



ATTI  
DELLA  
SOCIETÀ TOSCANA  
DI  
SCIENZE NATURALI

MEMORIE • SERIE B • VOLUME CXXX • ANNO 2023



Edizioni ETS



FRANCO RAPETTI <sup>(1)</sup>

## IL CLIMA DELL'ALTA VALLE DEL TORRENTE SESTAIONE (1927-2022) E IL RELITTO POSTGLACIALE DI ABETE ROSSO (APPENNINO TOSCO-EMILIANO, ITALIA)

**Abstract** - F. RAPETTI, *The climate in the upper valley of the River Sestaione (1927-2022) and the postglacial relict of spruce forest (Tuscan-Emilian Apennine, Italy).*

The upper valley of the River Sestaione, running for a short stretch below the main ridge of the Tuscan-Emilian Apennine, still preserves an important floral diversity, including a postglacial relict of spruce forest along with its plant association. Such flora, which is unique all over the Apennines, has an extraordinary epiontological and environmental value (Campolino Oriented and Biogenetic Natural Reserve). Alberto Chiarugi, who first discovered the relict in the mid-thirties of the last century, already claimed that its preservation was due to the peculiar climatic conditions of the site: moderate air temperatures, high rainfall and snowfall, both responsible for maintaining soil to field capacity from September to June, apart from a break of average values showing mild water deficiency in July and August, are in fact the climatic features of the place, as shown in this research. Signs of the current climate trend, which have started to appear in some mountain areas of the Peninsula, causing some interference on the vital processes of the vegetation, must be kept under close scrutiny through the direct monitoring of the microclimate of the relict spruce forest in the upper course of the River Sestaione.

**Key words** - postglacial relict flora, spruce forest Campolino, climate upper valley River Sestaione, Tuscan-Emilian Apennine, Italy

**Riassunto** - F. RAPETTI, *Il clima dell'alta valle del Torrente Sestaione (1927-2022) e il relitto postglaciale di abete rosso (Appennino Tosco-Emiliano, Italia).*

L'alta valle del Torrente Sestaione, raccolta per un breve tratto sotto il crinale principale dell'Appennino Tosco-Emiliano, conserva una preziosa diversità floristica, che comprende un relitto postglaciale di abete rosso e dell'associato corteggio. Tali flore, uniche in tutto l'Appennino, hanno un eccezionale valore epiontologico e ambientale (Riserva Orientata e Biogenetica di Campolino). Già Alberto Chiarugi, scopritore del relitto alla metà degli anni Trenta del secolo scorso, aveva affermato che la loro conservazione fosse dovuta alle peculiari condizioni climatiche del luogo, che in questa ricerca si confermano caratterizzate dalla moderazione delle temperature dell'aria, dall'alta piovosità e nevosità, entrambe concorrenti a conservare il suolo alla capacità di campo da settembre a giugno, interrotta, nei valori medi del periodo, solo da una lieve deficienza idrica in luglio e agosto. L'attuale tendenza del clima, che in alcuni settori montani della Penisola mostra primi segnali di interferenza sui processi vitali della vegetazione, rende auspicabile il monitoraggio diretto del microclima forestale.

**Parole chiave** - flora relitta postglaciale, abete rosso Campolino, clima alta valle Torrente Sestaione, Appennino Tosco-Emiliano, Italia

### INTRODUZIONE

Fino dalla più remota colonizzazione umana della Penisola, i paesaggi naturali hanno subito profonde modificazioni. La vegetazione attuale è infatti il risultato di un lento processo di trasformazione, come testimonianza della relazione tra l'uomo e l'ambiente. Le distese forestali primigenie sono state trasformate nel tempo in boschi cedui e di alto fusto, i primi per gli usi promiscui, come il prelievo della legna da ardere, del legname di basso pregio e per il pascolo, i secondi per ricavare legname da costruzione (Agnolletti, 2020). Nell'ultimo secolo, per fronteggiare i bisogni crescenti di legname sono poi state introdotte specie aliene a rapido accrescimento, come l'Abete di Douglas (*Pseudotsuga menziesi* (Mirb.) Franco), in conformità al principio delle "analogie climatiche" (Mayr, 1906; Pavari, 1916). Una recente indagine condotta in Toscana sulla flora vascolare aliena spontaneizzata ha censito 597 specie, tra queste le naturalizzate, che comprendono entità "invadenti", "diffuse" e "infestanti", queste ultime universalmente definite "invasive" per la loro capacità di rapida e incontrollabile diffusione (Arrigoni & Viegi, 2011). Nel più recente censimento sul territorio nazionale, il numero di specie aliene assomma a 1.660 unità; in Toscana, in pochi anni, il loro numero è salito da 597 a 644 specie (Bertolucci *et al.*, 2021).

La resilienza dei sistemi forestali naturali a contrastare le modificazioni dell'ambiente, ivi comprese quelle del clima (Pignatti, 2011), li rende il luogo di elezione della biodiversità, oggi gravemente minacciata. Emerge perciò la necessità della ricerca e della salvaguardia rigorosa dei pochi lembi di foreste naturali che si sono conservate, dando inoltre impulso a progetti di ristoro degli ambienti degradati (White & Walker, 1997). In questo quadro, la scoperta anche di piccoli lembi di foreste primigenie in aree di rifugio, come la pecceta relitta postglaciale di Campolino (Chiarugi, 1936a, 1936b), assume un insostituibile significato di indirizzo alle opere di ristoro.

<sup>(1)</sup> Già Università di Pisa

Corresponding author: Franco Rapetti (rapettifranco42@gmail.com)

Nel tratto settentrionale della dorsale appenninica, dal M. Orsaro (1.831 m) al Corno alle Scale (1.945 m), sopra i 1.700 metri di altitudine, dove termina la faggeta “doveva estendersi in modo uniforme, a ricoprire tutta la dorsale, la pecceta. La vicinanza dal mare della catena [...] ha determinato la scomparsa già da tempi remoti dell’abete rosso, che è rimasto relitto nella sua posizione naturale solo al Campolino presso l’Abetone” (Ferrarini & Alessandrini, 1981-1983), quando fino alla prima metà del Seicento (1630?) l’abete rosso autoctono fu segnalato dai fratelli Baldassarre e Michele Campi (BSLU Ms. 150 sec. XVII; Seghieri *et al.*, 1987), aromataria e cultori delle scienze naturali della Repubblica Oligarchica di Lucca (Tomei & Seghieri, 1981), presso San Pellegrino in Alpe nell’alto bacino del Fiume Serchio. Circa due secoli dopo, nella seconda metà dell’Ottocento, la presenza dell’abete rosso era esclusa a Sud delle Alpi dai maggiori fitogeografi, quali Schouw (1845) e Parlatore (1867); a tale proposito quest’ultimo afferma “Manca [l’abete rosso] interamente negli Appennini, dove è qua e là coltivato ma meno dell’Abete nostrale [l’abete bianco]”. La scomparsa dell’abete rosso da “tutto l’Appennino” fu smentita meno di un secolo dopo dalle ricerche storiche e paleopalinologiche di Alberto Chiarugi (1936a, 1936b), che dimostrarono la presenza di un piccolo relitto postglaciale di *Picea abies* (L.) H.Karst. e dell’associato corteggio floristico nell’alta valle del Torrente Sestaione. Tale scoperta, che non è mai stata messa in discussione dagli studi successivi (Magini, 1972; De Philippis *et al.*, 1974; Ferrarini & Alessandrini, 1981-1983; Vescovi *et al.*, 2010), ha portato alla luce un prezioso documento della storia del popolamento forestale postglaciale nell’Appennino Settentrionale.

#### AREA DI STUDIO, FONTE DEI DATI

Le condizioni che hanno contribuito alla conservazione della pecceta relitta sono da ricercarsi principalmente nelle condizioni climatiche del luogo: “La valle del Sestaione è l’unico punto dell’Appennino, in cui la temperatura e l’umidità rappresentano due fattori, che agiscono ambedue concordemente in senso favorevole alla *Picea*” (Chiarugi, 1936b). Tali affermazioni avevano trovato supporto nei dati meteorologici della stazione di Boscolungo, non distante dalla pecceta relitta, attiva già dagli anni Venti del secolo scorso, dove furono iniziate le misure della temperatura dell’aria e delle precipitazioni.

L’area di studio è raccolta per un breve tratto sotto lo spartiacque principale dell’Appennino tra la Toscana e l’Emilia, che in questo tratto si sviluppa con un ampio arco, toccando in successione le cime Alpe Tre Potenze (1.940 m s.l.m.), Monte Gomito (1.892 m), Li-

bro Aperto (1.937 m), Cima Tauffi (1.799 m), Monte Spigolino (1.827 m), Corno alle Scale (1.975 m s.l.m.). Un arco montuoso secondario, a delimitare gli alti bacini dei torrenti Sestaione e Lima, si snoda dall’Alpe tre Potenze, M. Gomito, M. Selletta, per convergere verso Monte Torto (1.391 m), che domina sull’uscita del Sestaione dall’alta valle (Fig. 1).

Lo studio del clima si basa sui dati meteorologici di Boscolungo, che dall’inizio delle osservazioni al 1996 sono pubblicati nella Parte Prima degli Annali Idrologici dell’Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa, mentre le misure degli anni successivi, con il passaggio delle competenze in materia idrometeorologica dai Servizi Tecnici Nazionali della Presidenza del Consiglio dei Ministri alle Regioni, sono disponibili nel sito *web* del Servizio Idrologico della Regione Toscana (SIR). Negli ultimi due decenni, l’impianto delle stazioni di M. Romecchio (1.591 m), Foce a Giovo (1.674 m) e Croce Arcana (1.716 m) ha potenziato la rete di monitoraggio meteorologico dell’alto Appennino Tosco-Emiliano, che accrescono la conoscenza del clima dei crinali di questo settore montano (Pina, 1989).

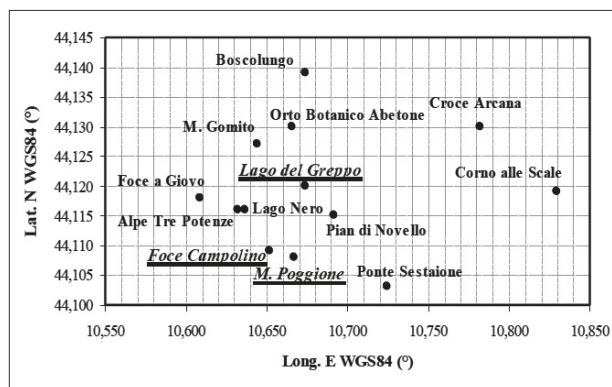


Figura 1. Quadro geografico dei luoghi e delle stazioni meteorologiche utilizzate nella ricerca.

#### CONTESTO GEOLITOLOGICO

La natura e la giacitura delle rocce del bacino del T. Sestaione hanno indirizzato gli agenti esogeni a scolpire una valle impervia ed esemplare per la forte asimmetria dei versanti. L’ambiente geolitologico è dominato dalle formazioni arenacee della parte sommitale della Falda Toscana, riconducibili al Macigno oligocenico, che immerge a Nord-Est e passa alle sovrastanti Arenarie di Monte Modino. Il Macigno è costituito da banchi arenacei grossolani di spessore compreso tra 0,5-1 metri fino a 4-5 metri, in cui è perfettamente visibile la facies gradata di origine torbidityca, costituita da sottili interstrati argilloso-siltosi al tetto del banco arenaceo, di composizione quarzoso

feldspatica, con la presenza di calcite cementante. Nell'area del M. Gomito si osserva uno stacco morfologico netto tra il Macigno e le sovrastanti Arenarie di Monte Modino, costituite da bancate di 1-2 metri di potenza e da granuli medio grossolani a disposizione tabulare. Sebbene originariamente considerate come base stratigrafica dell'Unità tettonica di M. Modino, attualmente l'insieme è interpretato come un deposito caotico messo in posto dalla gravità e in continuità stratigrafica con la formazione del Macigno, perciò considerato un esteso e potente olistostroma. Sotto il profilo tettonico è nota la successione delle falde di ricoprimento, con il Macigno al tetto della Falda Toscana, come può osservarsi poco a Est dell'area in studio. Più fasi deformative di tipo duttile hanno determinato il sovrascorrimento della Falda Toscana sulle Arenarie di Monte Cervarola e di queste sulle Arenarie del Falterona. Tale fase orogenetica è stata seguita da una rilevante e più rapida tettonica estensionale, che nel versante tirrenico dell'Appennino Centro-Settentrionale ha dato origine ai classici bacini intermontani allungati in senso appenninico (Marinelli, 1922; Mazzanti & Trevisan, 1978; Federici, 1990-1991).

#### CONTESTO GEOGRAFICO E CARATTERI MORFOLOGICI DELL'ALTA VALLE DEL T. SESTAIONE

Il Torrente Sestaione, la cui lunghezza ed area sono rispettivamente di 11,5 chilometri e 21,7 chilometri quadrati, è il principale affluente del Torrente Lima, tributario del Fiume Serchio presso Chifenti, poco a valle di Bagni di Lucca. Il reticolo idrografico del Sestaione ha origine alle pendici orientali dell'arco montuoso tra Foce di Campolino, Alpe Tre Potenze e M. Gomito; i canali dei primi ordini convergono a imbuto presso quota 1.325 m s.l.m.. Il Sestaione, dalle sorgenti fino alla quota di 1.250 m, scorre in direzione da Sud Ovest a Nord Est; segue una curva di ampio raggio che volge il corso del torrente di circa novanta gradi fino al punto di chiusura dell'alta valle; l'asta successiva, fino a Pian degli Ontani, ha direzione appenninica ed è pressoché parallela al corso del T. Lima, da cui è separata da una stretta dorsale secondaria, che da Nord a Sud si snoda dal M. Torto (1.391 m), al M. Cardoso (1.412 m), a La Serra (1.317 m) e a Cappel d'Orlando (1.042 m), per confluire nel Torrente Lima presso Ponte a Sestaione (620 m s.l.m.). L'alta valle del Sestaione, che si chiude con una strozzatura sotto il Monte Torto, presso la stazione pluviometrica di Pian di Novello, ha forma allungata in direzione Ovest-Est (8,44 × 2,59 km) e copre un'area di 8,2 km<sup>2</sup>. I versanti della destra idrografica sono poco acclivi per la giacitura a "franapoggio" delle bancate del Macigno (Fig. 2), mentre quelli

di sinistra, disposti a "reggipoggio", hanno acclività molto elevate, in alcuni tratti subverticali. Il versante in sinistra idrografica fornisce al piede un abbondante materiale litoide con frane di crollo, costituito da blocchi di varia dimensione, mentre il versante di destra è interessato in prevalenza da scivolamenti planari sugli interstrati argilloso-siltosi del Macigno, che danno luogo a sconvolgimento del suolo, con la presenza diffusa di macereti e di frane di sbarramento dei canali minori, talvolta responsabili di avvallamenti e contropendenze che possono dare origine a ristagni di acqua di breve durata, ma in alcuni casi, quando lo sconvolgimento del suolo è più profondo ed esteso, anche a piccoli laghi permanenti, come il Lago del Greppo (De Stefani, 1883). Nelle aree più elevate dell'Appennino Tosco-Emiliano sono evidenti i segni lasciati dai piccoli ghiacciai dell'ultimo acme glaciale (Würm III  $\approx$  20 ka BP), come circhi, gradini in roccia, rocce montonate e strie, depositi morenici con cordoni, massi erratici e piccoli laghi glaciali, come il Lago Piatto (1.823 m s.l.m.) e il Lago Nero (1.730 m), posti nel versante orientale dell'Alpe Tre Potenze (Federici, 2005; Federici 2020). Superato l'acme glaciale, il clima si fece più mite, anche se interrotto da brevi ma intense fasi di raffreddamento, come nel Dryas antico (15.000-12.700 BP), caratterizzato da un clima "freddo-secco", seguito dal periodo interstadiale "caldo-umido" di Bølling-Allerød (12.700-11.000 BP) (Pinna, 1996; Cortemiglia, 2012). Le fasi climatiche che seguirono determinarono la lenta risalita di una ricca vegetazione forestale sui versanti dell'Appennino Settentrionale, che al culmine dell'ultima glaciazione si era spinta fino alle aree collinari costiere delle Alpi Apuane Centro-Meridionali, come indicano i pollini e i resti fossili dell'abete rosso rinvenuti nel Lago di Massaciuccoli (Massarosa, LU) (Marchetti & Tongiorgi, 1936; Chiarugi, 1950; Tongiorgi, 1950).

