



The role of strict nature reserves in mitigating the effects of climate change

Il ruolo delle riserve naturali integrali nella mitigazione degli effetti del cambiamento climatico

Francesco Solano^{(a)(*)} - Giovanni Quilghini^(b) - Giuseppe Modica^(c)

^(a) Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali (DAFNE), Università degli Studi della Tuscia; via San Camillo de Lellis snc - 01100 Viterbo, Italy.

^(b) Reparto Carabinieri Biodiversità Follonica; via Bicocchi 2 - 58022 Follonica, Italia.

^(c) Dipartimento di Scienze Veterinarie, Università degli Studi di Messina; viale G. Palatucci s/n - 98168 Messina, Italy.

^(*) Corresponding Author; f.solano@unitus.it

Abstract: Forests play a crucial role in climate change mitigation and adaptation by regulating microclimatic conditions, reducing temperature extremes and enhancing ecosystem resilience. In this context, strict nature reserves represent high-value reference systems, as they allow the observation of long-term forest maturation processes in the absence of direct human disturbance. However, their functional contribution to climate mitigation is still rarely considered in forest planning and conservation policies. This study investigates the role of the Poggio Tre Cancelli Strict Nature Reserve (central Italy) in mitigating summer forest surface temperatures, by comparing it with areas subject to different management regimes, including a natural park and productive coppice forests. The analysis integrates satellite-derived temperature data, forest structural attributes and topographic variables to assess differences in maximum forest surface temperature and to identify the main drivers of thermal regulation. Results show that the strict reserve exhibits significantly lower summer temperatures than managed forests, with an average reduction of up to approximately 2 °C compared to productive coppices, as well as lower interannual variability. Canopy height, vegetation water content and distance from forest edges emerge as key factors driving the cooling effect. This thermal reduction is particularly relevant in Mediterranean ecosystems, where it may help buffer heat extremes, reduce climate-related stress and enhance forest resilience under increasing warming conditions. These findings highlight that strict nature reserves are not only biodiversity conservation tools, but also effective ecological infrastructures providing measurable climate mitigation services relevant for forest management and planning.

Key words: strict nature reserves; forest microclimate; forest management; climate change mitigation; Mediterranean forests; remote sensing.

Citation: Solano, F., Quilghini, G., & Modica, G. (2026). Il ruolo delle riserve naturali integrali nella mitigazione degli effetti del cambiamento climatico. *L'Italia Forestale e Montana*, 81(2s), 140–157. <https://dx.doi.org/10.36253/ifm-1215>

Received: 05/02/2026 **Revised version:** 18/06/2026 **Published online:** 25/09/2026

1. INTRODUZIONE

Il riscaldamento globale sta determinando un aumento significativo della frequenza e dell'intensità degli eventi di caldo estremo e di siccità, con conseguenze rilevanti sul funzionamento degli ecosistemi forestali (IPCC, 2023). In questo contesto, le foreste rappresentano uno dei principali pilastri delle strategie di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici, grazie alla loro capacità di assorbire carbonio, regolare il ciclo idrologico e mitigare le temperature attraverso l'evapotraspirazione e la modifica del bilancio energetico superficiale (Barnes *et al.*, 2024; Gohr *et al.*, 2021; Mukul *et al.*, 2020). Inoltre, le foreste creano microclimi in grado di attenuare le condizioni estreme, offrendo rifugi climatici fondamentali per numerose specie e contribuendo alla resilienza degli ecosistemi forestali nel lungo periodo (De Frenne *et al.*, 2021; Vandewiele *et al.*, 2023; Zellweger *et al.*, 2020). Numerosi studi hanno evidenziato come la capacità delle foreste di regolare il microclima sia strettamente legata all'integrità strutturale della copertura arborea. Foreste mature e non disturbate, espressione di stadi evolutivi più avanzati, sono caratterizzate da una maggiore complessità verticale e orizzontale e da un più elevato sviluppo in altezza del soprassuolo. Queste caratteristiche favoriscono una maggiore stabilità termica e una minore variabilità microclimatica rispetto ai popolamenti gestiti intensivamente o sottoposti a disturbi ricorrenti (Lindenmayer *et al.*, 2022; Máliš *et al.*, 2023). La riduzione dell'altezza del soprassuolo, indicativa di condizioni strutturali ed evolutive meno avanzate, insieme alla frammentazione della copertura e l'aumento degli effetti di margine determinano un incremento delle temperature superficiali e una maggiore esposizione agli stress climatici, con potenziali ripercussioni sulla biodiversità e sul funzionamento degli ecosistemi (Fischer *et*

al., 2021; Vandewiele *et al.*, 2023; Zellweger *et al.*, 2020).

In questo quadro, la gestione forestale assume un ruolo centrale nel modulare la risposta delle foreste agli estremi climatici. Le pratiche selvicolturali influenzano direttamente la struttura del soprassuolo, la disponibilità idrica e la continuità degli habitat, incidendo sulla capacità delle foreste di smorzare le temperature e di mantenere condizioni microclimatiche favorevoli (Baliva *et al.*, 2024; Menge *et al.*, 2023). Studi recenti hanno dimostrato che le foreste sottoposte a protezione di lungo periodo mostrano una maggiore capacità di termoregolazione rispetto a quelle gestite a fini produttivi, confermando il ruolo chiave della conservazione nella regolazione climatica a scala locale e mesoclimatica (Adhikari *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2022).

Le riserve naturali integrali rappresentano un caso emblematico all'interno di questo contesto. Queste aree, caratterizzate dall'assenza di interventi selvicolturali e dalla libera evoluzione dei popolamenti forestali, consentono di osservare i processi di maturazione e di riorganizzazione strutturale degli ecosistemi nel lungo periodo. Sebbene istituite storicamente con finalità prevalentemente conservative, le riserve integrali sono oggi sempre più riconosciute come laboratori naturali per lo studio delle dinamiche forestali e come sistemi di riferimento per valutare gli effetti della gestione e della non-gestione sugli ecosistemi (Hemraj *et al.*, 2024; Piovesan *et al.*, 2022). Nonostante il crescente interesse per il ruolo delle aree protette nella mitigazione climatica (Huang *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2022), il contributo funzionale delle riserve integrali è ancora poco considerato nelle politiche forestali e nelle strategie di pianificazione territoriale, in particolare nel contesto mediterraneo. La maggior parte degli studi sulla capacità delle foreste di regolare le temperature si concentra su foreste primarie

o su soprassuoli derivanti da rimboschimenti, mentre i processi di recupero funzionale associati alla protezione integrale di lungo periodo rimangono scarsamente esplorati (Barnes et al., 2024; Zhang et al., 2020). Questo limite è particolarmente rilevante nel bacino del Mediterraneo, dove l'intensificazione delle ondate di calore e siccità si combina con una lunga storia di utilizzo forestale e frammentazione del paesaggio (Cramer et al., 2018; Palli et al., 2023).

In questo lavoro si analizza il ruolo della Riserva Naturale Integrale di Poggio Tre Cancelli (Toscana), una delle più antiche riserve integrali italiane, come caso studio per valutare la capacità delle foreste a protezione integrale di mitigare le temperature estive della copertura forestale. Attraverso il confronto con aree sottoposte a diversi regimi di gestione - parco naturale e foreste cedue a finalità produttive - lo studio intende valutare come la protezione di lungo periodo e la conseguente evoluzione strutturale del bosco influenzino la regolazione termica a scala mesoclimatica. In particolare, il lavoro mira a contribuire alla comprensione del ruolo delle riserve integrali come sistemi di riferimento per la valutazione degli effetti della gestione forestale sulla mitigazione climatica nelle foreste mediterranee. L'obiettivo è fornire evidenze utili a integrare il valore funzionale delle riserve integrali nelle strategie di gestione forestale sostenibile e nelle politiche di adattamento e mitigazione del cambiamento climatico.

