	1	0.30	61.8	–	–	–	legno eteroxilo a porosità anulare
<b>Totale</b>	<b>128</b>	<b>7.94</b>	<b>28,1</b>	<b>71</b>	<b>6.52</b>	<b>34.2</b>	

**Tabella 2** – Principali caratteristiche dendrometriche e anatomiche del legno delle specie arboree rilevate ( An: *Alnus glutinosa*, Rp: *Robinia pseudoacacia*, Pn: *populus nigra*; Pp: *Pinus pinea*; Sa. Spp: diverse specie di *salici*; Pt: *Populus tremula*, Pl: *Platano acerifolia*; Qp: *Quercus pubescens*).

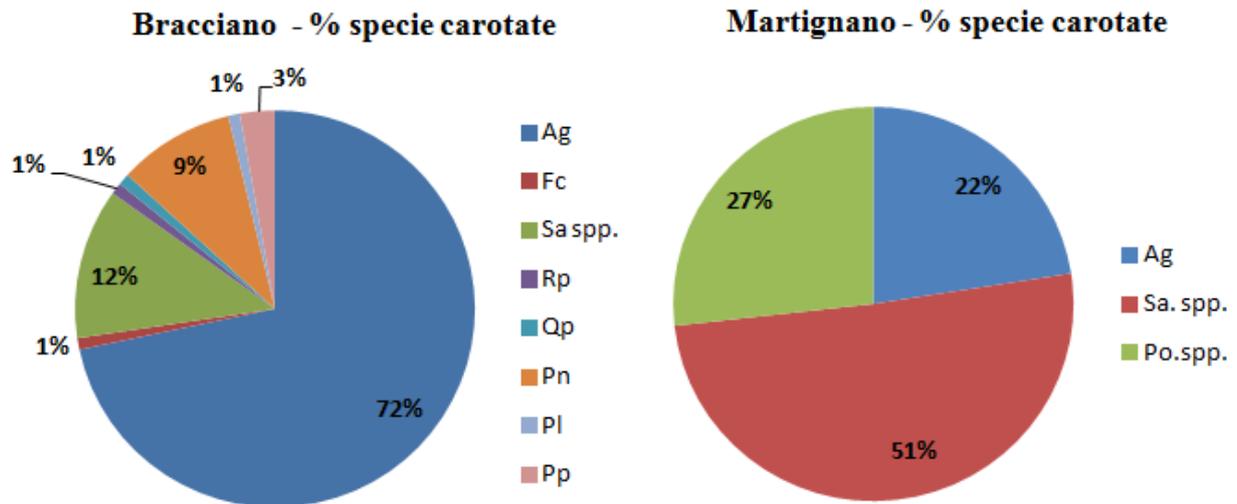
Il diametro medio (dbh) è più elevato a Martignano rispetto al lago di Bracciano, sia quello riferito alle specie comuni come i salici e l'ontano che quello totale. A Bracciano, infatti, la classe diametrica con una maggior frequenza è quella centrale (25-30 cm), mentre a Martignano sono le classi diametriche di 30 cm e 40 cm (Figura 3).



**Figura 3.** Distribuzione diametriche per numero di piante a Bracciano e Martignano.

A Bracciano si osserva una maggiore diversità specifica rispetto a Martignano le cui specie prevalenti sono ontano, salice e diverse specie di pioppo appartenenti principalmente alle classi diametriche di 30 -40 cm, solamente i salici riescono a raggiungere diametri più importanti. A Bracciano le classi diametriche più alte sono costituite da pino, roverella, platano e qualche pioppo. Sono le specie che erano più distanti dalla riva del lago ma collocate in una fascia ancora non soggetta al disturbo antropico; si è quindi ritenuto opportuno includerle nel campione di studio. La specie predominante a Bracciano è l'ontano con il 72 % sul numero totale delle piante carotate, seguito dai salici con il 12 % ed in percentuale minori si hanno le altre formazioni ripariali e altre specie quali roverella, pino, robinia e platano (1 %).

A Martignano il 51 % delle piante carotate è rappresentato da salici ed in quasi ugual misura da pioppi 27% e ontani 22 % (Figura 4).