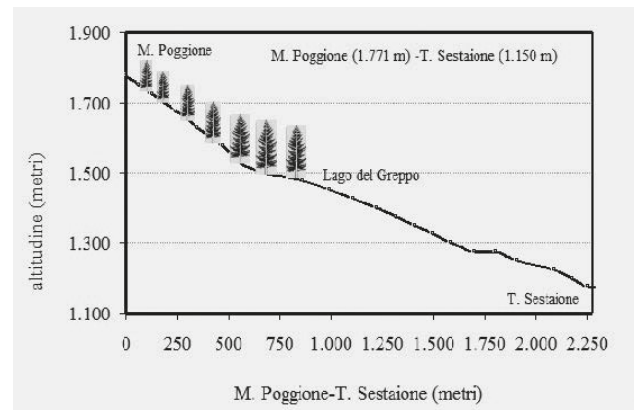


Figura 2. Profilo morfologico del versante Monte Poggione - Lago del Greppo - Torrente Sestaione.

## DISTRIBUZIONE DELL'ABETE ROSSO NELL'ALTA VALLE DEL SESTAIONE

I limiti altimetrici della pecceta relitta dell'alta valle del Sestaione sono compresi tra 1.320 e 1780 metri s.l.m., con una distribuzione alquanto frammentata: il nucleo più esteso, di circa 200 ettari, vegeta sui versanti esposti a NE sotto il crinale tra M. Poggione e Foce di Campolino (Pigello Chiarugi); scendendo di quota l'abete rosso si estende a cavallo del promontorio roccioso di Monte Fortezza (1.691 m s.l.m.), con digitazioni che si spingono verso il Sestaione, per includere il Lago del Greppo e avanza ancora più in basso; nuclei minori sono presenti in prossimità del Lago Nero (Chiarugi, 1936; Cantiani & Bernetti, 1963; Magini, 1972) (Fig. 1, Fig. 3). L'aspra morfologia del versante della riva sinistra sotto il crinale tra il M. Gomito e il Rifugio Selletta impedisce lo sviluppo della flora arborea, ma consente la vita alle associazioni rupicole, rappresentate da *Silene saxifraga*, pianta erbacea perenne a portamento cespitoso (Foggi *et al.*, 2007).

## CONTESTO CLIMATICO

La classificazione di riferimento negli studi fitosociologici è il "Worldwide Bioclimatic Classification System" (WBSC) (Rivas-Martinez, 2004, 2008; Rivas-Martinez, *et al.*, 1999, 2011), che utilizza un insieme di parametri e indici climatici secondo un sistema gerarchico, da cui si traggono le seguenti principali categorie bioclimatiche: "macrobioclima", "bioclima", "ter-

motipo" e "ombrotipo". La cartografia a piccola scala dei bioclimi d'Italia indica che le alte valli dei torrenti Lima e Sestaione ricadono nel tipo "macrobioclima temperato oceanico, con termotipo compreso tra il sopratemperato superiore e l'orotemperato inferiore e nell'ombrotipo sopraumido" (Pesaresi *et al.*, 2014). La presente ricerca è tuttavia condotta secondo i canoni della climatologia classica, che prevedono lo studio analitico dei principali elementi del clima, quali il soleggiamento, la ventosità, la temperatura dell'aria e del suolo, le precipitazioni liquide e solide, l'evapotraspirazione potenziale ed il bilancio idrico-climatico del suolo (Thorntwaite, 1948; Thorntwaite & Mather, 1957; Rapetti C. & Rapetti F., 2022).

## CLIMA DELL'ALTA VALLE DEL T. SESTAIONE

### *Soleggiamento al Monte Cimone*

La stazione di misura del soleggiamento prossima all'alto Sestaione è ubicata al Monte Cimone (2.165 m s.l.m.), la cima più elevata dell'Appennino Settentrionale, posta a Nord dell'alto Sestaione a circa 10 chilometri di distanza, che domina a giro d'orizzonte su un vastissimo territorio. La stazione, gestita dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare (AM) in collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), è inserita nel programma internazionale *Global Atmosphere Watch* (GAW) dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO). Sulla vetta del M. Cimone il soleggiamento reale annuale (Fr) (numero di ore giornaliere, mensili, annuali in cui la radiazione solare,

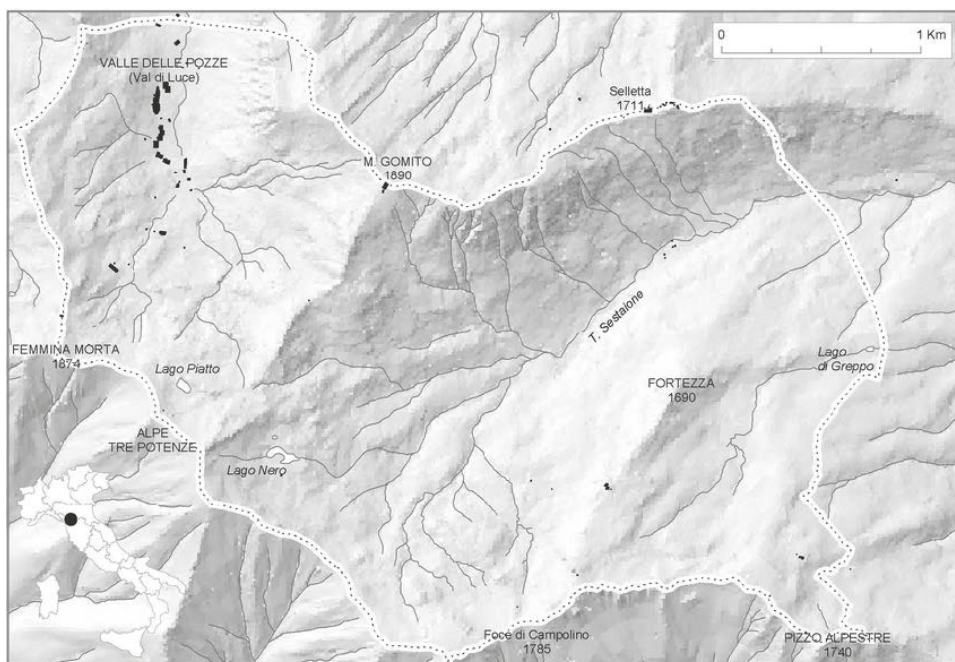


Figura 3. Morfologia dell'alta Valle del Torrente Sestaione: i toni del grigio mettono in risalto l'elevata asimmetria morfologica dei versanti della riva sinistra e della riva destra del Torrente Sestaione (Foggi *et al.*, 2007).

misurata con un pireliometro registratore ad inseguimento solare è maggiore di  $120 \text{ W} \times \text{m}^{-2}$  (WMO), ha raggiunto 1.780 ore annuali (1961-1990), in confronto alle 2.349 ore registrate a Pisa e alle 2.076 ore a Bologna, perciò molto basso in rapporto alla latitudine e alla posizione dominante. I versanti e la cima del M. Cimone, a causa delle correnti instabili di provenienza atlantica e del potente effetto orografico determinato dalla loro stessa presenza, sono infatti interessati da una copertura nuvolosa intensa e persistente, soprattutto in alcuni mesi dell'anno, come indica il regime annuale del soleggiamento relativo ( $F\% = Fr/Fa \times 100$ ), che ha una distribuzione bimodale, con valori minimi in primavera e in autunno, seguendo le fluttuazioni in latitudine del piano del fronte polare, cui si associano alti gradi di nuvolosità. Il regime annuale della radiazione solare globale (diretta + diffusa) ha lo stesso andamento del soleggiamento, con una lenta fase di crescita fino all'estate e una più rapida decrescita nel secondo semestre dell'anno (Fig. 4). Tali valori non possono tuttavia essere trasferiti semplicemente così all'alto Sestaione, poiché sia il soleggiamento, sia la radiazione solare globale che illuminano i versanti, soprattutto alle quote più basse, come al Lago del Greppo, non possono che essere molto minori, soprattutto nei mesi di "sole basso" del semestre freddo, sia per gli ingombri orografici che si frappongono all'illuminazione diretta, sia per la schermatura forestale, mentre nell'alto versante di Campolino ("Pigiletto Chiarugi") i valori possono stimarsi poco diversi. Lo sviluppo dell'abete rosso è favorito da una elevata illuminazione, perciò nel bosco misto con il faggio e

l'abete bianco subisce la competizione di queste specie per la luce solare, mentre negli alti versanti, oltre i 1.500-1.600 metri, la selezione climatica che lo favorisce elimina ogni forma di competizione.

#### Temperatura dell'aria a Boscolungo

I rilevamenti della temperatura dell'aria furono iniziati il 1° gennaio 1927 presso la sede del Corpo Forestale dello Stato di Boscolungo, posto nel versante toscano della Strada Statale 12 dell'Abetone e del Brennero, a breve distanza dal passo appenninico. Le misure subirono una prima interruzione nei primi mesi del 1930, per riprendere nel 1931 fino al 1943, quando seguì la sospensione dal 1944 al 1947; nell'anno successivo furono nuovamente riprese fino al 2004 (i dati dal 1997 al 2004 sono inediti e conservati presso il SIR di Pisa). L'ultima interruzione, molto grave per la continuità delle misure, si protrasse dal 2005 al 26 ottobre 2017 (Rapetti C. & Rapetti F., 2022). Il catalogo termometrico di Boscolungo è perciò molto frammentato; presenta inoltre una netta anomalia positiva tra il 1960 e il 1971, che non trova riscontro in altre stazioni dell'Appennino Toscano, né prossime all'area di studio, come a San Marcello Pistoiese (623 m s.l.m.), né distanti, come a Vallombrosa (980 m s.l.m.) nel Pratomagno (Rapetti, 2019). La frammentazione rende pressoché impossibile la valutazione della "omogeneità non climatica" del catalogo, come pure quella dell'esistenza dei requisiti di aleatorietà ed indipendenza dei dati di osservazione (Cortemiglia, 2002). Nonostante tali limiti, costituisce l'unico documento per la definizione

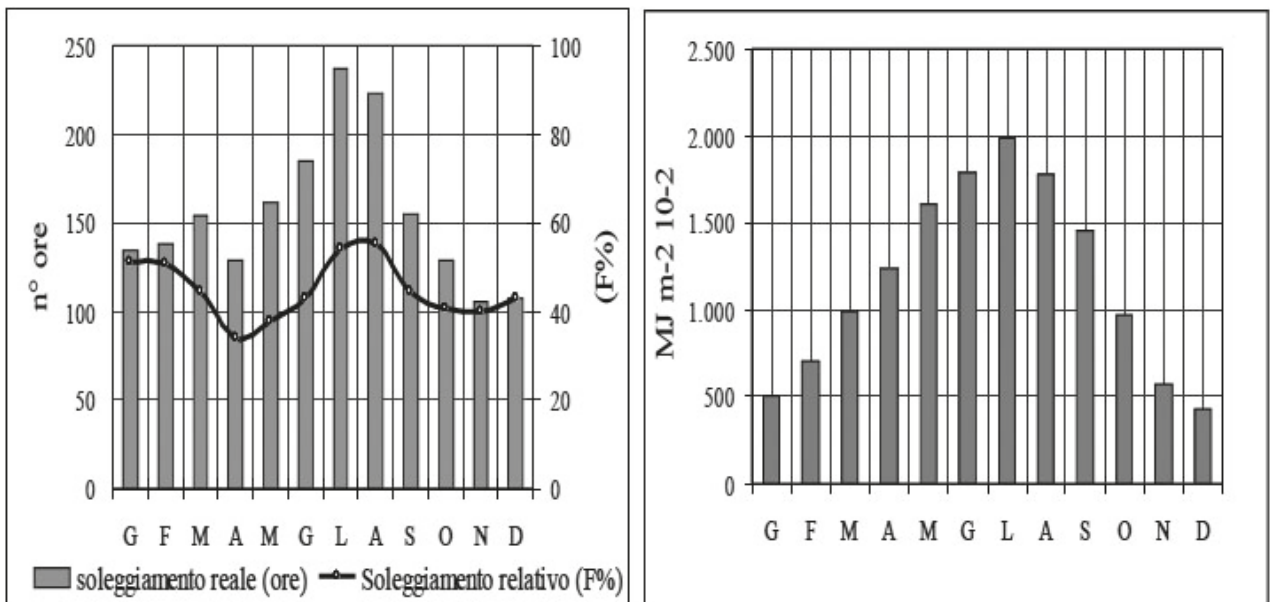


Figura 4. Soleggiamento reale e relativo e valori della radiazione solare globale ( $\text{MJ m}^{-2} 10^{-2}$ ) al Monte Cimone (2.173 m s.l.m.) nel periodo 1971-2000.

del clima termico degli alti bacini dei torrenti Lima e Sestaione, ed è perciò insostituibile per lo studio del clima della pecceta relitta.

La temperatura media annuale del periodo è stata di 6,7 °C, con il campo di variazione compreso tra 4,9 °C del 1956 e 9,8 °C del 1961, seguito da 9,2 °C del 2022 (i dati del 1961 sono sospetti per quanto sopra detto, perciò la temperatura media annuale del 2022 potrebbe costituire l'acme termico dal 1927). Il regime termico annuale ha mostrato il minimo in gennaio (-1,4 °C), seguito da febbraio e dicembre, ed il massimo in luglio (15,9 °C), seguito da agosto e giugno. I valori dell'escursione termica media mensile hanno oscillato tra 4,9 °C di dicembre e 9,9 °C di luglio, con una sostanziale simmetria tra l'andamento della fase di crescita del primo semestre e di decrescita del secondo, mentre il valore medio annuale dell'escursione ( $E_A = TVII - TI$ ) è stato di 17,4 °C (Tab. 1; Fig. 5). Il regime termico stagionale ha il valore minimo in inverno (-0,8 °C), seguito dalla primavera (5,0 °C), dall'autunno (7,6 °C) e dall'estate (14,9 °C).

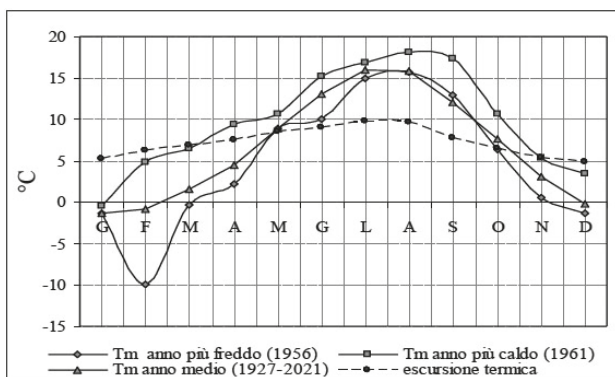


Figura 5. Regime annuale delle temperature medie dell'aria nell'anno più freddo (1956), nell'anno più caldo (1961) e nell'anno medio (°C). Regime annuale dell'escursione termica media a Boscolungo nel periodo 1927-2022.