2. INQUADRAMENTO STORICO E GESTIONALE DELLA RISERVA NATURALE INTEGRALE DI POGGIO TRE CANCELLI

Le riserve naturali integrali rappresentano uno degli strumenti più antichi e rigorosi di tutela forestale nel contesto italiano, concepite originariamente come aree destinate alla libera evoluzione degli ecosistemi e alla ricer-

ca scientifica. La loro istituzione si inserisce in una lunga tradizione di gestione pubblica del patrimonio forestale, nella quale la funzione produttiva dei boschi è stata progressivamente affiancata - e in alcuni casi sostituita - da obiettivi di conservazione e sperimentazione.

L'attuale Riserva Naturale Statale Integrale di Poggio Tre Cancelli, situata nel Comune di Follonica (GR), pervenne all'Amministrazione dello Stato con la Legge 20 giugno 1871, nota come Legge delle Foreste Inalienabili (Legge 20 giugno 1871, n. 283. Art. 1), insieme agli altri beni costituenti la Tenuta demaniale inalienabile di Follonica. Tali proprietà, furono successivamente affidate, a partire dal 1910, all'Azienda di Stato per le Foreste Demaniali (A.S.F.D.), istituita per la gestione del patrimonio forestale pubblico nazionale (Legge Luzzatti, 2 giugno 1910, n. 277).

Per lungo tempo, i boschi del comprensorio di Follonica hanno svolto una funzione eminentemente produttiva (Fig. 1), fornendo combustibile ai forni di fusione del ferro gestiti dapprima dall'Amministrazione della Magona del ferro e, successivamente, dalla Regia Amministrazione delle Miniere e Fonderie del Ferro.

Questa destinazione d'uso ha fortemente condizionato le forme di gestione forestale, orientate alla produzione di legna e carbone vegetale, con trattamenti a ceduo semplice e a capitozza, spesso associati al pascolo bovino.

Le fonti storiche di fine Ottocento documentano un'estesa copertura forestale gestita prevalentemente a ceduo e sottoposta a utilizzazioni periodiche. Già in questa fase erano tuttavia presenti primi tentativi di evoluzione verso forme di governo più orientate all'alto fusto attraverso interventi di matricinatura intensiva. In questi documenti si riporta che, a seguito della definizione dei confini e della risoluzione di contenziosi con il Comune di Massa Marittima, la superficie complessiva della



Figura 1 - Evoluzione storica della gestione forestale nell'area di Poggio Tre Cancelli. Esempi di utilizzazione forestale storica nel comprensorio di Montioni (cedui a turno breve per la produzione di legna e carbone) e aspetto attuale della Riserva Naturale Integrale di Poggio Tre Cancelli, a seguito di oltre sessant'anni di protezione integrale. (Fonte: Reparto Carabinieri Biodiversità Follonica).

Tenuta di Follonica ammontava a 11.297,72 ettari, di cui circa 9.763 ettari coperti da boschi. In tale periodo, la gestione forestale avveniva secondo un piano di governo provvisorio, finalizzato in parte alla conversione dei cedui in fustaia mediante matricinatura intensiva, secondo criteri riconducibili alle prime forme di avviamento ad alto fusto.

Nel primo piano di assestamento dei boschi della Tenuta, redatto nel 1939 (ASFD - Foresta di Follonica - Piano di Assestamento per il ventennio 1939-1958 a firma del capo dell'Ufficio Assestamento dell'Azienda di Stato Foreste Demaniali, Sen. Moser Dr. Luciano), l'area oggi corrispondente alla Riserva di Poggio Tre Cancelli era inclusa nel comprensorio denominato Bandita di Valli. Il Piano, fortemente orientato alla produzione di carbone, prevedeva il mantenimento del governo a ceduo anche nelle sezioni dove il ceduo risultava aduggiato dall'alto fusto, con turni progressivamente ridotti (da 20-24 anni fino a 16 anni) e un numero massimo di 60 matricine per ettaro. Le utilizzazioni forestali erano organizzate in lotti quinquenna-

li, in un contesto nel quale la pianificazione forestale risultava ancora fortemente subordinata alle esigenze produttive.

Le ultime utilizzazioni forestali documentate nell'area di Poggio Tre Cancelli risalgono alla stagione silvana 1947-1948, come riportato nei registri di tassazione del piano di assestamento del 1939. A partire da quel momento, l'area non è stata più interessata da interventi selvicolturali.

La Riserva Naturale Integrale di Poggio Tre Cancelli è stata formalmente individuata con atto interno dell'Azienda di Stato per le Foreste Demaniali nel 1961 e istituita ufficialmente con Decreto Ministeriale del 26 luglio 1971 (Ministero dell'Agricoltura e delle Foreste). Essa rappresenta la seconda riserva naturale integrale istituita in Italia, dopo la Riserva di Sasso Fratino, individuata due anni prima nell'Appennino forlivese. Oggi la riserva è classificata nella categoria IUCN Ia ed è gestita dal Raggruppamento Carabinieri Biodiversità.

Con l'istituzione della riserva e l'interruzione definitiva delle utilizzazioni forestali, il

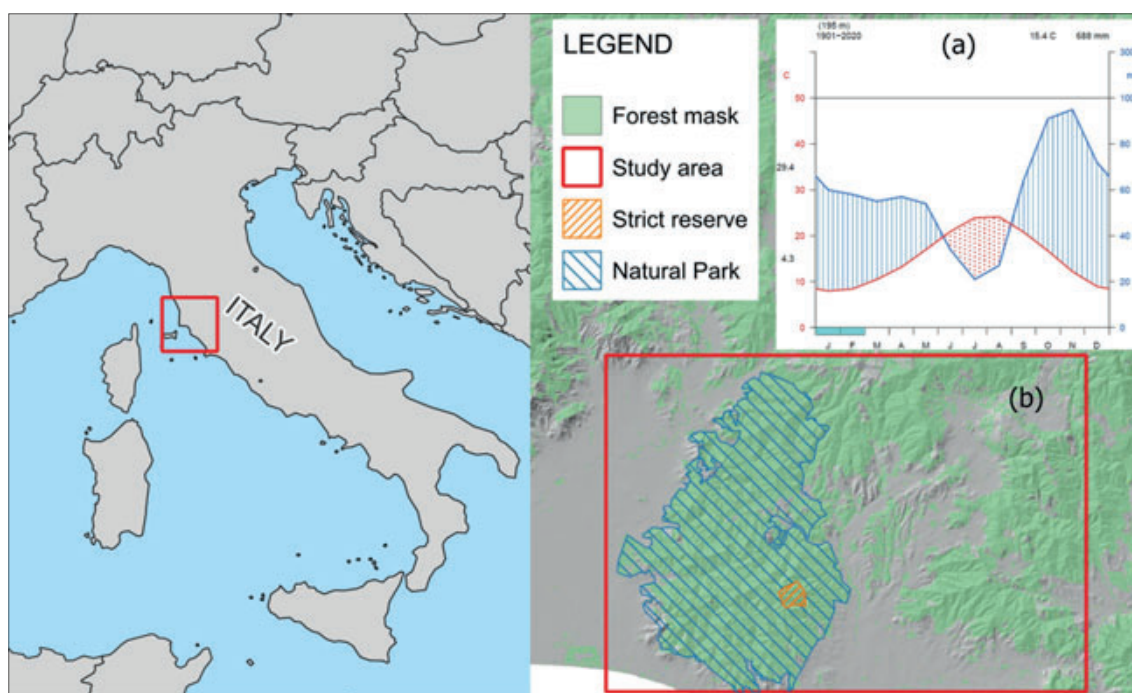


Figura 2 - Localizzazione dell'area di studio e contesto ambientale. (a) Principali caratteristiche climatiche dell'area di studio, con riferimento alle temperature e alle precipitazioni medie annue. (b) Inquadramento geografico della Riserva Naturale Integrale di Poggio Tre Cancelli (Toscana) e delle aree forestali circostanti, classificate secondo i diversi regimi di gestione forestale (riserva integrale, parco naturale, foreste produttive). (modificato da: Solano et al., 2025).