**Figura 4.** Percentuale delle specie arboree carotate a Bracciano e Martignano

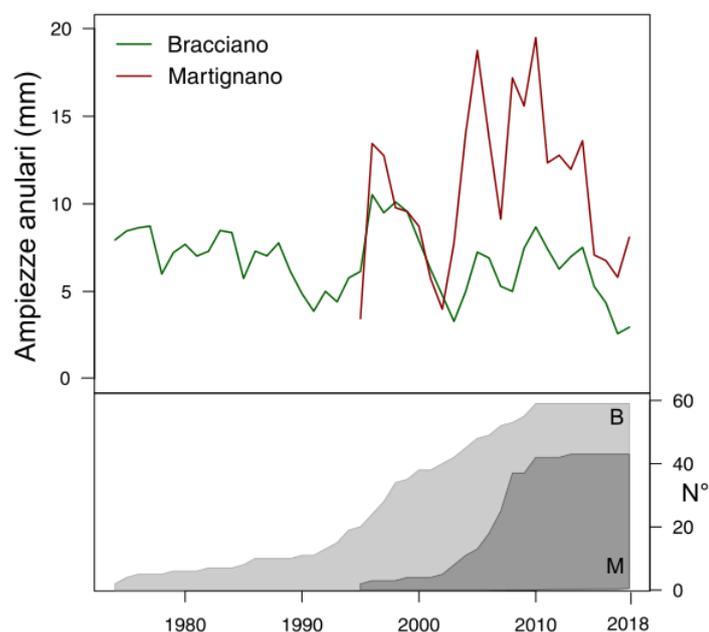
#### **Analisi dendrocronologia e dinamiche di crescita**

L'età delle piante è risultata maggiore nella fascia ripariale del lago di Bracciano, mentre a Martignano le cronologie anulari più lunghe sono datate intorno ai primi anni '90 circa (Figura 5). Per questo motivo, alcuni parametri dendrocronologici basati sulle serie standardizzate (r.bt e EPS) non sono stati calcolati a causa della lunghezza troppo corta delle serie cronologiche. L'accrescimento radiale medio è risultato nettamente superiore (circa il doppio) a Martignano, mentre gli altri parametri sono risultati molto simili (Tabelle 3).

Per quanto riguarda, invece, la presenza di falsi anelli è stata osservata una differenza molto significativa tra i due ecosistemi forestali ripariali. Nel lago di Bracciano, infatti, la vegetazione arborea ripariale ha evidenziato una maggiore presenza di piante con falsi anelli (Tabelle 3), indicando una maggiore influenza di condizioni ambientali avverse sull'accrescimento radiale.

**Tabella 3** – Principali statistiche dendrocronologiche delle curve medie di incrementi radiali relative ai due laghi includendo tutte le specie campionate. Incremento corrente medio di raggio (M.ICR)  $\pm$  deviazione standard (SD), Gleichläufigkeit (Glk – Schweingruber 1988), sensitività media (SM), autocorrelazione di primo (AC1), calcolati sulle cronologie grezze; intercorrelazione seriale (R.bt) e EPS (*Expressed Population Signal*) calcolati sulle cronologie standardizzate. Valori percentuali di falsi anelli (FA) riferiti sia ai singoli alberi che agli stessi anelli.

	<i>Bracciano</i>	<i>Martignano</i>
Intervallo di tempo (N° anni)	1974-2018 (45)	1995-2018 (24)
N° carote/N° alberi	63/59	43/40
M.ICR $\pm$ SD (mm)	6.9 $\pm$ 3.8	12.1 $\pm$ 6.7
Glk	0.58	0.58
SM	0.419	0.421
AC1	0.40	0.38
r.bt	0.45	-
EPS	0.95	-
Alberi con FA (%)	71.2	26.2
Anelli con FA (%)	9.4	2.9



**Figura 5** – Andamento delle cronologie medie di incrementi anulari della vegetazione forestale ripariale dei due laghi. In basso è riportato l'andamento del numero di piante incluse nelle cronologie medie di Bracciano (B) e Martignano (M).

A parte le differenze quantitative, le dinamiche di crescita tra le due curve medie di accrescimento radiale sono molto simili, soprattutto nell'ultimo decennio (Figura 5). Le correlazioni (esprese dal test statistico non parametrico *rho* di Spearman) tra le curve medie della vegetazione forestale ripariale dei due laghi passano da 0.48 ( $p < 0.05$ ) per l'intero periodo comune a 0.91 ( $p < 0.001$ ) nell'ultimo decennio.