Le temperature medie dell'autunno maggiori di quelle della primavera ( $D = +2,6$  °C) sono una caratteristica dei climi "oceanici" o di altitudine; le eccezioni hanno riguardato solo gli anni 1936, 1952, 1971, 1974. Il valore medio dell'indice termoisodromico (O) di Kerner conferma tale caratteristica del clima termico a Boscolungo:

$$O = 100 \times (T_X - T_{IV})/A$$

$T_X$  = temperatura media di ottobre,  $T_{IV}$  = temperatura media di aprile,  $A$  = escursione termica annuale.

Il valore medio dell'indice è stato di 18,3 unità, con un campo di variazione compreso tra -16,0 (1974) e 37,2 unità (1978), poco diverso dal valore medio ultrascolare di Genova (18,6 unità) (Cortemiglia, 2002). La tendenza dell'indice è pressoché stabile (+0,6 unità/10 anni), dovuta ad un debole aumento tendenziale delle

temperature medie di ottobre in confronto alla lievissima flessione di quelle di aprile.

Di particolare interesse fitoclimatico sono le temperature medie mensili delle minime e delle massime, raggiunte rispettivamente a febbraio 1956 (-13,6 °C), seguito da dicembre 1940 (-9,1 °C) e da gennaio 1942 (-8,9 °C), mentre le medie delle massime hanno riguardato agosto 2003 (25,7 °C), seguito da luglio 1950 (25,2 °C) e da giugno 2003 (24,7 °C) (Tab. 2).

#### *Temperature estreme, giorni di gelo e senza disgelo, giorni tropicali a Boscolungo*

Gli inverni 1928-1929 (-4,9 °C) e 1955-1956 (-4,2 °C) furono i più freddi del periodo, mentre i più miti caratterizzarono il 1960-1961 (2,6 °C) e il 1965-1966 (1,8 °C). L'estate più fresca e quella più calda si ebbero rispettivamente nel 1975 (12,4 °C) e nel 2003 (19,5 °C). Le temperature minime assolute hanno raggiunto -20,4 °C (15 febbraio 1956) e in più occasioni -20,0 °C (3, 13, 14 febbraio 1929 e 7, 8 gennaio 1985) (Rapetti & Vittorini, 1986); le temperature massime assolute hanno toccato 31,5 °C (14 agosto 1966 e 28 luglio 1983). L'escursione termica estrema a Boscolungo è stata perciò di 51,9 °C.

Le formazioni forestali del piano montano dell'Appennino Settentrionale sono adattate a sopportare lunghi periodi di freddo intenso e periodi più brevi di temperature elevate, tuttavia in alcuni anni il perdurare di tali condizioni può costituire un fattore di rischio per le formazioni vegetali. A Boscolungo, il numero annuale di giorni senza disgelo ( $T_{max} \leq 0$  °C) e di gelo ( $T_{min} \leq 0$  °C) fu raggiunto nel 1956, rispettivamente con 57 e 176 giorni; in quello stesso anno si ebbero anche il più alto numero di giorni consecutivi senza disgelo (27 gg., dal primo al ventisette febbraio 1956) e di gelo, con 62 giorni. A Boscolungo, i "giorni tropicali" ( $T_{max} \geq 30$  °C) costituiscono una rarità meteorologica, tanto che sono comparsi solo in sei anni, con la maggiore concentrazione nell'ultima decade del luglio 1983: dal 27 al 30. Il 28 luglio di quell'anno fu raggiunta anche la temperatura massima giornaliera dall'inizio delle osservazioni (31,5 °C) (Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa. Annali Idrologici, Parte Prima). Le gelate tardive costituiscono un grave pericolo per la vegetazione: nelle aree di pianura della Toscana Settentrionale raramente superano la prima quindicina di aprile (Rapetti & Vittorini, 1992), mentre alle quote più elevate dell'Appennino Tosco-Emiliano possono presentarsi fino alla metà di maggio, quando è iniziata la ripresa vegetativa; a Foce a Giovo (1.674 m), posta sul crinale tra M. Rondinaio e Alpe Tre Potenze, perciò alla quota degli abeti rossi di Campolino, il maggio 2019 fu particolarmente freddo rispetto alla norma; nei primi 16 giorni del mese si registrarono otto giorni di gelo e due giorni senza disgelo (15 maggio 2019:  $T_{min} = -4,3$  e  $T_{max} = -1,9$  °C) (SIR).



### Anno termico a Boscolungo

L'anno termico ha un particolare rilievo in alcuni campi della ricerca, tra cui quello fitoclimatico, poiché definisce il numero di giorni in cui la temperatura media dell'aria è minore o maggiore di determinati valori (Gazzolo & Pinna, 1969). Considerato l'ambiente montano, le temperature di riferimento sono state così graduate: -5,0°, 0,0°, 5,0°, 10,0°, 15,0 °C (Tab. 3). Il calcolo (teorico) si fonda sul fatto che alle medie latitudini i rami ascendente e discendente della curva termica annuale sono in prima approssimazione lineari, consentendo di utilizzare le temperature medie mensili in luogo di quelle giornaliere (Conrad, Pollak, 1950). Nell'anno più freddo (1956) si ebbero 118 giorni con  $T_{med} \leq 0^\circ\text{C}$ , di cui 35 con  $T_{med} \leq -5^\circ\text{C}$ ; mentre i valori di  $10^\circ$  e  $15^\circ\text{C}$  furono superati rispettivamente in 106 e 40 giorni. Nell'anno più caldo (1961) si verificarono solo 4 giorni con temperatura negativa, mentre tra i giorni "caldi", le temperature maggiori di  $10^\circ$  e  $15^\circ\text{C}$  ebbero la durata rispettivamente di 167 e 196 giorni. Nell'anno medio del periodo, le temperature negative sono state presenti dal 13 dicembre al 26 febbraio e le temperature maggiori di  $15^\circ\text{C}$  dal 4 luglio al 16 agosto (valori teorici) (Tab. 3). Le durate indicate nella tabella (Tab. 3) si riferiscono alla stazione di Boscolungo (1.340 m s.l.m.), mentre alle quote più elevate della pecceta relitta di Campolino il numero annuale di giorni "freddi" e "caldi" rispettivamente si incrementa e si riduce secondo il gradiente termico verticale (Rapetti & Vittorini, 1987).

### Classificazione del clima termico a Boscolungo

Secondo la classificazione dei climi termici italiani (Pinna, 1970), la stazione di Boscolungo ricade nel tipo *temperato-fresco* ( $T_{med}$  annuale compresa tra  $6,0^\circ$  e  $9,9^\circ\text{C}$ ;  $T_{med}$  del mese più freddo tra  $0,0$  e  $-3,0^\circ\text{C}$ ,  $T_{med}$  del mese più caldo tra  $15,0$  e  $19,9^\circ\text{C}$ , escursione termica annuale tra  $18,0$  e  $20,0^\circ\text{C}$ ). Nella Penisola il tipo *temperato-fresco* è distribuito in limitate aree dall'Appennino Ligure all'Appennino Abruzzese, con piccole aree isolate dell'Appennino Calabro e dell'Etna, mentre è molto diffuso nelle Prealpi Italiane, con le maggiori estensioni in quelle Lombarde e Venete, fino oltre il confine con la Slovenia.

### Tendenze termiche a Boscolungo

L'interruzione dei rilevamenti della temperatura dell'aria, in particolare quella tra il 2005 e il 2017, quando più intenso è stato il riscaldamento dell'atmosfera, e la netta anomalia tra il 1969 e il 1971, suggeriscono l'opportunità di un confronto con la serie termica ultracentenaria di Vallombrosa nella finestra di sovrapposizione delle misure tra il 1927 e il 2022 (Rapetti, 2019), vista la similitudine degli andamenti per lunghi periodi. A Vallombrosa, dopo la stasi relativa dal 2005 al 2011, le temperature medie annuali hanno ripreso a salire con un ritmo elevato, fino a raggiungere il massimo assoluto del catalogo nel 2022 (di  $11,3^\circ\text{C}$ ). Gli elementi disponibili autorizzano ad affermare

Tabella 1. Campo di variazione delle temperature medie mensili e annuali dell'aria e valori medi ( $^\circ\text{C}$ ) a Boscolungo nel periodo 1927-2022.

Ti	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
$T_{min}$	-6,6	-9,9	-3,1	1,0	4,4	9,3	12,7	9,5	6,3	1,6	-0,6	-5,8	4,9
data	1929	1956	1987	1929	1984	1933	1954	1975	1974	1974	1998	1940	1956
$T_{max}$	2,5	4,8	6,5	9,4	13,6	19,2	19,5	20,8	17,3	12,2	8,9	3,5	9,8
data	1962	1961	1961	1961	2003	2003	1967	2002	1961	1967	1967	1961	1961
$T_{med}$	-1,4	-0,9	1,6	4,5	9,0	13,1	16,0	15,8	12,1	7,7	3,1	-0,2	6,7

Tabella 2. Campo di variazione delle temperature medie mensili e annuali minime e massime dell'aria a Boscolungo nel periodo 1927-2022.

T	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
$T_{min}$	-8,9	-13,6	-6,3	-2,6	1,0	5,2	7,2	7,7	3,7	-1,2	-8,3	-9,1	0,6
data	1942	1956	1939	1938	1941	1933	1948	1954	1951	1974	1950	1940	1956
$T_{max}$	6,0	9,1	11,9	13,,9	18,9	24,7	25,2	25,7	22,8	17,0	10,6	6,3	14,0
data	1968	1961	1961	1961	2003	2003	1950	2003	1961	1969	1970	1961	1961

Tabella 3. Numero di giorni con  $T_{med} \leq 0$  e  $T_{med} \geq 0, 5, 10, 15^\circ\text{C}$  a Boscolungo nel periodo 1927-2022.

Anni caratteristici	$T_{med} \leq 0^\circ$	$T_{med} \geq 0^\circ$	$T_{med} \geq 5^\circ$	$T_{med} \geq 10^\circ$	$T_{med} \geq 15^\circ$
anno più freddo (1956)	118	247	175	106	40
anno più caldo (1961)	4	361	276	167	106
anno medio (1927-2022)	75	290	198	131	44

che lo stesso andamento abbia interessato Boscolungo (Fig. 6). Il regime stagionale indica che le tendenze della primavera e dell'autunno sono risultate molto deboli, mentre quelle dell'inverno sono state debolmente positive, come quelle delle temperature dell'estate, con una tendenza appena più marcata (0,17 °C/10 anni).

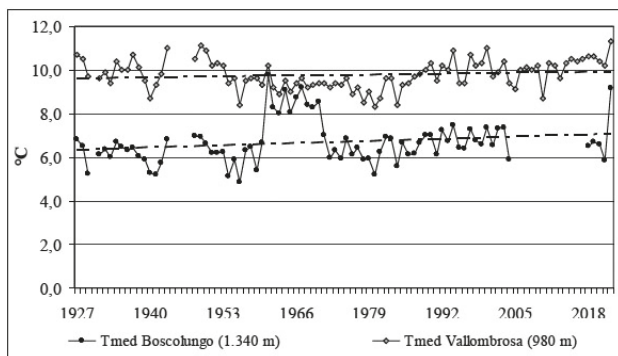


Figura 6. Confronto tra gli andamenti della temperatura dell'aria a Boscolungo e a Vallombrosa (Pratomagno) nella "finestra di sovrapposizione" delle misure 1927-2022, che mostra l'accentuata anomalia termica positiva del catalogo di Boscolungo tra il 1969 e il 1971.

## PRECIPITAZIONI TOTALI A BOSCOLUNGO E A PIAN DI NOVELLO

### *Precipitazioni totali a Boscolungo*

La misura delle precipitazioni totali (liquide + solide) a Boscolungo ebbe inizio nel 1921, per interrompersi dal gennaio 1943 al marzo 1947, quando riprese senza interruzioni fino ad oggi. Nel corso del periodo, a più riprese, gli strumenti di misura e le modalità di acquisizione dei dati subirono notevoli cambiamenti, prima con la sostituzione dei pluviometri e dei nivometri a misura giornaliera da parte dell'osservatore (alle ore 09:00), poi dei nivopluviografi meccanici a bocca riscaldata per la fusione della neve a scansione settimanale, ed infine, dal 1997, di strumenti a scansione magnetica in tempo reale e in teletrasmissione dei dati presso il Servizio Idrologico Regionale della Toscana a Pisa (SIR). La sostanziale continuità delle misure offre la possibilità di stimare l'omogeneità non climatica di questa serie con il metodo della cumulazione degli afflussi annuali, il cui esito

dimostra che, nonostante i cambiamenti intervenuti, dal 2017 anche del luogo delle misure, peraltro ora posto a breve distanza dalla primitiva sede presso il Corpo Forestale dello Stato, il catalogo pluviometrico di Boscolungo può considerarsi esente da rilevanti disomogeneità non climatiche, come attesta il valore del coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) della cumulazione delle piogge annuali, anche se nel primo periodo delle misure è osservabile un lieve ondeggiamento della cumulata intorno alla retta di regressione, di causa sconosciuta per l'assenza di notizie storiche circa il funzionamento della stazione in quegli anni (Fig. 7).

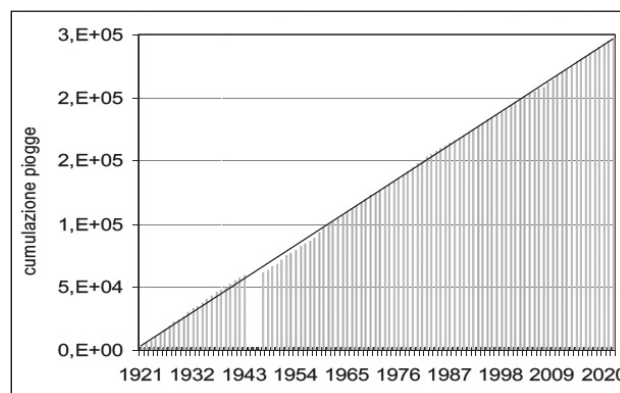


Figura 7. Cumulazione delle precipitazioni annuali a Boscolungo, a confronto con la retta di regressione nel periodo 1921-2022.

Il valore medio delle precipitazioni totali annuali è stato di 2.491,4 mm, con il campo di variazione compreso tra 1.384,4 mm (1938) e 3.959,7 mm (1960), da cui deriva il "modulo pluviometrico estremo" di 2,86, che è caratteristico delle province climatiche a media variabilità (Réménieras, 1959). Il regime annuale ha registrato gli afflussi più elevati in novembre (373,4 mm), seguito da dicembre (309,2 mm) e da ottobre (301,4 mm); il mese meno piovoso è stato luglio (69,1 mm), seguito da agosto (85,4 mm) e da giugno (114,1 mm). In due annate le precipitazioni mensili hanno superato 1.000 mm, come nel novembre 2000 (1.070,8 mm) e nel gennaio 2014 (1.004,2 mm) (Tab. 4, Fig. 8): la soglia mensile di 1.000 mm di precipitazione è eccezionalmente elevata, con pochi riscontri nel resto della Penisola.

Tabella 4. Campo di variazione delle precipitazioni totali mensili e annuali e valori medi mensili e annuali (millimetri) a Boscolungo nel periodo 1921-2022.