bosco ha intrapreso un percorso di evoluzione spontanea che si protrae da oltre sessant'anni. L'assenza di interventi selvicolturali ha favorito stadi evolutivi più avanzati e un progressivo aumento dell'altezza del soprassuolo, una crescente differenziazione strutturale e l'avvio di dinamiche tipiche dei popolamenti adulti, pur in un contesto mediterraneo costiero caratterizzato da limitazioni idriche e tassi di accrescimento relativamente contenuti. Il risultato è un bosco di leccio (*Quercus ilex* L.) in fase avanzata di maturazione, con struttura irregolare e presenza significativa di elementi di naturalità.

Nel contesto paesaggistico del comprensorio di Montioni, la compresenza di aree a protezione integrale, aree incluse in parco naturale e cedui produttivi esterni rende Poggio Tre Cancelli un sistema di studio particolarmente idoneo per analisi comparative sugli effetti del-

la gestione e conservazione forestale. In questo senso, la riserva può essere interpretata come un vero e proprio laboratorio naturale a cielo aperto, capace di fornire indicazioni preziose sui tempi e sulle modalità di recupero funzionale delle foreste mediterranee e sul ruolo della protezione integrale nella regolazione microclimatica e nella mitigazione degli estremi climatici.

3. AREA DI STUDIO E CONTESTO AMBIENTALE

La Riserva Naturale Integrale di Poggio Tre Cancelli è situata nella Toscana centro-occidentale, all'interno del comprensorio forestale di Montioni (42°58'58.45"N, 10°46'8.34"E), in un'area collinare prossima alla costa tirrenica (Fig. 2). Il territorio si sviluppa su substrati calcareo-marnosi, con quote comprese

tra circa 100 e 280 m s.l.m., e presenta una morfologia dolcemente ondulata, caratterizzata da rilievi di modesta altezza, impluvi e versanti con esposizioni differenziate. Questo assetto geomorfologico contribuisce a creare una notevole eterogeneità ambientale su scala locale, influenzando la distribuzione della vegetazione e le condizioni microclimatiche. Dal punto di vista bioclimatico, l'area rientra nella regione mediterranea, con variante oceanica pluvi stagionale (Pesaresi et al., 2017). Il clima è caratterizzato da estati calde e secche e da precipitazioni concentrate prevalentemente nei mesi autunnali e invernali. La temperatura media annua è di circa 15 °C, mentre le precipitazioni medie annue si attestano intorno ai 650-700 mm (Fig. 2). Negli ultimi decenni, come in gran parte del bacino del Mediterraneo, l'area ha sperimentato un aumento della frequenza delle ondate di calore estive e periodi di siccità più prolungati, rendendo il contesto particolarmente rilevante per lo studio dei processi di mitigazione climatica forniti dalle foreste.

La copertura forestale è dominata da popolamenti di leccio (*Quercus ilex* L.), accompagnati da specie tipiche della macchia e del bosco mediterraneo sempreverde, tra cui *Arbutus unedo* L., *Fraxinus ornus* L., *Ostrya carpinifolia* Scop. e, localmente, *Quercus cerris* L. All'interno della riserva, l'assenza di utilizzazioni forestali da oltre sessant'anni ha favorito l'evoluzione dei popo-

lamenti verso una struttura irregolare, con una copertura continua e un progressivo aumento dell'altezza del soprassuolo. I popolamenti mostrano caratteristiche riconducibili a fasi avanzate di maturazione, pur non avendo ancora raggiunto condizioni di foresta vetusta, soprattutto a causa dei bassi tassi di accrescimento tipici degli ambienti mediterranei costieri.

Il contesto paesaggistico circostante la riserva è caratterizzato dalla compresenza di aree forestali sottoposte a differenti regimi di gestione. Accanto al nucleo a protezione integrale, sono presenti aree incluse nel Parco di Montioni, dove la gestione forestale è orientata alla conservazione della biodiversità, alla rinaturalizzazione dei popolamenti e al mantenimento della resilienza degli ecosistemi forestali. In tali aree sono previsti interventi selvicolturali estensivi e a bassa intensità, tra cui la conversione dei cedui invecchiati all'alto fusto, la gestione di cedui composti invecchiati, interventi di diradamento e rinaturalizzazione nelle fustaie transitorie e nei popolamenti artificiali, nonché superfici destinate all'evoluzione naturale senza interventi selvicolturali. All'esterno del Parco sono invece presenti foreste governate a ceduo per finalità prevalentemente produttive, tuttora soggette a utilizzazioni periodiche (Tabella 1). Questa configurazione rende l'area di studio particolarmente adatta a un approccio comparativo, consentendo di analizzare l'effetto del grado di

Tabella 1 - Principali caratteristiche delle aree di studio.

Area	Superficie (ha)	Quota (m s.l.m.)	Composizione dendrologica prevalente	Regime di gestione
Riserva Naturale Integrale di Poggio Tre Cancelli	100	100-280	Boschi di leccio (<i>Quercus ilex</i> L.) con specie della macchia mediterranea	Protezione integrale (assenza di interventi dal 1948)
Parco naturale Montioni	4.711	100-280	Boschi di leccio (<i>Quercus ilex</i> L.) con specie della macchia mediterranea	Gestione conservativa
Boschi produttivi	2.400	100-280	Boschi di leccio (<i>Quercus ilex</i> L.)	Ceduo a finalità produttive

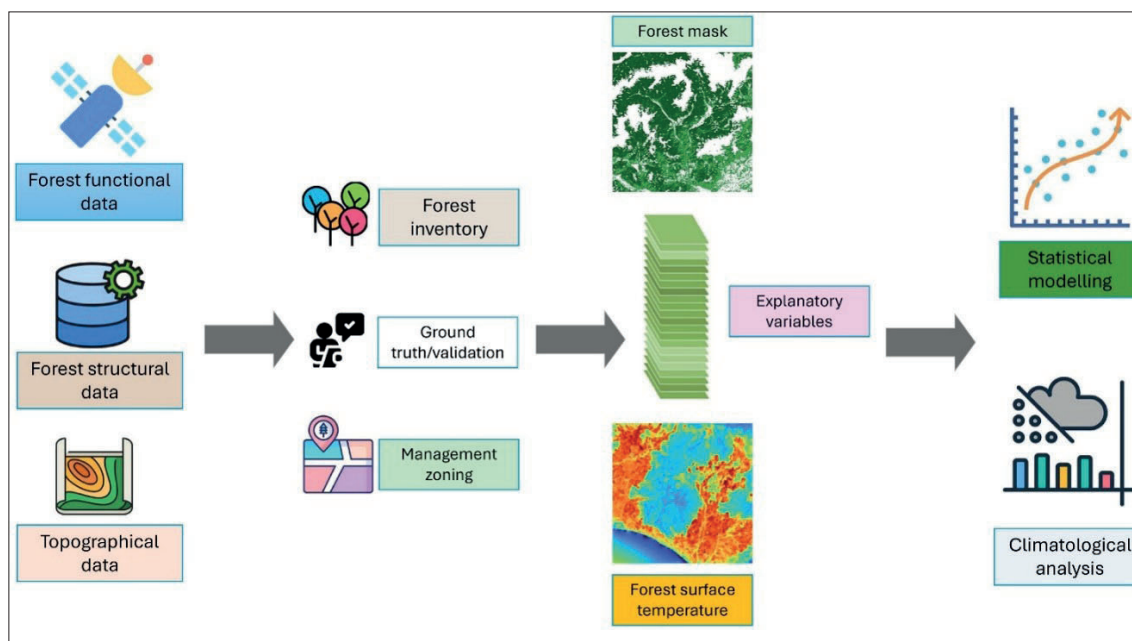


Figura 3 - Rappresentazione sintetica del flusso di lavoro adottato nello studio, dall'acquisizione dei dati satellitari e climatici alla caratterizzazione strutturale e funzionale dei popolamenti forestali, fino all'analisi statistica e alla modellistica della temperatura massima estiva della copertura forestale (FST_{max}) in relazione ai regimi di gestione.

protezione e della storia gestionale sulla struttura forestale e sulle funzioni ecosistemiche.