### **Analisi delle relazioni clima accrescimento**

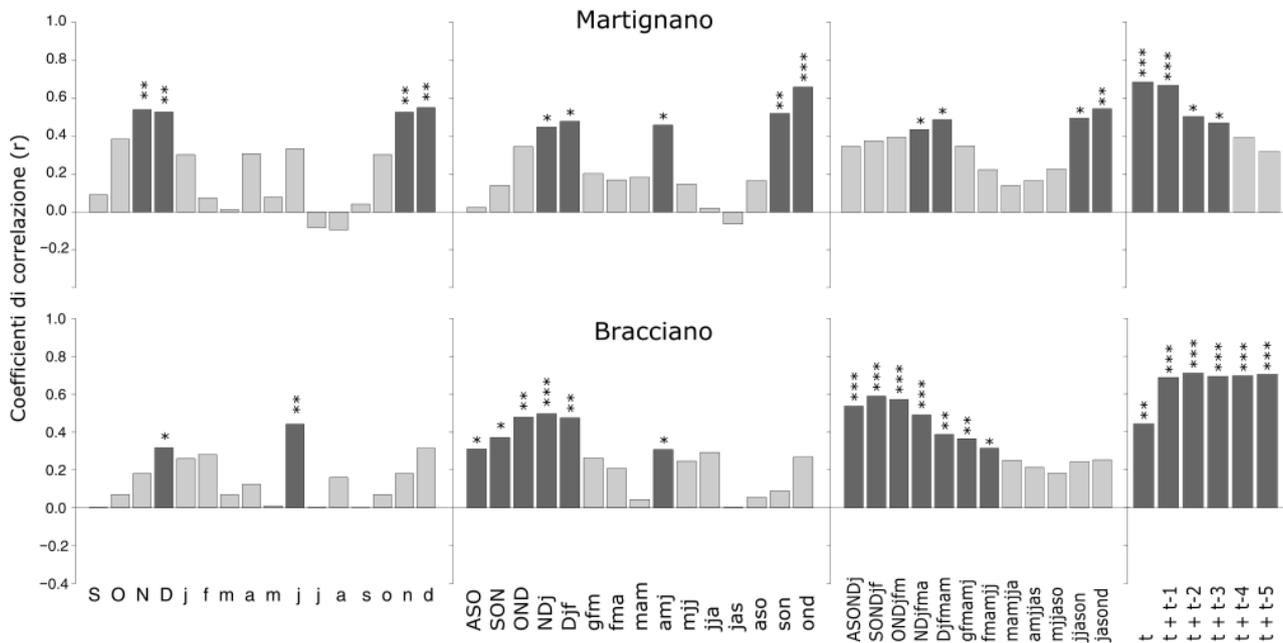
L'analisi delle correlazioni tra incremento radiale e variabili climatiche ha indicato le precipitazioni e l'indice di aridità SPEI quali principali "drivers" dell'accrescimento delle specie ripariali forestali oggetto di studio.

Per quanto riguarda l'effetto della precipitazione, in entrambi gli ecosistemi forestali ripariali è stata osservata una influenza comune della pioggia mensile e stagionale precedente all'anno di formazione dell'anello. In particolare Dicembre, Novembre-Dicembre ed il periodo tardo autunnale - invernale (Figura 6). Entrambe le cronologie, inoltre, sono significativamente correlate con le precipitazioni primaverili, in particolare del trimestre aprile–maggio–giugno (*amj*). Anche a scala annuale, l'effetto positivo delle piogge cumulate fino a tre anni precedenti è risultato un *pattern* comune alle due cronologie.

Nel dettaglio, però, la cronologia di Bracciano è risultata molto più sensitiva alla pioggia del mese di giugno, mentre la cronologia di Martignano alle piogge dei mesi di Ottobre e Novembre ed a quelle del periodo tardo autunnale - invernale sia dell'anno corrente che di quello precedente all'anno di formazione dell'anello. Aumentando la scala temporale delle variabili stagionali (da 3 a 6 mesi) si osserva in modo evidente l'effetto maggiormente significativo delle piogge precedenti l'anno di formazioni dell'anello nella cronologia di Bracciano. Questo *pattern* relazionale distintivo è ancora più evidente a scale annuale, infatti al contrario di Bracciano, a Martignano l'effetto delle piogge cumulate negli anni precedenti diminuisce all'aumentare del numero di anni passati consecutivi fino a non essere più significativo (Figura 6).