Valori	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
Pmin	5,6	1,6	0,0	23,4	14,2	14,0	2,1	1,2	1,8	16,6	11,4	4,4	1.384,4
data	1993	1993	1948	2007	1989	1935	1931	2001	1970	1969	1981	2015	1938
Pmax	1.004,2	750,0	826,4	553,0	399,0	327,6	237,1	343,0	697,0	919,4	1.070,8	921,4	3.959,7
data	2014	1951	1937	1989	1984	1940	1932	1977	1994	1992	2000	1959	1960
Pmed	243,6	217,3	223,4	210,9	169,7	113,3	68,6	85,3	177,3	298,8	372,2	310,9	2491,4

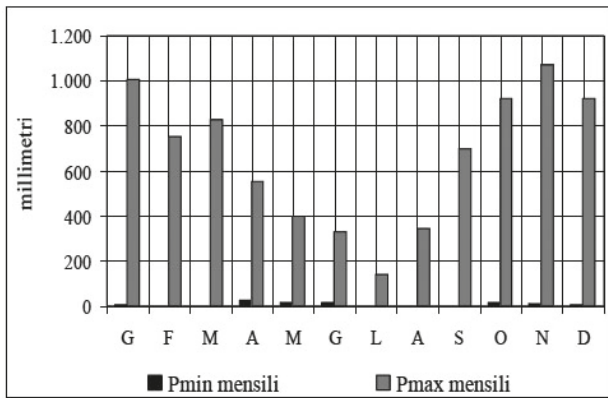


Figura 8. Campo di variazione delle precipitazioni a Boscolungo nel periodo 1921-2022.

#### Numero di giorni piovosi e senza pioggia e intensità pluviometriche a Boscolungo

Il valore medio annuale dei giorni piovosi ( $P_{gior.} \geq 1,0$  mm) è stato di 125,3 unità, con il campo di variazione compreso tra 91 (1949) e 177 giorni (1960). Il regime annuale mostra i valori minimi in luglio (6,0 gg.pp.) e in agosto (6,9 gg.pp.) e i massimi in aprile (12,7 gg.pp.) e novembre (13,3 gg.pp.). La stagione con il più alto numero di giorni piovosi è la primavera (35,8 gg.pp.), seguono l'autunno (33,8 gg.pp.), l'inverno (33,7 gg.pp.) e l'estate (21,8 gg.pp.). Il campo di variazione stagionale presenta valori estremi di 7 gg.pp. nell'estate del 2001 e 59 gg.pp. nell'autunno del 1960. Le tendenze dei singoli mesi sono pressoché nulle, con le eccezioni di gennaio (-0,17 gg.pp./10 anni) e di settembre (-0,16 gg.pp./10 anni), mentre la tendenza annuale è stimata in -0,6 gg.pp./10 anni. Tra i periodi più lunghi con assenza di precipitazioni si segnalano 36 gg.pp. tra il 19 febbraio e il 26 marzo 1938 e 41 gg.pp. tra il 14 giugno e il 25 luglio 2012. I lunghi periodi senza pioggia ( $P_{gior.} < 1$  mm), oltre a determinare una flessione del contenuto idrico del suolo, determinano una condizione di rischio per gli incendi boschivi, perciò è necessario siano accompagnati dall'attenta sorveglianza delle aree vegetate (Palmieri *et al.*, 1992; Chronopoulos & Matsoukis, 2021).

Nell'ambiente forestale, l'elevata intensità e frequenza delle piogge hanno rilievo circa la loro maggiore o minore probabilità di giungere al suolo, superando l'intreccio delle strutture vegetali, a differenza delle piogge deboli e frequenti, che per la gran parte bagnano le strutture vegetali e sono restituite all'atmosfera attraverso l'evaporazione. Le piogge intense a Boscolungo, pur non raggiungendo i valori eccezionale delle Alpi Apuane (Rapetti C. & Rapetti F. 1996), hanno frequenze elevate in rapporto a quelle di altri settori dell'Appennino: dal 1996 ad oggi si segnalano le intensità di 36,8 mm/30 min (2006), 50 mm/h (2013), 103,0 mm/3h (2012) e 285 mm/giorno (7 novembre 1997). Tra le massime precipitazioni in cinque giorni consecutivi, si segnalano ad esempio i 450,4 mm tra il 3 e il 7 novembre 2020 (SIR). L'intensità media annuale dei giorni con pioggia è stata di 19,9 mm/g.p., con un campo di variazione tra 14,3 mm/g.p. (1938) e 27,6 mm/g.p. (1925). I valori medi stagionali dell'intensità mostrano il valore massimo in autunno (25,0 mm/g.p.), seguito dall'inverno (22,4 mm/g.p.), dalla primavera (16,8 mm/g.p.) e dall'estate (12,4 mm/g.p.). Il valore medio mensile più elevato, nei 924 mesi del catalogo, è stato di 71,0 mm/g.p. (febbraio 2019), quando caddero 425,8 mm in 6 gg.pp.. Dal 1921, la soglia di 50 mm per giorno piovoso è stata superata solo in 20 mesi (2,16% di tutti i casi).

#### Siccità e umidità meteorologica a Boscolungo

Considerate le precipitazioni in un determinato intervallo di tempo (anno, stagione), la graduazione della siccità o dell'umidità meteorologica può essere calcolata con l'Indice standardizzato delle precipitazioni SPI: *Standardized Precipitation Index*;  $SPI = (\bar{X} - \bar{X}) / \sigma$ :  $\bar{X}$  (valore di un qualsiasi anno del catalogo pluviometrico),  $\bar{X}$  (valore medio del periodo),  $\sigma$  (deviazione standard dei valori argomentali) (McKee *et al.*, 1993). Gli anni di maggiore aridità meteorologica sono stati il 1938 (SPI = -2,19 unità) e il 2022 (-2,06 unità); quelli più umidi il 1960 (+2,85 unità) e il 1926 (+2,34 unità): che rappresentano le condizioni di siccità e di umidità meteorologica estreme di ricorrenza secolare (Tab. 5; Fig. 9).

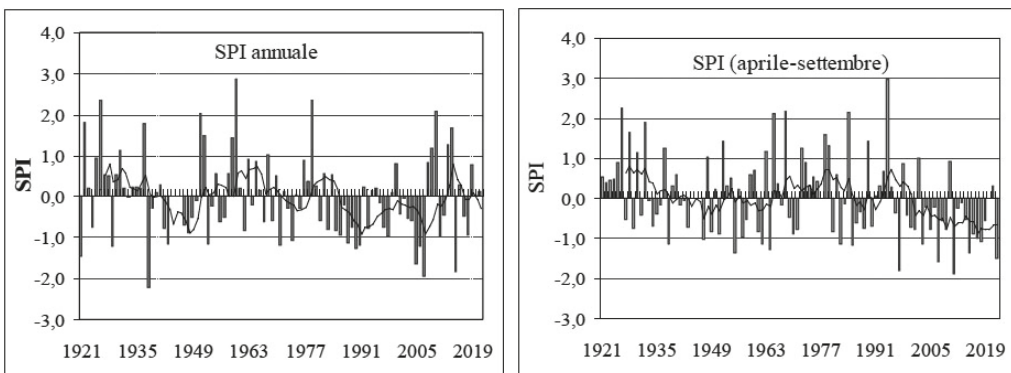


Figura 9. Andamento dei valori annuali e del semestre aprile - settembre dello SPI (media mobile di ordine sette) nel periodo 1921-2022.

Tabella 5. Valori annuali e del semestre aprile - settembre dello SPI a Boscolungo nel periodo 1921-2022.

SPI classi	Tipi	SPI annuale	SPI IV - IX
$SPI \leq -2,0$	siccità estrema	2	0
$-2,0 < SPI \leq -1,5$	siccità severa	3	4
$-1,5 < SPI \leq -1,0$	siccità moderata	10	11
$-1,0 < SPI \leq +1,0$	normalità	68	68
$+1,0 \leq SPI < +1,5$	umidità moderata	7	7
$+1,5 \leq SPI < +2,0$	umidità elevata	3	3
$SPI \geq +2,0$	umidità estrema	5	5

In alcuni campi di applicazione, l'intervallo temporale può essere ristretto, come in questa ricerca, dove lo SPI è calcolato anche sui valori del semestre aprile-settembre, quando nella media montagna appenninica le necessità idriche della vegetazione sono più elevate. L'andamento interannuale dello SPI da aprile a settembre mostra una accentuata flessione dal 1994 al 2022, evidenziata dalla media mobile di ordine sette (Tab. 5; Fig. 9).

#### Regime pluviometrico stagionale a Boscolungo

Nei valori medi del periodo, la stagione più piovosa è stata l'autunno (852,8 mm, 34,2% del totale annuale), seguita dall'inverno (768,8 mm, 30,8%), dalla primavera (607,1 mm, 24,3%) e dall'estate (268,6 mm, 10,8%). Secondo il sistema di classificazione dei regimi pluviometrici stagionali adottato in questa ricerca<sup>1</sup>, nei 98 anni delle osservazioni, in 54 il massimo pluviometrico stagionale si è verificato in autunno, in 31 in inverno, in 13 in primavera, mentre il massimo estivo, che è caratteristico dei regimi continentali, non si è mai presentato. Nel complesso sono stati osservati undici tipi di regime, alcuni rari, come i tipi PAEI (1989) e IAEP (1968, 1976); le frequenze più elevate hanno invece interessato i tipi AIPE ("submediterraneo") e APIE ("sublitoraneo"), presenti rispettivamente in 24 e 22 anni e, nettamente subordinato, il tipo PIAE (6 anni).

#### Tendenze pluviometriche a Boscolungo

L'assenza di rilevanti "disomogeneità non climatiche" nel catalogo pluviometrico di Boscolungo consente una corretta valutazione degli andamenti e della tendenza (Cortemiglia, 2002). Rapide oscillazioni positive si sono alternate a periodi prolungati

di flessione, come tra il 1936 e il 1960. Negli anni che seguirono, dopo un periodo di relativa stabilità, databile tra il 1960 e il 1985, ebbe inizio una flessione che si protrasse fino al 2007, mentre nell'ultimo quindicennio si rileva una marcata instabilità delle precipitazioni, con oscillazioni positive, come negli anni 2010 (3.551,8 mm), 2014 (3.331,6 mm) 2019 (3.219,2 mm) e negative, come negli anni 2007 (1.511,8 mm), 2015 (1.565,0 mm) e 2022, anno in cui si è toccato il minimo secondario del catalogo (1.438,0 mm). Nel complesso la tendenza è negativa (28 millimetri/10 anni). Le precipitazioni dell'autunno mostrano oscillazioni rapide, intense e ripetute, talvolta da un anno all'altro, con la tendenza negativa di 13,8 mm/10 anni, mentre quelle estive, sia pure in debole flessione (5,5 mm/10 anni), hanno avuto un andamento più regolare (Fig. 10).

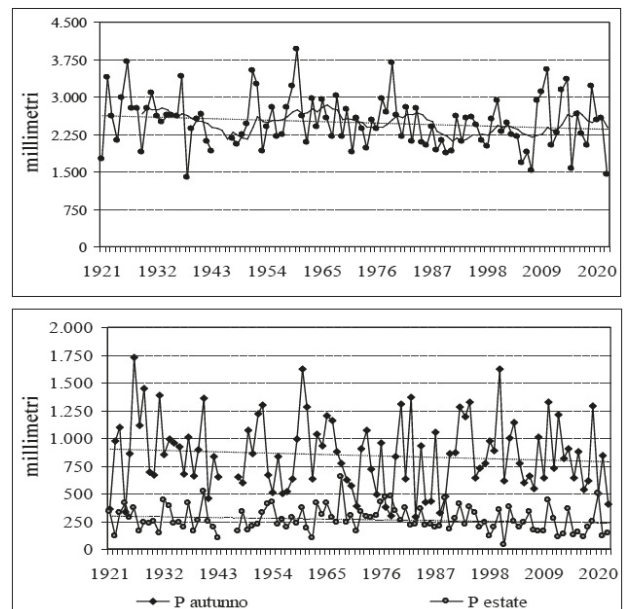


Figura 10. Andamento delle precipitazioni annuali (sopra), dell'autunno e dell'estate a Boscolungo nel periodo 1921-2022 (sono indicate le rette di tendenza e l'andamento delle medie mobili di ordine nove).

<sup>1</sup> Secondo il sistema di classificazione dei regimi pluviometrici stagionali adottato in questa ricerca, le combinazioni possibili sono ventiquattro, che si ottengono dalla permutazione delle iniziali delle stagioni ( $n! = n \times (n - 1) \times (n - 2)$ ): EAPI, EPAI, EPIA, EAIP, AEPI, AEIP, PAEI, PEAI, APEI, EIAP, EIPA, PEIA, PAIE, PIEA, PIAE, APIE, AIPE, AIEP, IAPE, IAEP, IPAE, IPEA, IEAP, IEPA (Pinna & Vittorini, 1985).

### *Nevosità a Boscolungo*

La copertura nevosa del suolo ha un ruolo importante nella conservazione dei boschi mesofili dell'Appennino Settentrionale, per la riserva di umidità che garantisce nei periodi di siccità meteorologica della tarda primavera e dell'estate, ma che può presentarsi anche nel semestre freddo quando l'assenza prolungata delle precipitazioni è accompagnata da venti di forte intensità, che hanno un eccezionale potere essiccante, e da bassi valori dell'umidità relativa dell'aria ( $U\%$ ), che a Boscolungo mostrano rapide ed intensissime variazioni in brevi intervalli di tempo (SIR). Le basse temperature dell'aria del semestre freddo rendono generalmente lenti i processi di fusione delle neve, così che nelle primavere più fresche e nevose la copertura del suolo può conservarsi fino alla tarda primavera.

La quantità di neve che può essere raccolta e trattenuta dalle strutture vegetali dell'abete rosso è considerevole, anche se le osservazioni dendrologiche condotte nella pecceta relitta dell'alto Sestaione mostrano significative differenze interspecifiche, che riguardano la forma della chioma e il portamento dei ramuli: si osservano infatti esemplari con chiome appressate e ridotte ed altri con chiome slanciate ed espanse, e la coesistenza di forme riferibili ai tipi estremi *Kammefichte* e *Plattenfichte*, oltre ad una varietà di forme intermedie, che presentano una distribuzione altitudinale probabilmente dovuta alla selezione climatica (Magini, 1972; De Philippis *et al.*, 1974).

L'alto Appennino Tosco-Emiliano, sia nel versante toscano, sia in quello emiliano, è sede di una elevata nevosità annuale (Zanella, 1978), non di rado superiore a quella di alcuni settori alpini (Ministro LL.PP. Servizio Idrografico, 1973), anche se negli ultimi anni si è fortemente ridotto sia il numero di giorni nevosi, sia quello degli spessori annuali cumulati di neve caduta e la durata di copertura nevosa del suolo. Le osservazioni nivometriche coprono il periodo 1951-2004: dal 2005 al 2017 tali osservazioni, come quelle della temperatura dell'aria, furono sospese, per essere riprese nella seconda metà del 2017.

Il numero medio annuale dei giorni con precipitazione nevosa ( $N^\circ$ ) ha raggiunto 29,9 unità, con il campo di variazione compreso tra 9 (2002) e 55 giorni (1979). La frequenza media più elevata delle nevicate si è verificata in gennaio (6,4 giorni), seguita da febbraio (6,3 giorni) e da marzo (5,2 giorni). Nell'autunno, le prima neve è comparsa all'inizio di ottobre, con la frequenza massima di 3 giorni (in vari anni), mentre le nevicate tardive non hanno superato la metà di maggio (fino a 2 giorni). Il numero di giorni nevosi mostra una tendenza negativa, con una fase di elevata nevosità nei primi anni Cinquanta e tra la fine degli anni Settanta e i primi anni Ottanta del secolo scorso, seguita da una rapida diminuzione fino al 2002, quando si è toccato il valore minimo del periodo di solo 9 giorni nevosi,

seguito da una modesta ripresa nel biennio 2003-2004, quando le misure sono state interrotte (Tab. 6, in alto). Lo spessore cumulato annuale della neve è stato di 331 cm, con il campo di variazione compreso tra 97 cm (2002) e 648 cm nel 1980. Gli accumuli mensili più ingenti si sono verificati in gennaio (76 cm), seguito da febbraio (72 cm) e da marzo (65 cm); nell'autunno e all'inizio dell'inverno si segnalano i valori medi di 2 cm in ottobre, 23 cm in novembre e 51 cm in dicembre. La tendenza dello spessore cumulato della neve mostra tre notevoli picchi positivi dalla fine degli anni Sessanta alla metà degli anni Ottanta del secolo scorso, cui è seguito un periodo di forte riduzione, fino ai 97 cm del 2002 (Tab. 6, al centro).