La prossimità spaziale tra popolamenti con composizione floristico-ecologica simile, ma con differenti traiettorie gestionali, riduce l'influenza di fattori biogeografici e climatici di larga scala, permettendo di attribuire con maggiore affidabilità le differenze osservate nella regolazione termica e nella stabilità microclimatica al regime di gestione forestale. In questo senso, Poggio Tre Cancelli e il suo contesto rappresentano un sistema di studio ideale per valutare il ruolo delle foreste a protezione integrale come elementi attivi di mitigazione climatica nel paesaggio mediterraneo.

4. MATERIALI E METODI

4.1 Impostazione dello studio e classi di gestione

Lo studio è stato impostato secondo un approccio comparativo volto a valutare l'effetto

del regime di gestione forestale sulla temperatura estiva della copertura forestale (Fig. 3). L'area di studio è stata suddivisa in tre classi di gestione: (i) riserva naturale integrale, corrispondente al nucleo della Riserva di Poggio Tre Cancelli; (ii) aree forestali incluse nel parco naturale circostante; (iii) foreste produttive gestite a ceduo. La selezione delle aree di confronto è stata effettuata garantendo la comparabilità ecologica dei popolamenti, limitando l'analisi a superfici forestali con composizione floristico-ecologica simile, dominate da *Quercus ilex*, sviluppate su substrati calcareo-marnosi e localizzate all'interno di un raggio spaziale limitato.

4.2 Dati satellitari e temperatura della copertura forestale

La temperatura della copertura forestale (FST) è stata stimata mediante dati satellitari termici acquisiti nel periodo estivo (1° giugno - 31 agosto) per il decennio 2013-2023, uti-

lizzando immagini *Landsat 8* opportunamente elaborate. La temperatura superficiale è stata utilizzata come proxy della temperatura della copertura forestale, seguendo procedure consolidate e ampiamente validate in letteratura (Jimenez-Munoz et al., 2009; Mildrexler et al., 2011; Sobrino et al., 2004). L'analisi si è concentrata sui valori massimi estivi, ritenuti particolarmente rappresentativi delle condizioni di stress termico per gli ecosistemi forestali mediterranei. Le elaborazioni sono state effettuate in ambiente di *cloud computing* tramite la piattaforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017), consentendo la gestione di serie temporali pluriennali e la riduzione degli effetti legati alla copertura nuvolosa e alla variabilità interannuale. A seguito dell'applicazione dei criteri di selezione relativi al periodo di acquisizione e alla copertura nuvolosa, il dataset finale impiegato per le analisi è risultato pari a 143 scene Landsat distribuite nel periodo 2013-2023. I dati di temperatura sono stati successivamente limitati alle sole superfici forestali mediante l'applicazione di una maschera forestale derivata dai dati dell'inventario forestale della Toscana (<https://dati.toscana.it/dataset/ucs/resource/92355190-d959-436c-92a6-e370950f915f>), e dal dataset HRL Forest Type 2021 del Copernicus Land Monitoring Service (<https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-forests-and-tree-cover/forest-type-2021-raster-10-m-100-m-europe-3-yearly>), dell'Agenzia Spaziale Europea. Considerando la risoluzione spaziale Landsat di 30 m, sono stati analizzati quindi approssimativamente 1.111 pixel per la Riserva integrale, 52.344 pixel per il Parco naturale e 26.667 pixel per i boschi cedui produttivi.

4.3 Variabili strutturali, funzionali, topografiche ed effetto margine

La struttura e il funzionamento della copertura forestale sono stati caratterizzati mediante

l'integrazione di parametri strutturali, funzionali e spaziali, derivati da dataset satellitari e geospaziali ampiamente validati e consolidati in letteratura.

La struttura forestale è stata descritta mediante mappe di altezza della chioma (Canopy Height Model, CHM) derivate dal dataset di Lang et al. (2023), basato sull'integrazione di dati LiDAR GEDI e immagini Sentinel-2, e mappe di biomassa epigea (Above-Ground Biomass, AGB) estratte dal dataset globale di Harris et al. (2021). Il CHM è stato considerato rappresentativo dell'intero periodo di studio data la maturità dei popolamenti analizzati ed è stato ricampionato a 30 m per garantire coerenza spaziale con l'AGB.

I dataset strutturali sono stati validati mediante confronto con dati a terra forniti dal Raggruppamento Carabinieri Biodiversità di Follonica, raccolti lungo un transetto di campionamento di 13.500 m² all'interno della riserva integrale. Tutti gli alberi vivi e morti in piedi sono stati geolocalizzati mediante ricevitore GNSS; per ciascun individuo sono stati misurati il diametro a petto d'uomo (DBH, a 1,30 m) con soglia di cavallettamento pari a 5 cm, e l'altezza totale. Il volume e la biomassa sono stati stimati utilizzando equazioni allometriche specie-specifiche dell'Inventario Forestale Nazionale (Tabacchi et al., 2011). I dati di campo sono stati importati in ambiente QGIS (QGIS Development Team, 2024) e aggregati su una griglia di 30 × 30 m; per il confronto con il CHM, l'altezza forestale è stata rappresentata dal 98° percentile delle altezze misurate, coerentemente con la definizione di RH98 derivata dalle forme d'onda GEDI L1B (Lang et al., 2023). La relazione tra dati telerilevati e misure di campo è stata infine valutata mediante regressione lineare.

I parametri funzionali sono stati derivati da immagini Landsat 8, calcolando l'Enhanced Vegetation Index (EVI) come indicatore del-

la densità e attività fotosintetica (Huete et al., 2002) e il Normalized Difference Moisture Index (NDMI) come proxy dello stato idrico della chioma (Gao, 1996). La densità di copertura arborea (TCD) è stata stimata tramite il layer Tree Cover Density 2021 del Copernicus Land Monitoring Service (<https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-forests-and-tree-cover/tree-cover-density-2021-raster-10-m-100-m-europe-yearly>) (accesso novembre 2023).

L'effetto di margine forestale è stato valutato calcolando la distanza dal confine del bosco a partire dal layer Forest Type 2021 del Copernicus Land Monitoring Service (<https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-forests-and-tree-cover/forest-type-2021-raster-10-m-100-m-europe-3-yearly>) (accesso novembre 2023), seguendo la definizione FAO di foresta (FAO, 2023).

4.4 Anomalie climatiche e siccità

Il contesto climatico è stato analizzato mediante serie temporali di anomalie della temperatura massima estiva dell'aria ($T_{\max}A$), derivate dai dataset di Brunetti et al. (2006, 2014), per il periodo 1980-2023. Le tendenze di $T_{\max}A$ e delle anomalie di temperatura della copertura forestale ($FST_{\max}$) sono state valutate tramite regressione ai minimi quadrati e test di Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945). La relazione tra $T_{\max}A$, $FST_{\max}$ e condizioni di siccità è stata analizzata utilizzando il self-calibrated Palmer Drought Severity Index (scPDSI), scaricato dal Climatic Research Unit (CRU) (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/>) (accesso aprile 2024) (Palmer, 1965; van der Schrier et al., 2013; Wells et al., 2004).