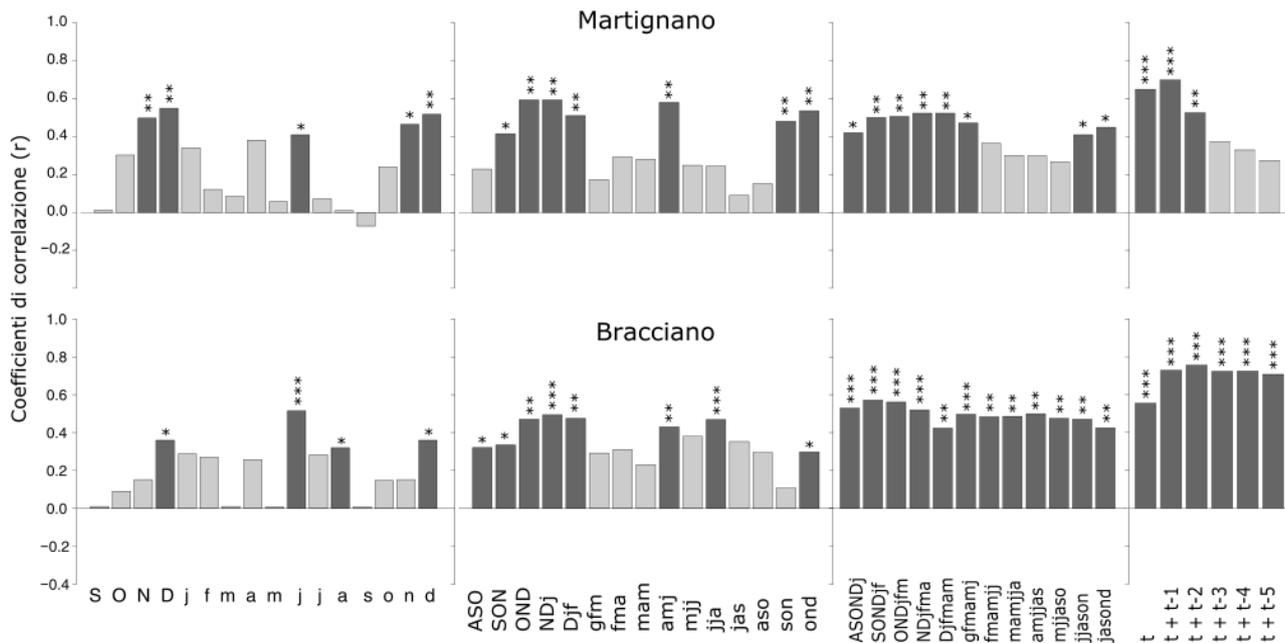
Questo potrebbe indicare che la vegetazione ripariale forestale di Bracciano, essendo più soggetta a disturbi antropici che probabilmente si riflettono maggiormente nel periodo estivo, sia particolarmente suscettibile al periodo estivo e tardo estivo–autunnale, utilizzando principalmente

la riserva idrica di falda che si accumula per la pioggia dei periodi stagionali/annuali precedenti. Al contrario, la vegetazione ripariale forestale di Martignano, meno soggetta a disturbi antropici, riesce ad utilizzare anche le piogge autunnali che innalzano il livello di falda dopo il periodo estivo, per la formazione del legno tardivo.



**Figura 6** – Coefficienti di correlazione di *Pearson* a scala mensile, stagionale (3 e 6 mesi) ed annuale, considerando sia l’anno corrente (t) che l’effetto cumulato fino a 5 anni precedenti (t + t<sub>s</sub>), tra la precipitazione e l’accrescimento radiale delle due cronologie medie della vegetazione forestale ripariale di Bracciano e Martignano. Le lettere in maiuscolo si riferiscono all’anno precedente, quelle in minuscolo all’anno corrente. (\*): p<0.05; (\*\*): p<0.01; (\*\*\*) : p<0.001.

Per quanto riguarda l’indice SPEI, si osserva un simile *pattern* tra le due cronologie (Figura 7). In più, le correlazioni con l’indice di aridità SPEI evidenziano l’effetto significativo sull’accrescimento del mese di agosto e della stagione estiva (giugno-luglio-agosto, *jja*). Questo effetto si estende anche al periodo tardo estivo-autunnale se si aumenta la scala temporale delle variabili stagionali (da 3 a 6 mesi), indicando come l’effetto di più mesi consecutivi siccitosi possa influenzare maggiormente di un singolo mese ed avere un effetto negativo sull’accrescimento radiale. Allo stesso modo, più anni siccitosi consecutivi possono avere un effetto sull’accrescimento radiale più negativo rispetto ad un singolo anno (Figura 7).



**Figura 7** – Coefficienti di correlazione di *Pearson* a scala mensile, stagionale (3 e 6 mesi) ed annuale, considerando sia l’anno corrente (t) che l’effetto cumulato fino a 5 anni precedenti ( $t + t_{-5}$ ), tra l’indice SPEI e l’accrescimento radiale delle due cronologie medie della vegetazione forestale ripariale di Bracciano e Martignano. Le lettere in maiuscolo si riferiscono all’anno precedente, quelle in minuscolo all’anno corrente. (\*):  $p < 0.05$ ; (\*\*):  $p < 0.01$ ; (\*\*\*) :  $p < 0.001$ .