La durata del manto nevoso presso il suolo è il parametro nivometrico più significativo per la conservazione delle specie mesofile, poiché stabilizza le temperature del semestre freddo e assicura umidità al suolo e all'aria. Il valore medio annuale della copertura nevosa del suolo è stato di 142 giorni, con il campo di variazione compreso tra 84 giorni nel 1989 e 197 giorni nel 1980. La durata media mensile più elevata si è osservata a marzo (30 giorni), seguita da febbraio (27 gg.) e da gennaio (28 gg.); in autunno, quando la temperatura del suolo è ancora piuttosto elevata (Falcini & Rapetti, 2002), la permanenza della neve al suolo è molto bassa, anche per nevicate di consistenza non trascurabile. L'andamento interannuale del numero di giorni di permanenza della neve al suolo mostra una tendenza meno netta alla diminuzione rispetto agli altri due parametri, a causa della inerzia termica del manto nevoso nel medio e alto Appennino Settentrionale (Tab. 6, in basso).

### *Precipitazioni totali a Pian di Novello*

La misura delle precipitazioni a Pian di Novello (1.110 m s.l.m.) fu iniziata nel 1966; seguì l'interruzione nel biennio 1969-1970, ma nell'anno successivo i rilievi furono ripresi fino al 2013, per non essere più ripristinati (Ufficio Idrografico dell'Arno di Pisa, SIR). Le precipitazioni medie annuali del periodo sono state di 2.484,3 mm, con il campo di variazione compreso tra 1.743,0 mm nel 2007 e 3.581,4 mm nel 2010 e il modulo pluviometrico uguale a 2,05 unità. Il regime annuale mostra il massimo in novembre (350,1 mm), seguito da dicembre (310,7 mm) e da ottobre (307,9 mm), mentre i valori mensili più bassi si sono registrati in luglio (70,8 mm), seguito da agosto (106,7 mm) e da giugno (128,2 mm). Le massime precipitazioni mensili hanno raggiunto 955,2 mm nel novembre 2000 e 931,9 mm nell'ottobre 1996 (Tab. 7).

Il numero medio annuale dei giorni piovosi ( $P_{\text{gior.}} \geq 1,0$  mm) è stato di 116,9, con il campo di variazione compreso tra 83 (1988) e 155 giorni (1995). Il regime annuale indica i minimi in luglio (5,5 gg.) e in agosto (6,8 gg.) e i massimi in novembre (12,4 gg.) e in aprile (11,9). La stagione con il numero più elevato di giorni piovosi è la primavera (34,4 gg.), seguono l'autunno (31,9 gg.), l'inverno (31,8 gg.) e l'estate (20,7 gg.).

Tabella 6. Campo di variazione e valori medi della nevosità a Boscolungo: numero di giorni nevosi (N°), spessore cumulato del manto nevoso (H, in centimetri), del numero di giorni di copertura nevosa del suolo (Ns) nel periodo 1951-2004.

Valori	G	F	M	A	M	O	N	D	Anno
N°min	1	0	0	0	0	0	0	0	9
data	vari	2000	vari	vari	vari	vari	vari	vari	2002
N°max	14	14	12	10	2	3	12	17	55
data	vari	1996	1980	1978	vari	vari	1996	1952	1979
N°med	6,4	6,3	5,2	3,7	0,3	0,3	2,5	5,1	29,9

Valori	G	F	M	A	M	O	N	D	Anno
Hmin	3	0	0	0	0	0	0	0	97
data	1964	2000	vari	vari	vari	vari	vari	vari	2002
Hmax	215	198	223	106	30	28	110	160	648
data	1980	1970	1970	1973	1991	vari	1971	1979	1980
Hmed	76	72	65	38	2	2	23	51	33

Valori	G	F	M	A	M	O	N	D	Anno
Ns min	5	12	6	3	10	0	0	0	84
data	1990	1990	1990	1959	vari	vari	vari	vari	1989
Ns max	31	29	31	31	31	6	30	31	197
Data	vari	vari	vari	1969	1980	1980	1955	vari	1980
Ns med	28	27	30	24	6	1	6	21	142

Tabella 7. Campo di variazione delle precipitazioni totali mensili e annuali e dei relativi valori medi a Pian di Novello (millimetri) nel periodo 1966-2013.

Valori	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
Pmin	15,0	5,0	10,0	19,0	29,6	18,2	2,6	4,4	23,0	41,0	20,4	19,1	1,743,0
data	1989	1993	1994	2011	2003	2005	2001	2001	1978	1989	1974	1974	2007
Pmax	807,0	544,0	697,4	479,0	477,0	269,0	265,0	320,0	719,0	931,0	955,2	880,4	3581,4
data	1979	1968	2013	1989	1984	1968	1968	1977	1994	1996	2000	2009	2010
Pmed	235,6	187,3	210,3	211,5	170,9	128,2	70,8	106,7	197,3	307,9	350,1	310,7	2484,3

### Confronto delle precipitazioni totali a Boscolungo e Pian di Novello

Posta presso l'uscita dall'alta valle del torrente Sestaione, la stazione pluviometrica di Pian di Novello è distante circa 3,3 km da quella di Boscolungo e 1,3 km dal Lago del Greppo, perciò in posizione strategica per dare indicazioni circa gli afflussi alle quote più basse della pecceta relitta. La comparazione dei dati di Boscolungo e di Pian di Novello nella "finestra di sovrapposizione" tra il 1966 e il 2013 mostra la differenza di appena il 3,0% tra le precipitazioni medie annuali nei due luoghi, da cui deriva la considerazione che la piovosità dell'area sia piuttosto omogenea, nonostante l'appartenenza delle due stazioni a bacini imbriferi contigui e confluenti ma distinti. La "finestra" contiene una flessione prolungata dal 1979 (3.388,9 mm a Pian e 3.689,8 mm a Boscolungo) al 2007 (1.743,0 mm e 1.511,8 mm), seguita da un

rapido aumento fino al 2013 (3.255,6 mm a Pian di Novello e 3.139,6 mm a Boscolungo) (Fig. 11).

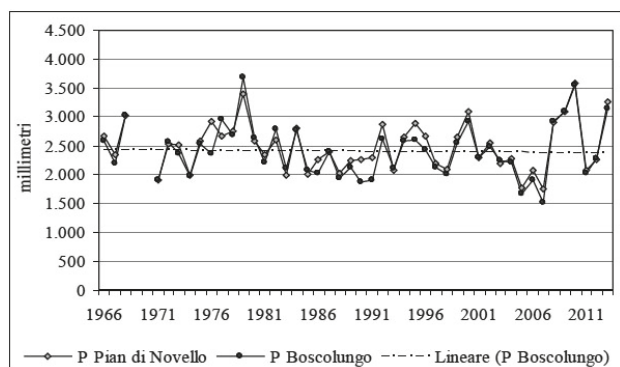


Figura 11. Andamento delle precipitazioni a Boscolungo e a Pian di Novello nella "finestra di sovrapposizione" delle misure tra il 1966 e il 2013.

## BILANCIO IDRICO-CLIMATICO DEL SUOLO A BOSCOLUNGO

Il contenuto idrico del suolo rappresenta il principale fattore limitante per lo sviluppo della vegetazione mesofila, sia quando è carente, ma anche quando è eccedente, poiché il migliore rifornimento idrico si ha quando il suolo è alla capacità di campo (micropori saturi di acqua e macropori di aria). Tra i metodi indiretti per la stima del deposito di acqua del suolo viene applicato il sistema di Thornthwaite, per il cui sviluppo devono essere noti la latitudine e l'altitudine del luogo, i valori mensili della temperatura dell'aria e delle precipitazioni (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite & Mather, 1957; Vittorini, 1972). Un opportuno programma di calcolo ha consentito di determinare per ciascun anno – dal 1927 al 2022 –, i valori mensili dell'evapotraspirazione potenziale (PE), dell'evapotraspirazione reale (AE), della deficienza idrica (D), dell'eccedenza idrica (S) e del contenuto idrico del suolo (RO) a Boscolungo, assumendo uguale a 200 millimetri il valore della capacità di campo, in relazione alla natura del suolo e alla profondità degli apparati radicali della vegetazione presente nella Foresta dell'Abetone, e per traslazione alla peccata relitta dell'alto Sestaione (Rapetti C. & Rapetti F., 2022). L'evapotraspirazione potenziale (PE) (*potential evapotranspiration*), che indica la quantità di acqua trasferita all'atmosfera attraverso l'evaporazione e la traspirazione, rispettivamente dal suolo quando è alla capacità di campo (*field water capacity*) e dalla vegetazione, ha raggiunto il valore medio annuale di 540,5 mm, con il campo di variazione compreso tra 479,9 mm (1980) e 631,9 mm (1961), di cui 302,3 mm (55,9%) in estate, 128,2 mm in autunno (23,8%), 103,4 mm in primavera (19,1%) e 6,5 mm (1,2%) in inverno. L'evapotraspirazione reale (AE) (*actual evapotranspiration*) è la quantità di acqua trasferita all'atmosfera nelle reali condizioni di umidità del suolo (*soil water content*), il cui valore medio annuale è stato di 511,5 mm, con il campo di variazione compreso tra 404,2 mm (2001) e 603,8 mm (1961). Nei valori medi del periodo, le differenze tra PE e AE sono risultate nulle o trascurabili da ottobre a giugno, per raggiungere i valori più elevati, ma sempre di minima entità, in luglio (11,5 mm), agosto (11,8 mm) e settembre (3,2 mm).

La deficienza idrica ( $D = PE - AE$ ) media annuale del periodo è stata di 28,2 mm, con il campo di variazione compreso tra 0,0 mm (1954, 1968) e 138,6 mm (2001). L'eccedenza idrica (S), che è presente quando la riserva idrica del suolo è alla capacità di campo e  $P > PE$ , ha raggiunto il valore medio annuale di 1.967,2 mm, con il campo di variazione compreso tra 897,6 del 1938 e 3.430,5 mm del 1960. L'andamento dell'eccedenza idrica, che non mostra una tendenza significativa fino agli anni Settanta del secolo scorso, negli anni successivi mostra una flessione tendenziale di 23,0 mm/10 anni.

*Tipi climatici e bilancio idrico-climatico del suolo a Boscolungo*

Nel sistema di Thornthwaite, l'Indice di umidità globale (Im) è il primo e più importante indicatore del clima locale, poiché definisce il grado di umidità idro-climatica del luogo. Il valore medio dell'indice è stato di 366,9 unità (tipo "Perumido" A3), con il campo di variazione compreso tra 134,6 (2022) e 638,4 unità (1960). I tipi di clima di Thornthwaite sono indicati da una formula costituita da quattro elementi, così sequenziati: indice di umidità globale ( $Im = (S - D)/PE \times 100$ ), efficienza termica (evapotraspirazione potenziale annuale), indici di aridità o di umidità ( $Ia = D/PE \times 100$ ,  $Ih = S/PE \times 100$ ), CEET (valore percentuale dell'evapotraspirazione potenziale dei mesi estivi in rapporto a quella annuale) (Thornthwaite & Mather, 1957). Il 2022 e 1960, che sono risultati rispettivamente il più arido e il più umido del catalogo, sono indicati dalle formule A B'1 r b'2 e A C'2 r b'3, mentre l'anno medio (1927-2022) dalla formula A C'2 r b'2 (Tab. 8).

Tabella 8. Tipi di clima secondo Thornthwaite a Boscolungo nell'anno di maggiore aridità idro-climatica del suolo (2022), di maggiore umidità (1960) e nell'anno medio nel periodo 1927-2022. .

Anni	Indice umidità globale	Formula climatica
2022: anno più arido	134,6: perumido (A1)	A B'1 r b'2
1960: anno più umido	638,4: perumido (A6)	A C'2 r b'3
1927-2022: anno medio	366,9: perumido (A3)	A C'2 r b'2

L'intenso dilavamento delle rocce dell'alto bacino del Torrente Sestaione, causato dalle abbondanti piogge, favorisce la produzione di notevoli quantità di detriti arenitico-pelitici, su cui può insediarsi una ricca vegetazione erbacea e arborea. L'acqua circolante nei meati del suolo reagisce con il substrato arenitico per assumere una reazione debolmente acida, che favorisce lo sviluppo delle specie acidofile. Tra i parametri del bilancio idrico-climatico, è di particolare rilievo la capacità di ritenzione idrica (*storage*) (RO) e lo spessore di suolo penetrato dagli apparati radicali, secondo una gamma di valori previsti da Thornthwaite & Mather (1957).

Nel 2022 (anno più arido), il contenuto idrico del suolo si è mantenuto alla capacità di campo da novembre a maggio, quando è iniziata la fase della deficienza idrica, che da giugno si è protratta fino a ottobre, quando l'acqua del suolo si era ridotta a 70,5 mm (rispetto al valore di 200 mm alla capacità di campo), rapidamente ripristinata nel mese di ottobre, quando si rese disponibile una eccedenza di 143,8 mm, che fu trasformata in un abbondante deflusso ipodermico e superficiale; nel 1960 il contenuto idrico del suolo si mantenne alla capacità di campo in tutti i mesi, con l'eccezione di maggio

(166,1 mm) e agosto (162,8 mm), con una rilevantisima eccedenza in febbraio (681,7 mm) e in ottobre (673,7 mm). Nei valori medi del periodo, il suolo è rimasto alla capacità di campo da settembre a giugno; mentre nei mesi di luglio e agosto, lo sviluppo del bilancio segnala una deficienza rispettivamente di 38,0 mm e 51,8 mm (Fig. 12).

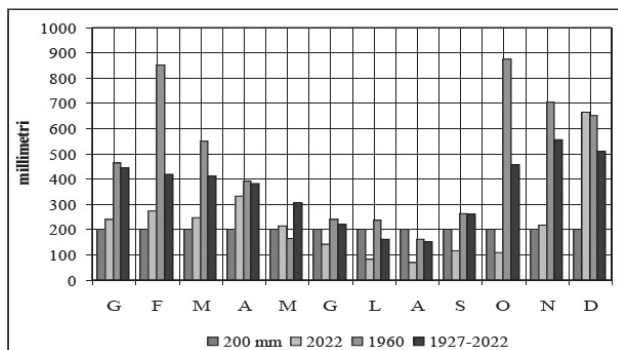


Figura 12. Regime annuale del contenuto idrico del suolo (RO), della deficienza e dell'eccedenza idrica negli anni 2022, (massima aridità) 1960 (massima umidità) e nell'anno medio del periodo: i valori eccedenti 200 mm indicano l'eccedenza idrica (S); i valori minori di 200 mm la deficienza idrica del suolo (D).

### Tendenza dell'indice di umidità globale

L'andamento dell'Indice di umidità globale (Im) mostra una flessione di entità non esattamente definibile a causa dalla mancanza di dati dal 2005 al 2017, che tuttavia pare accentuarsi dagli anni Ottanta del secolo scorso, per raggiungere il valore minimo assoluto nel 2022 (134,6 unità) (Fig. 13). La flessione tendenziale, con i limiti indicati, è stimata di circa 5,0 unità/10 anni, che è un valore poco diverso da quello del catalogo di Vallombrosa (4,0 unità/10 anni) (Rapetti, 2019).