4.5 Analisi statistiche e modellistica

Le differenze di $FST_{\max}$ tra le classi di gestione sono state valutate mediante test di

Kruskal-Wallis, con confronti post-hoc basati sul Dunn's z-test e correzione di Benjamini-Hochberg (Benjamini & Hochberg, 1995; Dunn, 1964). La stabilità termica è stata analizzata confrontando i coefficienti di variazione di $FST_{\max}$ (Forkman, 2009). Dopo la verifica delle assunzioni statistiche e della multicollinearità ($VIF < 5$; O'Brien, 2007), sono stati applicati modelli di regressione multipla e Modelli Additivi Generalizzati (GAM) per valutare l'effetto congiunto delle variabili topografiche, strutturali e funzionali sulla temperatura della copertura forestale, includendo la classe di gestione come fattore o effetto casuale (Wood, 2017). Le analisi sono state condotte in JASP (JASP Team, 2023) e R (R Core Team, 2024), utilizzando i pacchetti "mgcv" e "tidyverse".

5. RISULTATI

5.1 Differenze di temperatura tra i regimi di gestione forestale

La validazione del CHM ha mostrato una forte correlazione con il 98° percentile delle altezze misurate ($R^2 = 0,86$; $F(1,13) = 77,72$; $p < 0,001$), confermandone l'idoneità per le analisi successive. Al contrario, la correlazione tra AGB misurata e dataset globale non è risultata significativa ($R^2 = 0,024$; $F(1,13) = 0,32$; $p = 0,581$), motivo per cui l'AGB globale non è stata inclusa nella modellizzazione. La temperatura massima estiva della copertura forestale ($FST_{\max}$) mostra differenze significative tra i diversi regimi di gestione. Le foreste a protezione integrale presentano valori di $FST_{\max}$ sistematicamente inferiori rispetto alle aree forestali gestite, con le temperature più elevate osservate nei cedui a finalità produttive (Fig. 4). Le aree incluse nel parco naturale mostrano valori intermedi, collocandosi tra la riserva integrale e le foreste produttive.

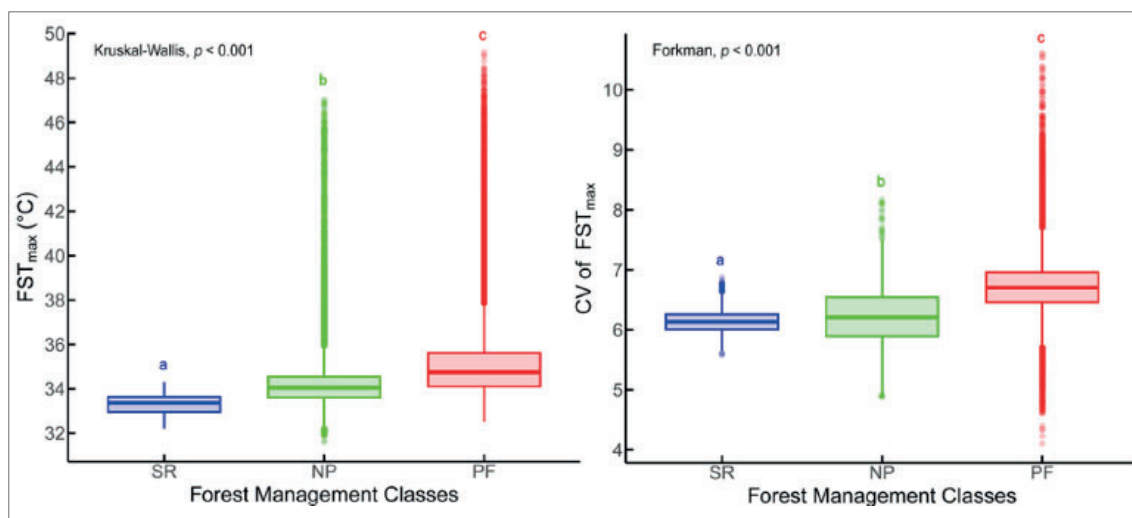


Figura 4 - Distribuzione dei valori di FST_{max} nelle tre classi di gestione forestale (riserva integrale, parco naturale, foreste produttive). Le foreste a protezione integrale mostrano temperature significativamente inferiori e una minore variabilità rispetto alle foreste gestite, evidenziando una maggiore capacità di mitigazione degli estremi termici estivi. (modificato da: Solano et al., 2025).

Il test di Kruskal-Wallis evidenzia differenze statisticamente significative tra le classi di gestione ($p < 0,05$). I confronti post-hoc basati sul Dunn's z-test, con correzione di Benjamini-Hochberg, indicano differenze significative tra la riserva integrale e le foreste produttive, mentre le differenze tra riserva integrale e parco naturale risultano meno marcate (Fig. 4). Complessivamente, la riserva integrale presenta una riduzione media di FST_{max} fino a circa 2 °C in media rispetto ai cedui produttivi.

5.2 Variabilità interannuale e stabilità termica

Oltre alle differenze nei valori medi, le classi di gestione mostrano comportamenti distinti in termini di variabilità interannuale della temperatura estiva. La riserva integrale è caratterizzata da una minore dispersione dei valori di FST_{max} , indicando una maggiore stabilità termica nel tempo. Al contrario, le foreste produttive presentano una variabilità più elevata, con una risposta più accentuata agli anni caratterizzati da condizioni climatiche estreme.

Il confronto dei coefficienti di variazione (Fig. 4) conferma che la riserva integrale mostra una variabilità significativamente inferiore rispetto alle altre classi di gestione. Questo risultato suggerisce che la protezione integrale non solo riduce i valori massimi di temperatura, ma contribuisce anche ad attenuare la sensibilità della copertura forestale alle fluttuazioni climatiche interannuali.

5.3 Relazione tra anomalie climatiche, siccità e temperatura forestale

L'analisi delle anomalie di temperatura massima dell'aria (T_{max}^A) evidenzia un trend positivo significativo nel periodo 1980-2023, con un aumento marcato delle condizioni di caldo estremo estivo. Nel periodo comune 2013-2023, le anomalie di T_{max}^A risultano positivamente correlate con le anomalie di FST_{max} in tutte le classi di gestione, indicando una risposta diretta della temperatura della copertura forestale agli estremi termici atmosferici. Tuttavia, la forza della relazione tra T_{max}^A e FST_{max} differisce tra i regimi di gestione. Le foreste a protezione integrale