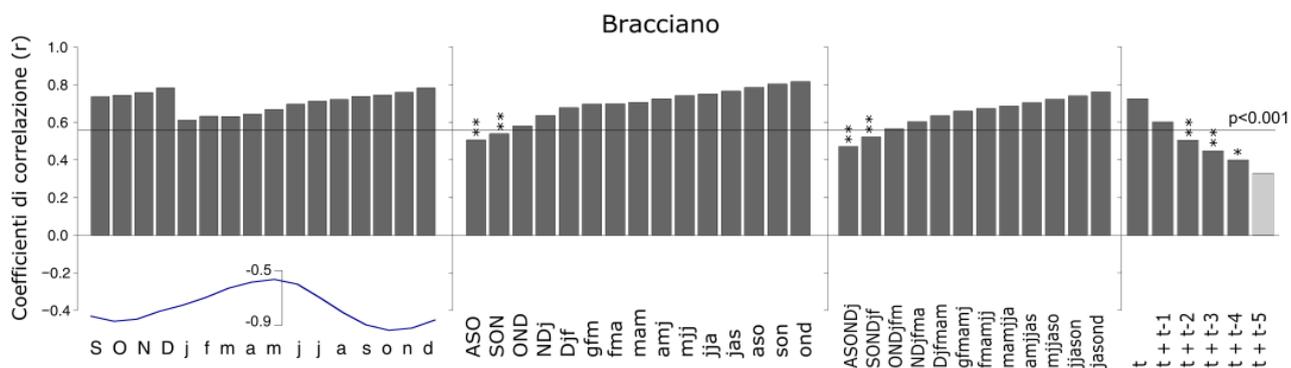
### Effetto delle variazioni del livello idrometrico sull’accrescimento (Bracciano)

Come atteso, l’effetto del livello idrometrico del lago sull’accrescimento radiale della vegetazione ripariale forestale è risultato altamente significativo a tutte le scale temporali (Figura 8). In particolare la variabilità dell’accrescimento è risultata molto sensibile alle variazioni del livello idrometrico soprattutto a scala mensile ed intrannuale (3-6 mesi), indicando una risposta rapida anche a fluttuazioni del livello idrometrico nel breve termine (es. mensile).

A scala stagionale, il livello idrometrico aumenta nel periodo primaverile e poi diminuisce nel periodo estivo fino a raggiungere un valore minimo in autunno intorno al mese di ottobre (Figura 8). Proprio nel periodo autunnale, l’accrescimento radiale è risultato molto sensibile alle variazioni del livello idrometrico, sia dell’anno precedente che di quello corrente (Figura 8).

A scala annuale, l’effetto degli anni precedenti diminuisce all’aumentare del numero di anni passati consecutivi fino a non essere più significativo (Figura 8).

L'analisi della regressione lineare multipla attraverso un modello additivo e includendo le variabili di precipitazione, SPEI e livello idrometrico più correlate a scala mensile, stagionale ed annuale, ha evidenziato la maggiore influenza delle variazioni del livello idrometrico sull'accrescimento rispetto alle variabili climatiche.



**Figura 8** – Coefficienti di correlazione di *Pearson* a scala mensile, stagionale (3 e 6 mesi) ed annuale, considerando sia l'anno corrente (t) che l'effetto cumulato fino a 5 anni precedenti (t + t<sub>5</sub>), tra il livello idrometrico minimo e l'accrescimento radiale della cronologia media della vegetazione forestale ripariale di Bracciano. Le lettere in maiuscolo si riferiscono all'anno precedente, quelle in minuscolo all'anno corrente. (\*): p<0.05; (\*\*): p<0.01; i valori sopra la linea continua sono significativi con p<0.001. La linea blu con la relativa scala nel grafico delle correlazioni mensili indica l'andamento medio mensile del livello idrometrico minimo.