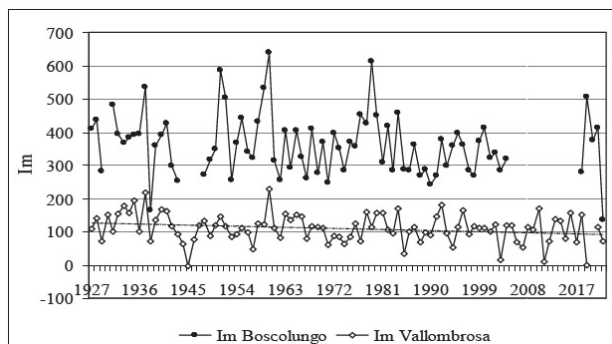


Figura 13. Andamento dell'indice di umidità globale (Im) a Boscolungo e Vallombrosa nella "finestra di sovrapposizione" 1927-2022.

### VENTOSITÀ

Lungo le linee di cresta e nei passi più elevati dell'Appennino Tosco-Emiliano, le raffiche di vento possono superare velocità estremamente elevate, maggiori di 60 m/s (valore massimo misurabile dagli anemografi del SIR). Il Passo di Croce Arcana (Abetone-Cutigliano), sulla linea dello spartiacque principale tra il versante tirrenico e il versante adriatico dell'Appennino Settentrionale, presenta una ventosità costante e tra le più elevate della Penisola (Rapetti, Vittorini, 1979), come la stazione di Foce a Giovo (1.674 m), nel crinale tra M. Rondinaio e Alpe Tre Potenze, dove dominano venti impetuosi dal quarto quadrante. La ventosità che investe la pecceta relitta, nonostante la breve distanza dalle stazioni indicate, non è nota, anche considerato che i moti dell'aria, per l'asprezza della morfologia, sono soggetti a intensi fenomeni di turbolenza e vorticità, che ne alterano radicalmente velocità e direzione. Tuttavia, la dominanza dei venti dal quarto quadrante presso i crinali può far ritenere che l'abete rosso che in pochi esemplari vegeta sotto il crinale tra M. Poggione e Foce di Campolino, fino al Lago Nero, sia investito da venti di forte intensità, mentre alle quote più basse, come al Lago del Greppo, la ventosità potrebbe essere notevolmente attenuata dall'infossamento della piccola valle e dalla schermatura offerta dalla foresta (Rapetti, 1997).

### SIMULAZIONE DEL CLIMA DELLA PECCETA RELITTA DELL'ALTO SESTAIONE

#### Gradiente termico e pluviometrico verticale

I caratteri del clima di Boscolungo non rappresentano, se non nei tratti essenziali, quelli dell'alto Sestaione, per almeno due motivi: il primo è legato alla distribuzione altimetrica dell'abete rosso, che si sviluppa dai 1.350 metri ai 1.780 metri di quota: tale condizione comporta non trascurabili differenze della temperatura dell'aria e delle precipitazioni rispetto ai valori misurati a Boscolungo; il secondo motivo attiene alla peculiarità del clima del bosco, rispetto a quello dei luoghi privi di vegetazione, come è previsto dalle indicazioni del WMO (piena apertura all'atmosfera ed assenza di ostacoli naturali e artificiali prossimi alla stazione di rilevamento).

La temperatura dell'aria nella bassa troposfera si decrementa quasi linearmente con l'altitudine, con tassi di variazione caratteristici in ciascun settore montano: lungo la valle del Torrente Lima, tra Bagni di Lucca (120 m s.l.m.), Casabasciana (215 m s.l.m.), Sperando (470 m s.l.m.), Porrino (640 m s.l.m.), Boscolungo (1.340 m s.l.m.), il gradiente termico verticale annuale è stato di  $-0,58$  °C/100 m ( $\pm 0,6$  °C), con il campo di variazione annuale compreso tra  $-0,51$  °C/100 m



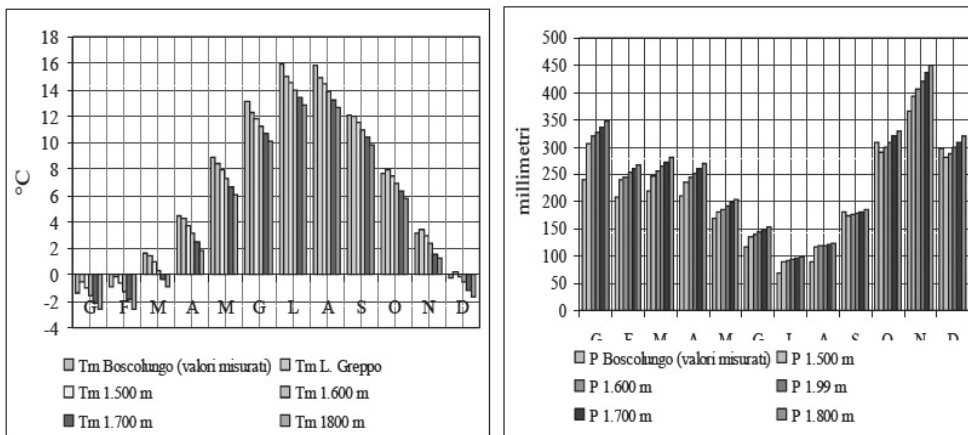


Figura 14 - Regime annuale delle temperature medie mensili dell'aria e delle precipitazioni alle quote di 1.450 m, 1.550 m, 1.650 m, 1.750 m, 1.800 m s.l.m. negli alti bacini dei Torrenti Lima e Sestaione (valori simulati secondo i gradienti termici e pluviometrici).

( $i = \pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) in dicembre e  $-0,65 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  ( $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) di aprile (1961-1980). Le precipitazioni liquide si incrementano quasi linearmente con l'altitudine, fino ad una soglia critica nota come "optimum pluviometrico", al di sopra della quale si stabilizzano per poi decrescere, mentre la nevosità si incrementa secondo una legge esponenziale (Zanella, 1978; Rapetti & Vittorini, 2012). Il gradiente pluviometrico medio annuale lungo la valle del T. Lima è stato di  $89,4 \text{ mm}/100 \text{ m}$ , con il campo di variazione compreso tra  $1,5 \text{ mm}/100 \text{ m}$  in agosto e  $15,0 \text{ mm}/100 \text{ m}$  in novembre (1961-1980) (Rapetti & Vittorini, 1989) (Fig. 14).

IL CLIMA IN AMBIENTE FORESTALE MONTANO

*Temperature a Boscolungo Abitato e Boscolungo Foresta*

Nei primi anni Trenta del secolo scorso, l'Ufficio Idrografico Italiano di concerto con la R. Stazione di Selvicoltura di Firenze, dette avvio ad un programma di "esperimenti e ricerche" sull'influenza del bosco mediterraneo sul clima. I dati raccolti dal 1932 al 1943 compaiono in Appendice alla Parte II - Elaborazioni e Studi degli Annali Idrologici del Servizio Idrografico - Sezione autonoma del Genio Civile di Firenze: "Tali ricerche sono state determinate dalla assoluta deficienza di dati sperimentali relativi alle formazioni boschive xerofile; deficienza che perpetuava l'errore di applicare a tali boschi i dati osservati nella media Europa in boschi mesofili ed igrofili, mentre tutto lascia supporre che le influenze siano ben diverse sotto tutti gli aspetti" (Pavari, 1936). Presso Boscolungo gli "esperimenti e le ricerche" consistettero nella misura della temperatura dell'aria a Boscolungo Abitato e Boscolungo Foresta (Foresta dell'Abetone) tra il 1927 e il 1930. I valori termici delle due stazioni sono perfettamente confrontabili poiché raccolti alla stessa quota sul livello del mare e con strumenti e modalità di prelievo identici: le differenze termiche riscontra-

te sono perciò da imputare esclusivamente all'effetto della foresta sulla temperatura dell'aria. Nella presente ricerca la comparazione delle due serie termometriche è relativa all'anno 1929, che si distinse per l'inverno più freddo del catalogo termometrico di Boscolungo e per l'estate tra le più calde del secolo scorso. Questi dati furono oggetto delle considerazioni di Alberto Chiarugi nelle "Ricerche sulla vegetazione dell'Etruria Marittima III. L'indigenato della *Picea excelsa* Lk. nell'Appennino Etrusco" (Chiarugi, 1936b; pp. 149-152); pertanto, l'attuale contributo aggiunge solo le rappresentazioni grafiche degli andamenti termici nelle due stazioni. Il confronto mostra che le temperature minime a Boscolungo Abitato furono minori di quelle a Boscolungo Foresta nei mesi di aprile, ottobre, novembre e dicembre, e maggiori negli altri mesi, con lo scarto più elevato in agosto ( $D = +2,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ); molto più rilevanti furono le differenze tra le temperature medie delle massime, poiché a Boscolungo Foresta furono maggiori rispetto a Boscolungo Abitato solo in novembre e dicembre, mentre negli altri mesi furono molto minori, fino ai  $5,5 \text{ }^\circ\text{C}$  di luglio. Inoltre, le temperature medie a Boscolungo Foresta furono minori in tutti i mesi, con le sole eccezioni di novembre e dicembre (Fig. 15 in alto). Infine, il confronto tra i valori minimi giornalieri del febbraio 1929 ( $T_{min} = -11,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ), il più freddo del catalogo dopo quello del 1956 ( $T_{min} = -13,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ), evidenzia la sostanziale uguaglianza delle temperature dell'aria nell'abitato e nella foresta, mentre nel mese di agosto la differenza nei valori medi di  $4,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , mentre in singole giornate, come il 1° e il 4 agosto del 1929, la differenza fu di  $10,0 \text{ }^\circ\text{C}$  (Fig. 15, in basso a destra). Queste risultanze mostrano la capacità della foresta di esercitare un rilevante controllo sugli estremi termici dell'estate, nel periodo dell'anno in cui le piogge raggiungono i valori più bassi, con effetti positivi sulla evapotraspirazione potenziale e indirettamente sul contenuto idrico del suolo (Tab. 9).

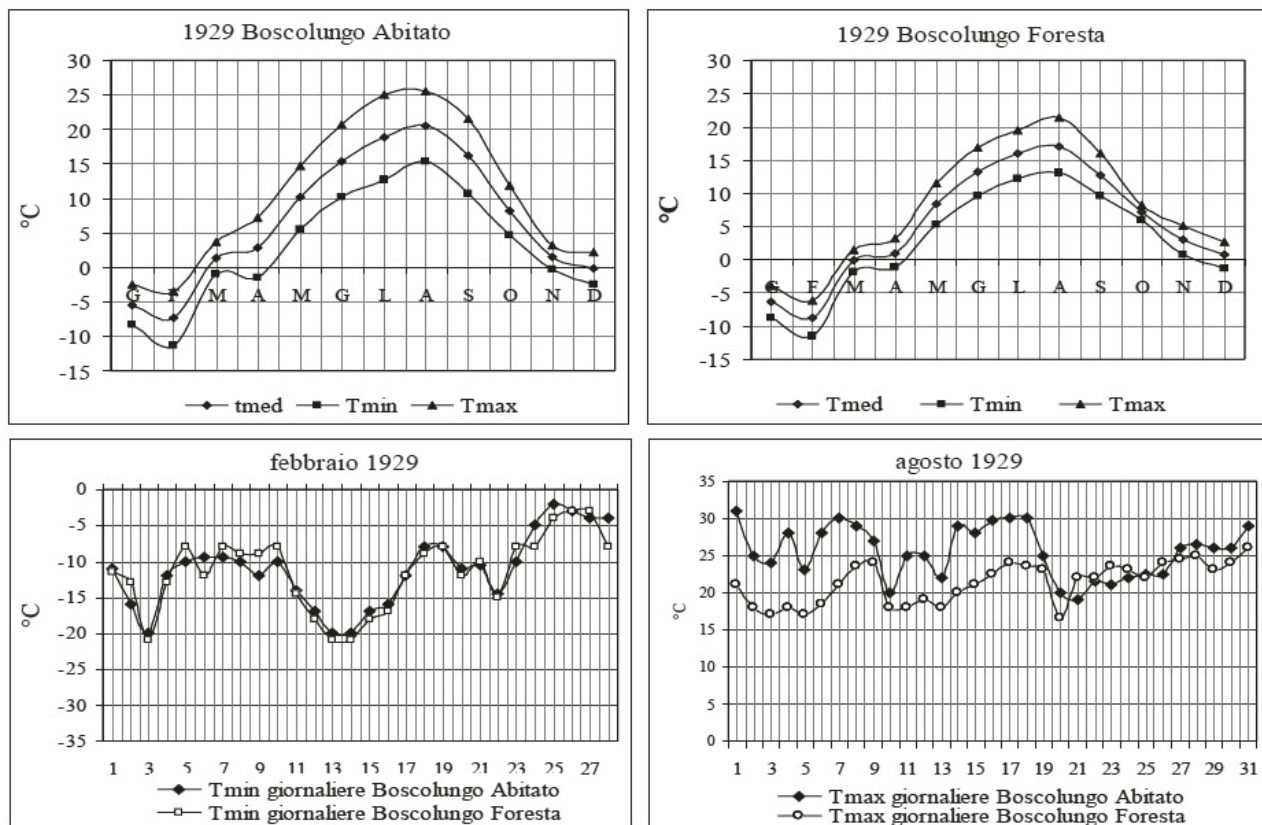


Figura 15. Regime annuale dei valori medi delle temperature massime, minime e medie nelle stazioni di Boscolungo Abitato e Boscolungo Foresta (in alto). Andamento delle temperature giornaliere minime del mese più freddo (febbraio) e massime del mese più caldo (agosto) nel 1929.

Tabella 9. Differenze tra le temperature minime e massime assolute rilevate nelle stazioni di Boscolungo Abitato e Boscolungo Foresta nel 1929.

T	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Tmin (abitato)	-13,0	-20,0	-14,0	-12,0	0,5	6,0	6,0	10,5	3,0	0,0	-3,0	-10,0
Tmin (foresta)	-17,0	-21,0	-14,0	-10,0	0,0	6,0	7,0	8,0	5,0	0,0	-2,0	-9,0
D	4,0	1,0	0,0	-2,0	0,5	0,0	-1,0	2,5	-2,0	0,0	-1,0	-1,0
Tmax (abitato)	4,0	4,0	16,0	15,0	20,5	27,0	31,5	31,0	30,0	20,0	6,0	10,0
Tmax (foresta)	0,0	1,0	9,0	10,0	19,0	23,0	25,0	26,0	23,0	15,0	10,0	10,0
D	4,0	3,0	7,0	5,0	1,5	4,0	6,5	5,0	7,0	5,0	-4,0	0,0

### Misura della pioggia nei versanti in ambiente forestale

Nelle aree pianeggianti, il rapporto tra la pioggia misurata dal pluviografo a bocca orizzontale e la pioggia intercettata dalla superficie del suolo è pressoché unitario, sia in presenza, sia in assenza di vento. Nelle superfici inclinate (versanti) le differenze possono invece essere molto consistenti, particolarmente in prossimità dei crinali, sovente battuti da venti di forte intensità. La valutazione teorica del rapporto tra l'afflusso misurato dal pluviografo a bocca orizzontale e l'afflusso intercettato dalla superficie del suolo può determinarsi per via trigonometrica: i fattori influenti sono l'in-

clinazione e l'orientamento del versante, la direzione e la deviazione delle gocce di pioggia dalla verticale (Rapetti & Vittorini, 1972). La misura diretta della pioggia ricevuta dai versanti si effettua con opportuni pluviometri detti "direzionali", che hanno la bocca aderente al suolo secondo l'inclinazione media del versante, la cui utilizzazione però è limitata alle particelle sperimentali a causa delle difficoltà di gestione dello strumento.