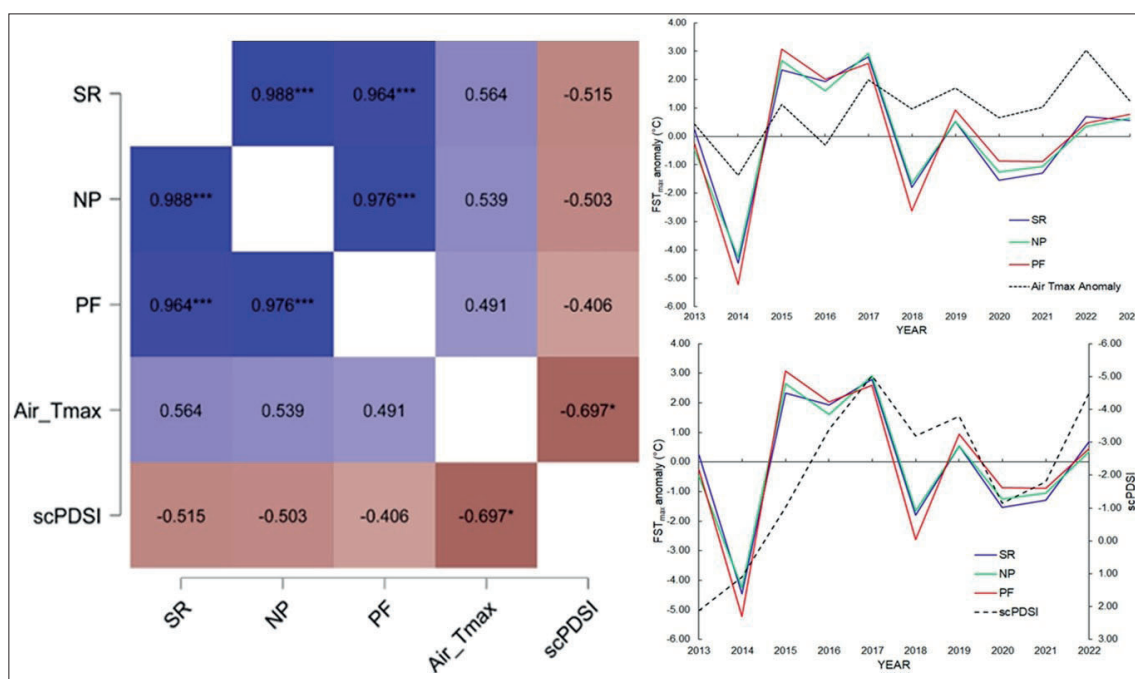


Figura 5 - Andamento delle anomalie di temperatura massima estiva dell'aria ($T_{\max}$ A) e della temperatura massima della copertura forestale ($FST_{\max}$), e relazione tra $FST_{\max}$ e condizioni di siccità espresse tramite lo scPDSI. Le foreste a protezione integrale mostrano una risposta attenuata agli estremi climatici rispetto alle foreste produttive. (modificato da: Solano et al., 2025).

mostrano coefficienti di correlazione più bassi rispetto alle foreste produttive, suggerendo una maggiore capacità di attenuare l'impatto delle ondate di calore. Le aree del parco naturale presentano valori intermedi.

Un andamento analogo emerge dall'analisi della relazione tra $FST_{\max}$ e condizioni di siccità, espresse tramite lo scPDSI. Valori più negativi di scPDSI (condizioni di maggiore aridità) sono associati a un aumento di $FST_{\max}$, con una risposta più marcata nelle foreste produttive rispetto alla riserva integrale (Fig. 5). Questo risultato indica che le foreste sottoposte a protezione integrale risultano meno sensibili agli episodi di siccità estiva.

5.4 Ruolo dei fattori strutturali, funzionali e topografici

I modelli di regressione multipla evidenziano che, a parità di condizioni topografiche, il

regime di gestione forestale rimane un fattore significativo nel determinare la temperatura massima della copertura forestale (Tab. 2). L'inclusione delle variabili strutturali e funzionali migliora significativamente la capacità esplicativa dei modelli, indicando che lo sviluppo strutturale del soprassuolo e lo stato funzionale della vegetazione svolgono un ruolo chiave nella regolazione termica.

I Modelli Additivi Generalizzati (GAM) mostrano relazioni non lineari tra $FST_{\max}$ e diversi predittori (Fig. 6). In particolare, un aumento dell'altezza della copertura forestale e della densità di chioma è associato a una riduzione di $FST_{\max}$, mentre valori elevati di distanza dal margine forestale risultano correlati a temperature più basse. Gli indici funzionali legati allo stato idrico della vegetazione emergono come determinanti importanti nel modulare la risposta termica durante i periodi estivi.

Tabella 2 - Risultati dei modelli di regressione multipla utilizzati per valutare l'effetto delle variabili topografiche, strutturali, funzionali e delle classi di gestione forestale sulla temperatura massima estiva della copertura forestale (FST_{max}). Le classi di gestione forestale sono incluse come fattore, con la riserva naturale integrale utilizzata come categoria di riferimento. I livelli di significatività sono indicati come segue: *** $p < 0.001$.

Model		Unstandardized	Standard Error	Standardized	t
H ₀	(Intercept)	34.613	0.006		5617.2***
H ₁	(Intercept)	41.617	0.04		1043.6***
	Elevation	-0.002	6.129×10^{-5}	-0.071	-32.5***
	Slope	-0.011	3.671×10^{-4}	-0.048	-28.7***
	Northness	-0.035	0.005	-0.013	-7.3***
	Eastness	0.364	0.005	0.135	77.8***
	TPI	0.073	0.005	0.025	15***
	CHM	-0.086	0.002	-0.128	-57.5***
	TCD	-0.018	4.215×10^{-4}	-0.156	-43.1***
	EVI	0.994	0.072	0.047	13.8***
	NDMI	-13.012	0.09	-0.536	-144.2***
	Edge distance	-57.14	7.607×10^{-6}	-0.143	-69.8***
	Forest management classes				
	NP	0.13	0.025		5.1***
	PF	1.145	0.026		44.6***

Nel complesso, i risultati indicano che le foreste a protezione integrale, grazie a una maggiore complessità strutturale e a una migliore funzionalità ecologica, presentano una capacità superiore di attenuare le temperature estive e di ridurre la sensibilità agli estremi climatici rispetto a foreste governate a ceduo per fini produttivi.

6. DISCUSSIONE

I risultati di questo studio confermano che il regime di gestione forestale esercita un'influenza determinante sulla capacità delle foreste mediterranee di mitigare le temperature estive e di attenuare l'impatto degli estremi climatici. Le foreste a protezione integrale mostrano valori significativamente inferiori di

temperatura massima della copertura forestale e una minore variabilità interannuale rispetto alle foreste gestite, evidenziando una maggiore stabilità microclimatica. La riduzione di circa 2 °C osservata nella riserva integrale evidenzia come la libera evoluzione di lungo periodo possa contribuire in modo sostanziale alla mitigazione delle ondate di calore, rafforzando il ruolo delle foreste mature come infrastrutture naturali per l'adattamento al cambiamento climatico. Questo risultato è coerente con numerosi studi che attribuiscono alle foreste mature e strutturalmente complesse una maggiore capacità di buffering termico, legata all'ombreggiamento, all'elevata evapotraspirazione e alla continuità della copertura arborea (Barnes et al., 2024; De Frenne et al., 2021; Zellweger et al., 2020).

La ridotta sensibilità delle foreste a protezione integrale alle anomalie di temperatu-