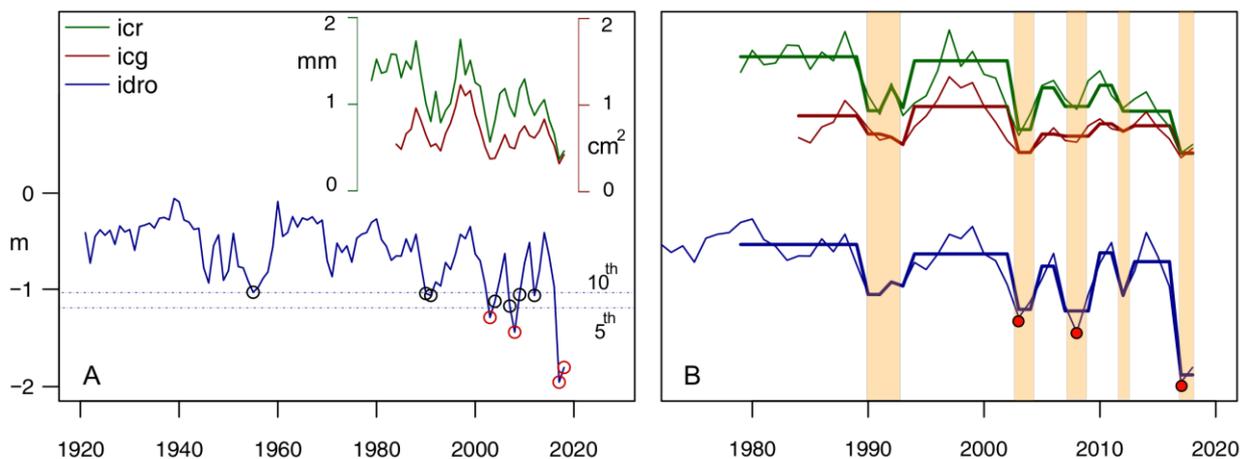
Per valutare l'effetto del livello idrometrico critico sull'accrescimento radiale, è stata quantificata la riduzione e la capacità di recupero rispetto ai valori pre-livello critico. Dopo aver identificato nel periodo comune (1979-2019) i livelli critici (LC) come quei valori sotto il 10<sup>th</sup> percentile ed estremamente critici (successivamente in grassetto) sotto il 5<sup>th</sup> (Figura 8), ossia: 1990, 1991, **2003**, 2004, 2007, **2008**, 2012, **2017** e **2018**, per quantificare il loro effetto sulla crescita sono stati utilizzati i seguenti indici percentuali di variazione dell'accrescimento (GC – *growth change*):

- GC1: anno critico *versus* periodo precedente:  $[(LC_0 - LC_{pre})/LC_{pre}] \times 100$ ,
- GC2: periodo post- anno critico *versus* anno critico:  $[(LC_{post} - LC_0)/LC_0] \times 100$ ,
- GC3: periodo post- anno critico *versus* periodo pre- anno critico:  $[(LC_{post} - LC_{pre})/LC_{pre}] \times 100$ ,

dove LC<sub>0</sub> è l'anno con il livello idrometrico critico, LC<sub>pre</sub> e LC<sub>post</sub> sono rispettivamente i periodi precedenti e successivi all'anno critico.

Tali indici sono stati derivati da alcuni esempi presenti in letteratura basati su altri eventi di disturbo quali la siccità (Martín-Benito et al. 2008) e adattati a questo caso di studio.

Come si evince dalla Figura 9, il livelli minimi del 1990-91 hanno determinato una riduzione significativa dell'accrescimento radiale (GC1: -40.0 %) che si è comunque successivamente incrementato del 45.4 % (GC2) e rispetto al periodo precedente si è ridotto solo del 7.9 % (GC3). L'impatto del 2003, pur avendo ridotto del 58.8% (GC1) l'accrescimento radiale, non ha influenzato la capacità di recupero dell'accrescimento radiale stesso (GC2: +62.5), che però rispetto al periodo precedente il livello critico è diminuito del 31.3 % (GC3). Considerando il successivo anno estremamente critico, ossia il 2008, la riduzione dell'accrescimento radiale è stata più contenuta rispetto al 2003 (GC1: 18.2%) anche la capacità di recupero è stata molto più bassa (GC2: +16.5) ed è rimasto molto simile rispetto al tasso di crescita del periodo precedente. Per quanto riguarda l'evento più critico in assoluto (il 2017), la riduzione dell'accrescimento radiale è stata del 60.7% (GC1). Non è stato, però, possibile calcolare la capacità di recupero dell'accrescimento ed il tasso di crescita rispetto al periodo precedente a causa di un solo anno disponibile successivo.



**Figura 9 – (A)** Andamento del livello idrometrico minimo annuale e degli incrementi correnti di raggio (icr) e area basimetrica (icg). I pallini indicano i valori sotto il 10<sup>th</sup> (neri) e 5<sup>th</sup> (rossi) percentile. **(B)** Valori medi di accrescimento e livello idrometrico minimo nei periodi prima e dopo i valori minimi individuati dai percentili (aree ombreggiate). I pallini rossi indicano i livelli minimi considerati potenziali soglie critiche.