La quantità di pioggia che cade in modo uniforme sopra un'area boscata e un'area contigua di campagna, adduce al suolo quantità di acqua significativa-

mente diverse, come mostrano gli “esperimenti e le ricerche” sull’influenza della macchia mediterranea sul clima (Appendice alla Parte II - Elaborazioni e Studi degli Annali Idrologici del Servizio Idrografico - Sezione autonoma del Genio Civile di Firenze). Le analisi condotte su questa consistente banca di dati pluviometrici (1932-1943) hanno evidenziato infatti notevoli differenze tra le piogge misurate all’interno e all’esterno della Macchia di Migliarino, lungo una sezione mare-terra posta poco a Nord della foce del Fiume Serchio (Litorale Pisano-Versiliese). Tutti gli elementi del clima sono modificati dalle coperture forestali, ma a presentare le differenze maggiori sono le piogge, poiché la “pioggia incidente” (*gross rainfall*) misurata sopra le chiome degli alberi, nel percorso verso il suolo si dirama seguendo vie diverse: la frazione più consistente vi giunge per gocciolamento diretto o indiretto (*throughfall*) (frazione misurata dal pluviografo posto ai piedi del bosco), una parte vi giunge per scorrimento lungo le strutture vegetali (*stemflow*), mentre la porzione rimanente bagna la vegetazione ed è restituita all’atmosfera dall’evaporazione (*interception loss*) (Crouse *et al.*, 1966). Quest’ultima frazione, che è sottratta al suolo, ha una consistenza diversa a seconda delle condizioni meteorologiche e floristiche, rispettivamente dipendenti dai caratteri della precipitazione (pioggia, grandine, neve, frequenza, intensità e durata; temperatura dell’aria, tensione di vapore dell’atmosfera, vento), e dalle flore (fittezza del bosco, specie sempreverdi o caducifoglie, dimensioni fogliari, adesività all’acqua dei corpi vegetali). La restituzione di una parte delle precipitazioni all’atmosfera riduce il rifornimento idrico del suolo, con effetti sul bilancio idrico della foresta (Aussenac, Boulangeat, 1980). Nella Macchia di Migliarino, la quantità di pioggia misurata dal pluviografo posto ai piedi degli alberi di alto fusto, costituiti in prevalenza da *Pinus pinea*, rappresentò il 74,0% della pioggia incidente (valore misurato), mentre della frazione restante il 2,9% giunse al suolo per scorrimento lungo le strutture vegetali; la frazione dovuta alla bagnatura dei corpi vegetali, di cui una parte trattenuta dalle piante, fu restituita all’atmosfera attraverso l’evaporazione e ammontò al 23,1% della pioggia incidente. Le frazioni della pioggia relative allo scorrimento e alla bagnatura delle strutture vegetali sono state stimate con opportune equazioni ricavate per via sperimentale in un bosco di *Quercus ilex* (Ettehad *et al.*, 1973), i cui valori sono con tutta evidenza diversi sia dai boschi di *Pinus pinea*, sia di *Picea abies* prevalenti. Significativa è anche la differenza del numero annuale di giorni piovosi ( $P_{\text{gior}} \geq 1,0 \text{ mm}$ ) tra l’interno e l’esterno della macchia mediterranea di Migliarino: rispettivamente 81,3 e 97,6 giorni (valori medi 1932-1943) (Rapetti, 1997).

#### SIMULAZIONE DEL CLIMA DELLA PECCETA RELITTA

Le misure della temperatura dell’aria e delle precipitazioni raccolte a Boscolungo (Abitato), per la breve distanza dalla stazione alla pecceta relitta, hanno costituito il riferimento costante in tutte le ricerche sul clima dell’alta valle del Sestaione, ad iniziare da quelle del Chiarugi (1936b). La mancanza di rilevamenti diretti all’interno della foresta, ad eccezione di quelli della temperatura dell’aria effettuati nella stazione di Boscolungo Foresta tra il 1927 e il 1930, rende tuttavia incerta la definizione climatica dei versanti che ospitano la pecceta relitta. La trasposizione semplicemente così dei valori di Boscolungo è infatti impropria e richiede un loro adattamento, che consideri sia le peculiari condizioni del clima forestale (attenuazione degli estremi termici estivi, riduzione delle precipitazioni che giungono al suolo del bosco rispetto alla pioggia incidente<sup>2</sup>), sia le variazioni delle temperatura dell’aria e delle precipitazioni con l’altitudine, considerato che la pecceta si sviluppa nell’intervallo altimetrico tra 1.350 e 1.780 metri s.l.m. (Fig. 14). I valori mensili delle temperature dell’aria e delle precipitazioni mensili modificati (valori medi del periodo) sono stati inseriti nel programma di calcolo che ha restituito i bilanci idrico-climatici del suolo relativi alle quattro fasce altimetriche in cui è stato suddiviso l’alto bacino del Torrente Sestaione (Tab. 8, Tab. 6).

Secondo la simulazione l’evapotraspirazione potenziale si riduce dai 487,6 millimetri alla quota 1.450 m s.l.m. (Lago del Greppo) ai 476,6 mm alla quota 1.750 m s.l.m. (alti versanti di Campolino); l’evapotraspirazione reale è identica a quella potenziale in tutti i mesi, con l’eccezione di quelli di luglio, quando la differenza è trascurabile. Leccedenza idrica, uguale a 1.661,6 mm nella prima fascia, si incrementa fino a 2.640,8 mm nella quarta fascia altimetrica.; la deficienza idrica (D), già trascurabile al Lago del Greppo (1,4 mm), si annulla alle quote più elevate. Queste risultanze attestano che il contenuto idrico del suolo nell’alta valle del Sestaione si mantiene alla capacità di campo da settembre a giugno, con una trascurabile deficienza in luglio e agosto (Tab. 10). Secondo la simulazione i tipi di clima che caratterizzano le fasce altimetriche dell’alto Sestaione presentano due varianti del tipo “Perumido”, che in formula differiscono solo per il valore della concentrazione estiva dell’efficienza termica. Il tipo A C2’ r b3’: “Perumido” ( $I_m = 341,2 - 390,5$  unità), Secondo me-

<sup>2</sup> Adottando un criterio perequativo i valori mensili delle precipitazioni a Boscolungo (Abitato) sono stati ridotti di una misura prudenziale del 20%, per compensare il minor afflusso di acqua ricevuta dal suolo a causa della intercettazione di una porzione delle precipitazioni, che viene restituita all’atmosfera dall’evaporazione, nonché della porzione assorbita dalla vegetazione. In altri termini, la minor entrata di acqua al suolo del bosco consiste nella differenza tra la precipitazione verificatasi in quell’area (stazione di Boscolungo) e la parte che raggiunge il suolo (*interception loss*) (Crouse *et al.*, 1966).

Tabella 10. Simulazione dei valori medi (1927-2022) del bilancio idrico-climatico del suolo (millimetri) per fasce altimetriche nella pecceta relitta dell'alto Sestaione. I: 1.400-1.500 m; II: 1.500-1.600 m; III: 1.600-1.700; IV: 1.700-1.800 m. PE: evapotraspirazione potenziale; AE: evapotraspirazione reale; ST: contenuto idrico del suolo; S: eccedenza idrica; D: deficienza idrica.

I	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
PE	0,0	0,0	0,0	26,1	59,0	83,2	94,6	87,9	57,2	37,3	28,2	14,1	487,6
AE	0,0	0,0	0,0	26,1	59,0	83,2	93,2	87,9	57,2	37,3	28,1	14,1	486,2
ST	200,0	191,2	200,0	200,0	200,0	200,0	177,5	182,9	200,0	200,0	200,0	200,0	
S	245,1	191,2	197,2	162,8	85,2	24,8	0,0	0,0	64,4	194,5	286,7	209,7	1661,6
D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4
II	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
PE	0,0	0,0	0,0	23,7	57,6	82,2	94,2	86,9	56,7	36,6	27,4	12,7	478,0
AE	0,0	0,0	0,0	23,7	57,6	82,2	93,0	86,9	56,7	36,6	27,4	12,7	476,9
ST	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	179,3	186,5	200,0	200,0	200,0	200,0	
S	256,1	196,1	204,2	170,9	90,6	28,8	0,0	0,0	70,3	202,0	297,1	217,8	1733,9
D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2
III	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
PE	0,0	0,0	0,0	19,4	56,2	81,4	93,5	86,3	55,8	35,2	26,1	10,5	464,4
AE	0,0	0,0	0,0	19,4	56,2	81,4	92,6	86,3	55,8	35,2	26,1	10,5	463,5
ST	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	181,7	190,9	200,0	200,0	200,0	200,0	
S	260,3	202,1	211,1	182,3	97,1	33,3	0,0	0,0	77,8	211,8	310,4	228,3	1814,5
D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
IV	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	Anno
PE	0,0	0,0	0,0	22,9	57,1	83,8	101,8	92,9	66,5	40,7	10,9	0,0	476,6
AE	0,0	0,0	0,0	22,9	57,1	83,8	101,7	92,9	66,5	40,7	10,9	0,0	476,5
ST	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	193,8	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	
S	335,9	260,3	272,4	238,1	140,8	64,2	0,0	21,8	114,9	278,6	424,8	309,0	2.640,8
D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1

sotermico (C2'), deficienza idrica assente o molto bassa (r), CEET compresa tra 51,9 e 56,3% (b3') e il tipo A C2' r b2' (Im = 516,4 unità), CEET compresa tra 56,3 e 61,6% (b2'). La prima formula climatica caratterizza le prime tre fasce altimetriche, la seconda la fascia che si snoda sotto il crinale tra M. Poggione e Foce di Campolino (1.700-1.800 m s.l.m.).

#### LA RISERVA NATURALE ORIENTATA E BIOGENETICA DI CAMPOLINO

L'istituzione della Riserva di Campolino risale al 1967, quando si estendeva per circa 47 ettari, per la maggior parte distribuiti nelle fasce più elevate dei versanti meridionali dell'alta valle del Sestaione (Pigelleto Chiarugi). Nel 1972, l'estensione fu portata a circa 98 ettari, per includere nuclei di picea relitta alle quote del Lago del Greppo, ed anche minori, fino a circa 1.350 m s.l.m.,

in seguito alle indagini floristiche condotte da un gruppo di studiosi dell'Università di Firenze (Magini, 1972; De Philippis *et al.*, 1973). Nel 1971 era stata istituita la "Riserva Naturale Orientata e Biogenetica di Campolino" (D.M. 26 luglio 1971 e successivi del 29 marzo 1972 e del 02/03/1977), poi inserita nell'elenco ufficiale delle aree protette dal D.M. 27/04/2010. Nel 1977, la Riserva fu proposta al Consiglio d'Europa per l'inclusione nella "Rete europea delle Riserve Biogenetiche"<sup>3</sup>. L'abete rosso relitto postglaciale dell'alto Sestaione è accompagnato dal tipico corteggio di specie erbacee delle peccete e delle brughiere subalpine, come il li-

<sup>3</sup> Secondo la "Union Internationale pour la Conservation de la Nature" per "Riserva naturale integrale" deve intendersi un territorio in cui da tempi immemorabili non si siano svolte pratiche selvicolturali, mentre con "Riserva Naturale Orientata e Biogenetica" un territorio in cui siano presenti emergenze di elevato valore naturalistico, per la cui conservazione sono ammessi mirati interventi antropici (De Philippis *et al.*, 1974).

copodio annotino, (*Spinulum annotinum* (L.) A.Haines subsp. *annotinum*), o l'erba lucciola delle peccete, *Luzula luzulina* (Vill.) Racib. Alle altitudini più elevate, oltre i 1.600/1.700 m, si sviluppa la brughiera a *Vaccinium* ed *Empetrum* e la prateria, ricca di specie come la genziana porporina (*Gentiana purpurea* L.) o l'aquilegia alpina (*Aquilegia lucensis* E.Nardi). Il corteggio comprende anche entità macromicetiche, come le specie appartenenti ai generi *Lactarius*, *Clitocybe*, *Inocybe*, *Mycena*, *Russula*, presenti nell'alto Sestaione fino alla quota di 1.550 m s.l.m., con flora prevalente a *Picea abies* (Antonini & Antonini, 1997).

## DISCUSSIONE

Fino dal momento della scoperta della pecceta relitta, si è ritenuto che la conservazione della stessa fosse principalmente dovuta all'alta piovosità del luogo. Tale affermazione, fondata sui pochi dati pluviometrici allora disponibili (numero ridotto di stazioni e breve durata dei periodi di osservazioni), può oggi essere pienamente confermata sia dalle misure di un buon numero di stazioni di montagna prossime all'alto Sestaione, tra cui M. Romecchio (1591 m), Foce a Giovo (1674 m), San Pellegrino in Alpe e Passo del Cerreto, sia della durata oggi centenaria del catalogo pluviometrico di Boscolungo. Le precipitazioni negli alti bacini dei torrenti Lima e Sestaione sono infatti estremamente elevate rispetto a gli altri settori dell'Appennino Settentrionale, e inferiori solo a quelle del versante interno delle Alpi Apuane, dove negli anni più piovosi è stata superata la soglia di 4.000 millimetri annuali, come a Campagrina (850 m s.l.m.), dove nel 1960 furono registrate precipitazioni di 4.557,8 mm, quando a Boscolungo il totale pluviometrico raggiunse 3.958,7 mm.

Tra le condizioni geografiche, morfologiche e sinottiche che favoriscono tali eccezionali afflussi idrometeorici, sono da considerare la breve distanza degli alti bacini dei torrenti Lima e Sestaione dal Mare Ligure, che nel semestre freddo e all'inizio della primavera è interessato da frequenti e intense depressioni dinamiche sottovento all'arco alpino, la posizione geografica, lungo la via preferenziale di percorrenza delle correnti perturbate di origine atlantica, e il potente "effetto orografico" indotto dal massiccio appenninico, che in questo tratto culmina ai 2.165 m s.l.m. del Monte Cimone.

## CONCLUSIONI

Lo straordinario patrimonio epiontologico e ambientale dell'abete rosso relitto postglaciale dell'alta valle del Torrente Sestaione e del corteggio associato, giustificano ogni forma di protezione e di controllo ambientale. La salvaguardia di tale patrimonio non può

risolversi tuttavia con le sole limitazioni alla fruizione, considerato che in alcuni settori montani dell'Appennino Toscano si intravedono i primi segni di impronta climatica sulla vegetazione, soprattutto dovuti agli andamenti della temperatura dell'aria, che nell'ultimo quarantennio hanno mostrato una costante tendenza all'aumento (Pignatti, 2011), a differenza delle precipitazioni annuali, che sono rimaste pressoché stabili fino al 2002, quando ha avuto inizio una fase di rapide ed intense oscillazioni, con valori molto elevati (3.551,8 mm nel 2010; 3.351,6 mm nel 2014; 3.219,2 nel 2019), alternati a valori tra i più bassi del catalogo pluviometrico di Boscolungo (1.511,8 mm nel 2007; 1.565,0 nel 2015; 1.438,0 nel 2022). In questo quadro di accentuata variabilità climatica, considerate le sensibili differenze tra il clima del bosco e quello delle aree contermini di piena campagna, è auspicabile, al fine di un puntuale e immediato controllo di possibili emergenze climatiche, la disponibilità di dati meteorologici raccolti direttamente nelle aree forestali. Si avverte infatti, a distanza di quasi un secolo dalle prime ricerche (Pavari, 1936), la necessità di conoscere con precisione l'andamento di alcuni parametri meteorologici dei boschi, ed in primo luogo la quantità di pioggia che raggiunge il suolo, nonché della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria (D'Aprile *et al.*, 2015). Il monitoraggio del clima del bosco può costituire anche un utile supporto alla prevenzione dagli incendi (Chronopoulos & Matsoukis, 2021) e alla lotta ai parassiti, come il bostrico tipografo (*Ips typographus* L.) dell'abete rosso, la cui diffusione nella Finlandia Meridionale è stata messa in relazione agli andamenti del microclima forestale (Annala, 1969): il pericolo di infestazione del bostrico è attuale e presente anche nell'alto Sestaione, dove negli ultimi anni è stato segnalato nella Foresta Demaniale dell'Abetone, fino ai margini della Riserva Naturale Orientata e Biogenetica di Campolino.