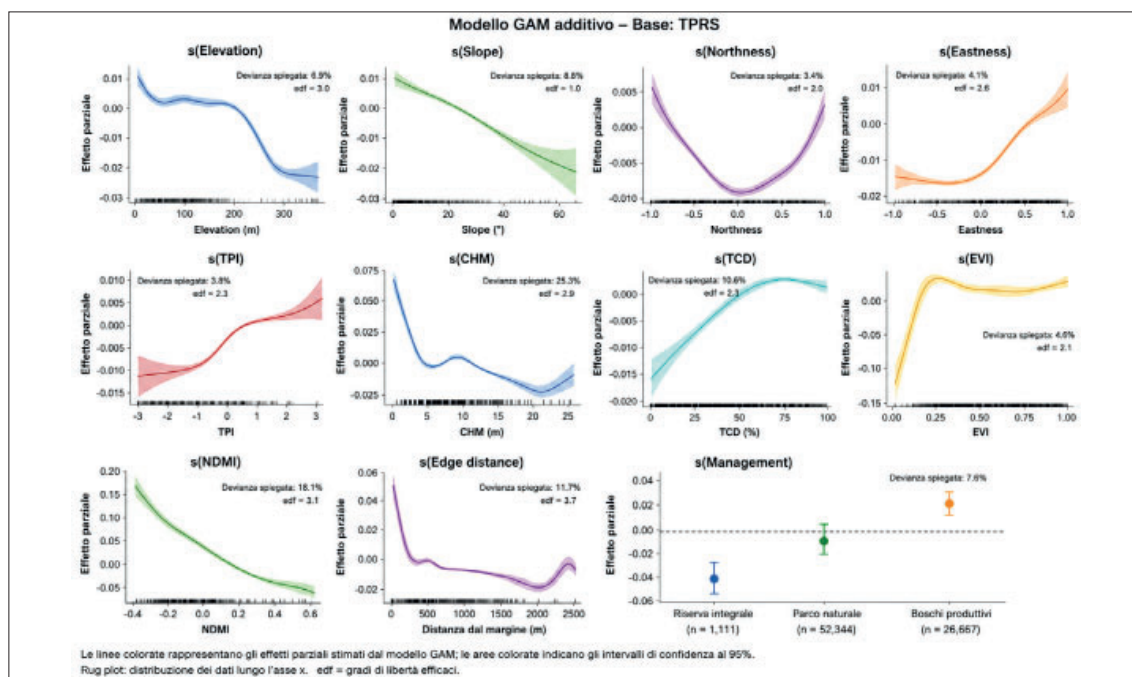


Figura 6 - Risultati dei Modelli Additivi Generalizzati (GAM) che descrivono la relazione tra FST_{max} e i principali predittori topografici, strutturali e funzionali del bosco. L'aumento dell'altezza del soprassuolo, della densità della chioma e della distanza dal margine forestale è associato a una riduzione della temperatura massima estiva della copertura forestale (modificato da: Solano et al., 2025).

ra dell'aria e agli episodi di siccità suggerisce che la protezione di lungo periodo favorisca il mantenimento di processi ecologici in grado di compensare, almeno parzialmente, l'aumento delle temperature estive. Studi recenti hanno dimostrato che le foreste non disturbate o sottoposte a lunghi periodi di non-gestione mostrano una risposta termica più attenuata durante le ondate di calore, rispetto a popolamenti gestiti intensivamente (Adhikari et al., 2024; Xu et al., 2022). I risultati ottenuti a Poggio Tre Cancelli si inseriscono pienamente in questo quadro, estendendo tali evidenze al contesto delle foreste mediterranee costiere, finora meno investigate.

Il ruolo della struttura forestale emerge come elemento centrale nella regolazione della temperatura della copertura forestale. L'altezza del soprassuolo, la densità della chioma e il contenuto idrico della vegetazione risulta-

no fortemente associati a una riduzione di FST_{max} , in accordo con quanto riportato da studi basati su dati LiDAR e telerilevamento multispettrale, che evidenziano come la complessità strutturale favorisca un microclima più fresco e stabile (Lindenmayer et al., 2022; Máliš et al., 2023). In questo senso, le riserve integrali rappresentano sistemi di riferimento particolarmente utili per comprendere i tempi e le modalità di recupero funzionale delle foreste dopo l'abbandono delle utilizzazioni.

Le aree incluse nel parco naturale mostrano valori intermedi di temperatura e stabilità termica, suggerendo che regimi di gestione estensiva o orientati alla conservazione possano contribuire a migliorare la resilienza climatica rispetto alle foreste produttive. Questo risultato è in linea con studi che evidenziano come la riduzione dell'intensità degli interventi selvicolturali e l'aumento della continuità

del soprassuolo possano attenuare gli effetti del riscaldamento locale, pur mantenendo una funzione gestionale attiva (Baliva et al., 2024; Menge et al., 2023).

Un ulteriore aspetto rilevante riguarda l'effetto di margine forestale. Le temperature più elevate osservate in prossimità dei bordi confermano che la frammentazione del paesaggio amplifica lo stress termico e riduce l'efficacia dei meccanismi di raffreddamento forestale, come già documentato in diversi contesti biogeografici (Fischer et al., 2021; Wang et al., 2020). In ambienti mediterranei, dove caldo e siccità agiscono congiuntamente, la conservazione di nuclei forestali continui e la limitazione degli effetti di margine assumono quindi un'importanza strategica. Le evidenze emerse suggeriscono inoltre che le riserve naturali integrali possano svolgere un ruolo di riferimento per la gestione delle foreste mediterranee soggette a utilizzazione. Sebbene le condizioni strutturali osservate a Poggio Tre Cancelli siano il risultato di oltre sessant'anni di libera evoluzione e non possano essere replicate integralmente nei contesti produttivi, esse forniscono indicazioni utili sulle traiettorie evolutive e sui benefici funzionali associati alla riduzione del disturbo antropico. In particolare, l'aumento dell'altezza del soprassuolo, la maggiore continuità della copertura forestale e la riduzione degli effetti di margine rappresentano caratteristiche che potrebbero essere perseguite, almeno in parte, anche attraverso forme di gestione meno intensive e orientate alla resilienza climatica.

Dal punto di vista delle politiche forestali e ambientali, i risultati rafforzano il valore delle riserve naturali integrali come strumenti chiave non solo per la conservazione della biodiversità, ma anche per la mitigazione climatica. In linea con quanto proposto da Piovesan et al. (2022) e Hemraj et al. (2024), le riserve integrali possono essere interpretate come veri e propri benchmark funzionali, utili per valutare

l'efficacia delle strategie di gestione forestale e per definire obiettivi di resilienza climatica realistici. In questo senso, esse rappresentano laboratori naturali indispensabili per orientare le politiche di adattamento al cambiamento climatico nel settore forestale.

Nel complesso, questo studio suggerisce che integrare il ruolo funzionale delle riserve integrali nella pianificazione forestale e territoriale potrebbe contribuire in modo significativo a rafforzare la capacità delle foreste mediterranee di fronteggiare il riscaldamento globale. Riconoscere tali aree non solo come strumenti di tutela passiva, ma come componenti attive delle strategie climatiche, appare coerente con le attuali politiche europee per il clima e la biodiversità e rappresenta una prospettiva concreta per una gestione forestale orientata alla resilienza di lungo periodo.

7. CONCLUSIONI

Questo studio dimostra che il regime di gestione forestale influenza in modo significativo la capacità delle foreste mediterranee di mitigare le temperature estive e di rispondere agli estremi climatici. In particolare, le foreste a protezione integrale hanno mostrato una riduzione della temperatura massima estiva della copertura forestale fino a 2 °C rispetto ai cedui gestiti a fini produttivi, evidenziando una superiore capacità di buffering nei confronti delle ondate di calore e dei periodi di siccità.

I risultati indicano che la complessità strutturale del soprassuolo, la continuità della copertura arborea e una migliore funzionalità ecologica rappresentano fattori chiave nella regolazione microclimatica. In questo contesto, le riserve naturali integrali emergono come sistemi di riferimento di elevato valore funzionale, capaci di fornire servizi ecosistemici rilevanti per la mitigazione climatica, oltre

al loro ruolo tradizionale nella conservazione della biodiversità.

Dal punto di vista gestionale, lo studio suggerisce che strategie forestali orientate alla riduzione dell'intensità degli interventi, all'aumento dell'altezza e della continuità del soprassuolo e al contenimento degli effetti di margine possano contribuire a rafforzare la resilienza climatica delle foreste, anche al di fuori delle aree a protezione integrale. Le aree sottoposte a regimi di gestione estensiva o di tutela parziale mostrano infatti comportamenti intermedi, indicando la possibilità di integrare obiettivi produttivi e funzioni climatiche.