Nel periodo 2007-2016, la cronologia media degli incrementi radiali della vegetazione forestale ripariale di Bracciano è risultata correlata in modo significativo con le principali variabili del bilancio idrico del Lago di Bracciano dedotti dalle Tabelle 3 e 4 presenti in Boni et al. 2017, in particolare con i prelievi ACEA diretti dal Lago e l'evaporazione media annua dello specchio d'acqua. La seguente Tabella 4 riassume i principali risultati.

**Tabella 4** – Coefficienti di correlazione non parametrica di *Spearman* tra gli incrementi anulari della cronologia media della vegetazione forestale ripariale di Bracciano e le principali variabili del bilancio idrico del Lago di Bracciano dedotti dalle Tabelle 3 e 4 presenti in Boni et al. 2017. P: pioggia media annua; EV<sub>1</sub> e EV<sub>2</sub> :evaporazione media annua dello specchio d'acqua valutata rispettivamente con le formula di Visentini (1937) e di Dragoni (1994); R<sub>1</sub> e R<sub>2</sub>: riserva idrica all'equilibrio; Pr: prelievi ACEA diretti dal Lago per uso idropotabile e non. (\*): p<0.05; (\*\*): p<0.01.

(rho)	Anno t	Anno t <sub>-1</sub>
P (Mm <sup>3</sup> /anno)	0.49	0.83**
EV <sub>1</sub> (Mm <sup>3</sup> /anno)	-0.72*	-0.78*
EV <sub>2</sub> (Mm <sup>3</sup> /anno)	-0.84**	-0.73*
R <sub>1</sub> (Mm <sup>3</sup> /anno)	0.55	0.83**
R <sub>2</sub> (Mm <sup>3</sup> /anno)	0.55	0.88**
Pr (Mm <sup>3</sup> /anno)	-0.66*	-0.83**

## Conclusioni

Confrontando la vegetazione forestale ripariale dei due sistemi lacustri, appare evidente la maggiore presenza di disturbi esterni nel lago di Bracciano, come dimostra il tasso di crescita notevolmente superiore nonché la maggiore presenza di falsi anelli rispetto ai campioni legnosi prelevati a Martignano.

Per quanto riguarda il lago di Bracciano, la variazione del livello idrometrico è risultata la principale variabile correlata con l'accrescimento radiale della vegetazione forestale ripariale. Nel dettaglio, i valori minimi registrati nel 2003 (-1.29) e nel 2008 (-1.44) hanno esercitato un impatto negativo sugli incrementi radiali delle specie forestali ripariali, o per la riduzione dell'accrescimento nell'anno corrente o per la ridotta capacità di recupero successiva. Riguardo al livello del 2017 (-1.95), che ha comunque determinato una notevole riduzione dell'accrescimento, sarebbe interessante effettuare un secondo monitoraggio per poter valutare l'impatto negli anni successivi.

Infine, la correlazione altamente significativa tra l'accrescimento e alcune tra le principali variabili del bilancio idrico del lago, evidenziano come la vegetazione forestale ripariale sia molto sensibile alle variazioni di una o più componenti dell'intero sistema. La relazione significativa con l'evaporazione dello specchio d'acqua potrebbe anche essere un interessante variabile per capire l'influenza del lago sulla vegetazione forestale retrostante come ad esempio la cerreta e la faggeta termofila, e quindi la loro capacità di adattamento ai cambiamenti climatici.

In sintesi, è possibile indicare nel valore di circa -1.18 m del livello idrometrico come soglia critica per lo stato di salute, valutato in termini di dinamica dendroauxometrica, della vegetazione forestale ripariale del lago di Bracciano. Tale soglia corrisponde alla media tra il valore minimo non critico del 1991 e quello critico del 2003 in termini di riduzione e successivo recupero dell'accrescimento radiale.