La ricerca mostra come l'umidità idro-climatica dell'alta valle del Torrente Sestaione, nonostante i segnali di inaridimento riscontrati in altri settori dell'Appennino Toscano, abbia garantito fino ad oggi un soddisfacente margine di sicurezza per il rifornimento idrico della vegetazione.

## BIBLIOGRAFIA

- AGNOLETTI M., 2020. Storia del bosco. Il paesaggio forestale italiano. *Economica Laterza*: 366.
- ANNILA E., 1969. Influence of temperature upon the development and voltinism of *Ips typographus* L. (Coleoptera, Scolytidae). *Annales Zoologici Fennici* 6 (2): 161-208.
- ANTONINI D., ANTONINI M. 1997. Contributo alla conoscenza dei macromiceti della Riserva Naturale Orientata e Biogenetica di Campolino (Alto Appennino Pistoiese). Seconda parte. *Bollettino del Gruppo Micologico G. Bresadola*. Nuova Serie. BGMB 40(2-3): 29-40.

- ARRIGONI P.V., VIEGI L., 2011. *La flora vascolare esotica spontaneizzata della Toscana*. Regione Toscana, Direzione generale Politiche territoriali, ambientali e per la mobilità. Settore Tutela e valorizzazione delle risorse ambientali. Centro Stampa Giunta Regione Toscana.
- AUSSENAC G., BOULANGEAT S., 1980. Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii*) (Mirb) Franco. *Annales Sciences Forestières* 37(2): 91-107.
- BARBIERI G., 2022. Monitoraggio floristico di alcune specie target, possibili indicatori di cambiamento climatico al Monte Cimone. *Club Alpino Italiano. Il Bollettino*, ottobre 2022: 59-74.
- BOTTACCI A., 2020. Lo spazio e il tempo per le foreste resilienti. *L'Italia forestale e montana* 75(2): 69-81.
- CAMPI B., CAMPI M. (sec. XVII). *Historia delle Piante* (BSLU, Ms. 150, sec. XVIII).
- CHIARUGI A., 1936a. Cicli forestali postglaciali nell'Appennino etrusco attraverso l'analisi pollinica di torbe e depositi lacustri presso l'Alpe delle tre Potenze e del M. Rondinaio. *Nuovo Giornale Botanico Italiano*, n.s. 43: 3-61.
- CHIARUGI A., 1936b. L'indigenato della "Picea excelsa Link." nell'Appennino Etrusco. *Nuovo Giornale Botanico Italiano* n.s., 43: 131-166.
- CHIARUGI A., 1950. Le epoche glaciali dal punto di vista botanico. Problemi attuali di scienza e di cultura. *Quaderni Accademia Nazionale Lincei* 16: 55-110.
- CHRONOPOULOS K., MATSOUKIS A., 2021. Meteorological forest fire risk. *Academia Letters* 364. 10-20935/AL364.
- CONRAD V., POLLAK, 1950. *Methods in Climatology*. Harvard University Press, Cambridge MA, 459 pp.
- CORTEMIGLIA G.C., 2012. Lineamenti generali della storia climatica del territorio Alessandrino (Piemonte, Italia). *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A* 117-119: 5-16.
- CROUSE R.P., CORBETTE E.S., SEEGRIST D.W., 1966. Methodes of measuring and analyzing rainfall interception by grass. *Hydrological Sciences Journal* 11(2): 110-120.
- D'APRILE F., TAPPER N., BAKER P., BARTOLOZZI L., 2009. Risposte di accrescimento radiale dell'abete bianco (*Abies alba* Mill.) in Toscana e influenza del clima: prime emergenze. *Atti Terzo Congresso Nazionale Selvicoltura. Accademia Italiana Scienze Forestali* 1: 541-546.
- D'APRILE F., TAPPER N., MARCHETTI M., 2015. Forestry under Climate Change. Is Time a Tool for Sustainable Forest Management? *Open Journal of Forestry* 5: 329-336.
- DE PHILIPPIS A., GELLINI R., GIANNINI R., FALUSI M., MAGINI E., SCREM E., 1974. La riserva naturale orientata di Campolino. *Informatore Botanico Italiano* 5: 129-133.
- DE STEFANI C., 1883. I laghi dell'Appennino settentrionale. *Bollettino Club Alpino Italiano* 17: 99-140.
- ETTEHARD R., LOSSAINT P., RAPP M., 1973. *Recherches sur la dynamique et le bilan de l'eau des sols de deux écosystèmes méditerranéens à chêne vert*. *Écologie du Sol, Recherche coopérative sur programme n° 40, C.N.R.S., Paris*, 3: 198-288.
- FALCINI M., RAPETTI F., 2002. Termic conditions in the air in the ground and freeze and thaw cycles in the upper Val di Lima (Pistoia, Apennines). *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A* 124: 115-132.
- FEDERICI P.R., 1990-1991. I lineamenti fisici dell'Appennino settentrionale e della Toscana. Atti del Convegno: Studi sulla flora dell'Appennino settentrionale ed Alpi Apuane in celebrazione di Antonio Bertoloni (1775-1869). Sarzana 13-15 giugno 1991. *Memorie Accademia Lunigianese "Giovanni Capellini"* 60-61: 294-300.
- FEDERICI P.R., 2005. Aspetti e problemi della Glaciazione Pleistocenica nelle Alpi Apuane. *Istituto Italiano di Speleologia, Serie II, Memoria* 18: 7-20.
- FEDERICI P.R., 2020. *Lineamenti geomorfologici della Garfagnana e Val di Serchio*. In Narducci R., Verdigi F. (a cura di): Le ricchezze della Garfagnana, il territorio, le acque, la natura e le tradizioni: 15-32. Tipografia Tommasi, Lucca.
- FENAROLI L., 1970. *Note illustrative della carta della vegetazione reale d'Italia*. Ministero Agricoltura e Foreste, Collana Verde, 28, Roma: 1-125.
- FERRARINI F., ALESSANDRINI A., 1981-1983. Aspetti della flora e della vegetazione dell'Appennino settentrionale dal M. Maggiorasca alle Alpi Apuane e al M. Fumaiole. *Memorie Accademia Lunigianese Scienze "Giovanni Capellini"* 51-53: 3-57.
- FOGGI B., GENNAI M., GERVASONI D., FERRETTI G., ROSI C., VICIANI D., VENTURI E., 2007. La carta della vegetazione del SIC Alta Valle del Sestaione (Pistoia, Toscana Nord-Occidentale). *Parlatorea* IX: 41-78.
- GAZZOLO T., PINNA M., 1969. La distribuzione della temperatura in Italia nel trentennio 1926-1955. *Ministero LL.PP. - Servizio Idrografico* 21, 4: 116. .
- GAZZOLO T., PINNA M., 1973. La nevosità in Italia nel quarantennio 1921-1960 (gelo, neve e manto nevoso). *Ministero LL.PP. - Servizio Idrografico* 26: 216.
- MAGINI E., 1972. L'abete rosso (*Picea abies* Karst.) della Riserva Naturale di Campolino. *Annali Accademia Italiana Scienze Forestali* 21: 287-321.
- MAYR H., 1906. *Fremdländische Wald- und Parkbäume für Europa*. Verlagsbuchhandlung Paul Parey, Berlin: 1-676.
- MARCHETTI M., TONGIORGI E., 1936. Ricerche sulla vegetazione dell'Etruria marittima. VIII: Una torba glaciale del lago di Massaciuccoli (Versilia). *Nuovo Giornale Botanico Italiano* n.s. 43(4): 872-884.
- MARINELLI O., 1922. *Atlante dei tipi geografici. Annotazioni alla tavola 29 (Bacini intermontani dell'Appennino)*. IGM, Firenze.
- MAZZANTI R., TREVISAN L., 1978. Evoluzione della rete idrografica nell'Appennino Centro-Settentrionale. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 1: 55-62.
- McKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J., 1993. The relation of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society* (Anaheim, 17-22 gennaio 1993): 179-184.
- MINISTERO AGRICOLTURA E FORESTE - AZIENDA DI STATO FORESTE DEMANIALI, 1963. *Piano di assestamento della foresta dell'Abetone per il dodicennio 1961-1972*, a cura di Cantiani M., Berneti G. Tip. Bruno Coppini, Firenze, 357 pp.
- MINISTERO LAVORI PUBBLICI. SERVIZIO IDROGRAFICO. SEZIONE AUTONOMA PER IL DOMINIO LIGURE-TOSCANO, 1922-1996. *Pisa. Annali Idrologici. Parte I*. Roma.
- PALMIERI S., INGHILESI R., SIANI A.M., MARTELLACCI C., 1992. Un indice meteorologico di rischio per incendi boschivi. *Bollettino Geofisico* 15, 49-62.

- PARLATORE F., 1867. *Flora italiana, ossia descrizione delle piante che crescono spontanee o vegetano come tali in Italia e nelle isole ad essa adiacenti. Volume IV.* Le Monnier, Firenze, pp. 623.
- PAVARI A., 1916. Studio preliminare sulla coltura di specie forestali esotiche in Italia. Prima parte (generale). *Annali del Regio Istituto Superiore Nazionale Forestale I* (1913-15): 221.
- PAVARI A., 1936. L'influenza dei boschi mediterranei sul clima. Primi risultati delle esperienze italiane. *Atti Accademia Geografica 2*: 474-501.
- PESARESI S., GALDENZI D., BIONDI E., CASAVECCHIA S., 2014. Bioclimate of Italy: application of the worldwide bioclimatic classification system. *Journal of Maps* 10(4): 538-553.
- PIGNATTI G., 2011. La vegetazione forestale di fronte ad alcuni scenari di cambiamento climatico in Italia. *Forest@* 8: 1-12.
- PINNA M., 1970. Contributo alla classificazione del clima d'Italia. *Memorie Società Geografica Italiana* 70(2): 129-152.
- PINNA M., 1977. *Climatologia*. UTET, Torino, pp. 442.
- PINNA M., 1989. I climi montani. Un invito a ricerche sistematiche. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 12(1): 35-39.
- PINNA M., 1997. *Le variazioni del clima dall'ultima grande glaciazione alle prospettive per il XXI secolo. Geografia e Società*. Franco Angeli, Milano, 214 pp.
- PINNA M., VITTORINI S., 1985 - Contributo alla determinazione dei regimi pluviometrici in Italia. In: Pinna M. (a cura di), *Contributi di Climatologia. Memorie Società Geografica Italiana* 39: 147-167.
- PINNA S., 2020. Sui caratteri di spiccata marittimità dei climi di alta montagna. *Bollettino Società Geografica Italiana* 14, 3(1): 51-57.
- RAPETTI C., RAPETTI F., 1996. L'evento pluviometrico eccezionale del 19 giugno 1996 in Alta Versilia (Toscana) nel quadro delle precipitazioni delle Alpi Apuane. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A* 103: 143-159.
- RAPETTI C., RAPETTI F., 2021. Evapotraspirazione potenziale e bilancio idro-climatico del suolo a Boscolungo nell'alto bacino del T. Lima (Appennino Tosco-Emiliano, Italia) (1927-2021). *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A* 129: 81-88.
- RAPETTI F., 1997. L'influenza del bosco mediterraneo sul clima I - La Macchia di Migliarino. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie B* 104: 73-90.
- RAPETTI F., 1999. L'influenza del bosco mediterraneo sul clima II - La Pineta di Marina di Cecina. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A* 106: 17-31.
- RAPETTI F., 2019. Tendenze ultracentenarie degli elementi del bilancio idrico climatico del suolo presso l'Abbazia di Vallombrosa in rapporto alla vegetazione presente (Toscana, Italia) (1872-2017). *L'Italia Forestale e Montana* 74(2): 93-113.
- RAPETTI F. 2021. Il clima del versante marittimo delle Alpi Apuane (Toscana, Italia). *Acta Apuana*. Anno XVII, 2017-2018. Studi in memoria di Maria Ansaldi: 9-29.
- RAPETTI F., VITTORINI S., 1979. Il vento come fonte di energia integrativa in Italia. *Rivista Geografica Italiana* 86: 450-470.
- RAPETTI F., VITTORINI S., 1986. L'episodio di gelo del gennaio 1985 in Toscana, con particolare riguardo alla bassa valle dell'Arno. *Rivista Geografica Italiana* 93: 437-447.
- RAPETTI F., VITTORINI S., 1989. Aspetti del clima nei versanti tirrenico e adriatico lungo l'allineamento Livorno-Monte Cimone-Modena. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A* 96: 159-192.
- RAPETTI F., VITTORINI S., 1992. Gli estremi termici in Toscana dal 1929 al 1987. *Rivista Geografica Italiana* 99: 415-441.
- RAPETTI F., VITTORINI S., 2012. Note illustrative della Carta Climatica della Toscana. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A* 117: 41-74.
- RÉMÉNIÉRAS G., 1959. *Éléments d'hydrologie appliquée*. Éditions Armand Colin, Paris, pp. 208.
- ROMAGNOLI P., FOGGI B., 2005. Vascular flora of the Upper Sestaione Valley (NW-Tuscany, Italy). *Flora Mediterranea* 15: 225-305.
- SCHOUW J.F., 1845. Les Conifères d'Italie sous les rapports géographiques et historiques. *Annales Sciences Naturelles, Botanique* 3(3): 230-272.
- SEGHIERI M., TOMEI P.E., COARO E., 1987. La historia delle piante nostrali di Baldassarre e Michele Campi. *Accademia Lucchese di Scienze, Lettere ed Arti già degli Oscuri* (Studi e Testi, 24). Pacini Editore, Pisa, 116 pp.
- THORNTHWAITE C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38: 55-94.
- THORNTHWAITE C.W., MATHER J.R., 1955. *The Water Balance*. Drexel Institute of Technology Laboratory of Climatology, Centerton NJ (USA), 104 pp.
- THORNTHWAITE C.W., MATHER J.R., 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in Climatology* 10(3): 185-311.
- TOMEI P.E., SIGHIERI M., 1981. Baldassarre e Michele Campi. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie B* 88:195-201.
- TONGIORGI E., 1950. Le epoche glaciali dal punto di vista paleoclimatologico. *Accademia Nazionale dei Lincei*. Quaderno N. 16: 120-135.
- VERGARI Si., G. DONDINI, I. NEROZZI, F. SABATINI, G. SABATINI, VERGARI Se., 2021. Fruit production by *Vaccinium* species in the Tuscan-Emilian Apennines and a new *Vaccinium vitis-idaea* L. site in the area. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie B* 128:107-111.
- VESCOVI E., AMMANN B., RAVAZZI C., TINNER W., 2010. A new Late-glacial and Holocene record of vegetation and fire history from Lago del Greppo, northern Apennines, Italy. *Vegetation History and Archaeobotany* 19: 219-233.
- VITTORINI S., 1972. Ricerche sul clima della Toscana in base all'evapotraspirazione potenziale e al bilancio idrico. *Rivista Geografica Italiana* 79(I): 1-30.
- WHITE P.S., WALKER J.L., 1997. Approximating nature's variation: selecting and using reference information in restoration ecology. *Restoration Ecology* 5(4): 338-349.
- ZANELLA G., 1978. Sulla geografia della neve nell'Appennino Emiliano. *Parma Economia* 4: 3-35.

(ms. pres. 1 giugno 2023; ult. bozze 15 dicembre 2023)