## Bibliografia

- Battipaglia G, Campelo F, Vieira J, Grabner M, De Micco V, Nabais C, Cherubini P, Carrer M, Bräuning A, Cufar K, Di Filippo A, García-González I, Koprowski M, Klisz M, Kirilyanov AV, Zafirov N, de Luis M (2016). Structure and Function of Intra–Annual Density Fluctuations: Mind the Gaps. *Front. Plant Sci.* 7: 355-362. doi: 10.3389/fpls.2016.00595
- Biondi, F., Qeadan, F., 2008. A theory-driven approach to tree-ring standardization: defining the biological trend from expected basal area increment. *Tree-Ring Res.* 64 (2):81–96.
- Carrer M., Unterholzner L., Castagneri D. (2018). Wood anatomical traits highlight complex temperature influence on *Pinus cembra* at high elevation in the Eastern Alps. *International Journal of Biometeorology*, 62(9): 1745-1753. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1577-4>
- De Micco V, Battipaglia G, Brand WA, Linke P, Saurer M, Aronne G, Cherubini P. (2012). Discrete versus continuous analysis of anatomical and  $\delta^{13}C$  variability in tree rings with intra-annual density fluctuations. *Trees* 26: 513-5224. DOI 10.1007/s00468-011-0612-4.
- Gärtner H, Nievergelt D (2010) The core-microtome. A new tool for surface preparation on cores and time series analysis of varying cell parameters. *Dendrochronologia* 28: 85–92. Doi: 10.1016/j.dendro.2009.09.002
- Gärtner H, Schweingruber F.H. (2013). *Microscopic Preparation Techniques for Plant Stem Analysis*. Verlag Dr. Kessel, Remagen-Oberwinter: 78 p. ISBN: 978-3-941300-76-7
- Gärtner Holger, Cherubini P., Fonti P., von Arx G., Schneider L., Nievergelt D., Verstege A., Bast A., Schweingruber F.H., Büntgen U. (2015). A Technical Perspective in Modern Tree-ring Research - How to Overcome Dendroecological and Wood Anatomical Challenges. *Vis. Exp.* (97), e52337, doi:10.3791/52337
- Gholami V., Chau K.W., Fadaee F., Torkaman J., Ghaffari A., 2015. Modeling of groundwater level fluctuations using dendrochronology in alluvial aquifers. *Journal of Hydrology* 529: 1060–1069
- Martín-Benito, D., Cherubini, P., del Río, M., Cañellas, I., 2008. Growth response to climate and drought in *Pinus nigra* Arn. trees of different crown classes. *Trees – Struct. Funct.* 22, 363–373.
- Polacek D., Kofler W, and Oberhuber W, 2006. Radial growth of *Pinus sylvestris* growing on alluvial terraces is sensitive to water-level fluctuations. *New Phytologist* 169: 299–308.
- Piermattei, A., Crivellaro, A.A., Carrer, M., Urbinati, C. (2014). The “blue ring”: anatomy and formation hypothesis of a new tree-ring anomaly in conifers. *Trees*, 29: 613-620. Doi:[10.1007/s00468-014-1107-x](https://doi.org/10.1007/s00468-014-1107-x)
- Schweingruber, F.H., 1989. *Tree rings: basics and applications of dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 273 pp.

Singer, M. B., C. I. Sargeant, H. Piegay, J. Riquier, R. J. S. Wilson, and C. M. Evans (2014), Floodplain ecohydrology: Climatic, anthropogenic, and local physical controls on partitioning of water sources to riparian trees, *Water Resour. Res.*, 50, doi:10.1002/ 2014WR015581.

Smith R.I., 1980. *Ecology and field Biology*. Harper and Row, New York, 835 pp.

van der Maaten E, van der Maaten- Theunissen M, Buras A, Scharnweber T, Simard S, Kaiser K, et al. (2015) Can We Use Tree Rings of Black Alder to Reconstruct Lake Levels? A Case Study for the Mecklenburg Lake District, Northeastern Germany. *PLoS ONE* 10(8): e0137054. doi:10.1371/journal.pone.0137054

Vicente-Serrano, S.M., Beguer'a, S., López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 23: 1696–1718.

Werf van der, G.W., Sass-Klaassen, U., Mohren, G.M.J., 2007. The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands. *Dendrochronologia* 25(2): 103-112. DOI: 10.1016/j.dendro.2007.03.004

Wetzel R.G., 1990. Land-water interfaces: Metabolic and limnological regulators. *Verhandlungen – Internationale Vereinigung fuer Theoretische und Angewandte Limnologie*, 24: 6-24.

Wheeler EA, Baas P, Gasson PE (1989) IAWA list of microscopic features for hardwood identification with an appendix on nonanatomical information. *IAWA Bull* 10:219–332

Wigley, T.M.L., Briffa, K.R., Jones, P.D., 1984. On the average value of correlated timeseries, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J. Clim.Appl. Meteorol.* 23, 201–210.

Yves Bégin 2001. Tree-Ring Dating of Extreme Lake Levels at the Subarctic–Boreal Interface. *Quaternary Research* 55, 133–139.