In termini di policy, i risultati supportano l'inclusione delle riserve integrali e delle foreste a elevata naturalità tra gli strumenti strategici per l'adattamento e la mitigazione del cambiamento climatico. Riconoscere e valorizzare il loro ruolo come infrastrutture ecologiche e benchmark funzionali può contribuire a orientare la pianificazione forestale e territoriale verso modelli più resilienti e sostenibili, in linea con le attuali politiche europee per il clima e la biodiversità. Le evidenze emerse suggeriscono inoltre che la promozione di soprassuoli più alti, strutturalmente complessi e meno frammentati, nonché l'individuazione di aree da destinare alla libera evoluzione, possano rappresentare strategie efficaci per rafforzare la resilienza climatica delle foreste mediterranee.

Finanziamento

Unione Europea - NextGenerationEU, Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Missione 4 Componente 2, tramite il Ministero dell'Università e della Ricerca:

- Progetto CN00000022, Centro Nazionale di Ricerca Agritech;
- Progetto CN00000033, NBFC - National Biodiversity Future Center.

RIASSUNTO

Le foreste svolgono un ruolo cruciale nella mitigazione e nell'adattamento ai cambiamenti climatici grazie alla loro capacità di regolare il microclima, ridurre le temperature estreme e aumentare la resilienza degli ecosistemi. In questo contesto, le riserve naturali integrali rappresentano sistemi di riferimento di elevato valore, poiché consentono di osservare i processi di maturazione forestale in assenza di disturbi antropici diretti. Tuttavia, il loro contributo funzionale alla mitigazione climatica è ancora scarsamente considerato nella pianificazione forestale e nelle politiche di conservazione. In questo lavoro viene analizzato il ruolo della Riserva Naturale Integrale di Poggio Tre Cancelli (Toscana) nella mitigazione delle temperature estive della copertura forestale, confrontandola con aree sottoposte a diversi regimi di gestione, tra cui un parco naturale e foreste cedue a finalità produttive. L'analisi si basa sull'integrazione di dati satellitari, informazioni strutturali della copertura forestale e variabili topografiche, al fine di valutare le differenze nella temperatura massima superficiale del bosco e i principali fattori che ne determinano la variabilità. I risultati mostrano che la riserva integrale presenta temperature estive significativamente inferiori rispetto alle foreste gestite, con una riduzione media fino a circa 2 °C rispetto ai cedui produttivi e una minore variabilità interannuale. L'altezza della copertura forestale, il contenuto idrico della vegetazione e la distanza dai margini forestali emergono come fattori chiave nel determinare l'effetto di raffreddamento. Lo studio evidenzia come le riserve integrali rappresentino vere e proprie infrastrutture ecologiche, in grado di fornire servizi ecosistemici rilevanti per la mitigazione climatica e per la pianificazione forestale.

BIBLIOGRAFIA

- Adhikari, Y., Bachstein, N., Gohr, C., Blumröder, J. S., Meier, C., & Ibisch, P. L. (2024). Old-growth beech forests in Germany as cool islands in a warming landscape. *Scientific Reports*, 14(1), 30311. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81209-0>
- Baliva, M., Palli, J., Perri, F., Iovino, F., Luzzi, G., & Piovesan, G. (2024). The return of tall forests: Reconstructing the canopy resilience of an extensively harvested primary forest in Mediterranean mountains. *Science of The Total Environment*, 953, 175806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175806>

- Barnes, M. L., Zhang, Q., Robeson, S. M., Young, L., Burakowski, E. A., Oishi, A. C., Stoy, P. C., Katul, G., & Novick, K. A. (2024). A century of reforestation reduced anthropogenic warming in the eastern United States. *Earth's Future*, 12(2), e2023EF003663. <https://doi.org/10.1029/2023EF003663>
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Brunetti, M., Maugeri, M., Monti, F., & Nanni, T. (2006). Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *International Journal of Climatology*, 26(3), 345–381. <https://doi.org/10.1002/joc.1251>
- Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., Simolo, C., & Spinoni, J. (2014). High-resolution temperature climatology for Italy: Interpolation method intercomparison. *International Journal of Climatology*, 34(4), 1278–1296. <https://doi.org/10.1002/joc.3764>
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8(11), 972–980. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- De Frenne, P., Lenoir, J., Luoto, M., Scheffers, B. R., Zellweger, F., Aalto, J., Ashcroft, M. B., Christiansen, D. M., Decocq, G., De Pauw, K., Govaert, S., Greiser, C., Gril, E., Hampe, A., Jucker, T., Klimes, D. H., Koelemeijer, I. A., Lembrechts, J. J., Marrec, R., ... Hylander, K. (2021). Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology*, 27(11), 2279–2297. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
- Dunn, O. J. (1964). Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, 6(3), 241–252. <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>
- FAO. (2023). *Terms and definitions FRA 2025*. Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura. www.fao.org/forestry
- Fischer, R., Taubert, F., Müller, M. S., Groeneveld, J., Lehmann, S., Wiegand, T., & Huth, A. (2021). Accelerated forest fragmentation leads to critical increase in tropical forest edge area. *Science Advances*, 7(37), eabg7012. <https://www.science.org>
- Forkman, J. (2009). Estimator and tests for common coefficients of variation in normal distributions. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 38(2), 233–251. <https://doi.org/10.1080/03610920802187448>
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gohr, C., Blumröder, J. S., Sheil, D., & Ibsch, P. L. (2021). Quantifying the mitigation of temperature extremes by forests and wetlands in a temperate landscape. *Ecological Informatics*, 66, 101442. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101442>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., de Bruin, S., Farina, M., Fatoyinbo, L., Hansen, M. C., Herold, M., Houghton, R. A., Potapov, P. V., Suarez, D. R., Roman-Cuesta, R. M., Saatchi, S. S., Slay, C. M., Turubanova, S. A., & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11(3), 234–240. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>
- Hemraj, D. A., Bishop, M., Carstensen, J., Krause-Jensen, D., Stæhr, P. A. U., & Russell, B. D. (2024). Nature protection must precede restoration. *Science*, 383(6679), 158–158. <https://doi.org/10.1126/science.adn0543>
- Huang, Q., Xu, J., Wong, J. P., Radeloff, V. C., & Songer, M. (2023). Prioritizing global tall forests toward the 30 × 30 goals. *Conservation Biology*, 37(6), e14135. <https://doi.org/10.1111/cobi.14135>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- IPCC. (2023). Technical summary. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 37–118). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.002>

- JASP Team. (2023). *JASP* (Versione 0.18.1) [Software informatico]. <https://jasp-stats.org>
- Jimenez-Munoz, J. C., Cristobal, J., Sobrino, J. A., Soria, G., Ninyerola, M., Pons, X., & Pons, X. (2009). Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1), 339–349. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2007125>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4^a ed.). Charles Griffin.
- Lang, N., Jetz, W., Schindler, K., & Wegner, J. D. (2023). A high-resolution canopy height model of the Earth. *Nature Ecology & Evolution*, 7(11), 1778–1789. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02206-6>
- Lindenmayer, D., Blanchard, W., McBurney, L., Bowd, E., Youngentob, K., Marsh, K., & Taylor, C. (2022). Stand age related differences in forest microclimate. *Forest Ecology and Management*, 510, 120101. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120101>
- Máliš, F., Ujházy, K., Hederová, L., Ujházyová, M., Csölleová, L., Coomes, D. A., & Zellweger, F. (2023). Microclimate variation and recovery time in managed and old-growth temperate forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 342, 109722. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109722>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Menge, J. H., Magdon, P., Wöllauer, S., & Ehbrecht, M. (2023). Impacts of forest management on stand and landscape-level microclimate heterogeneity of European beech forests. *Landscape Ecology*, 38(4), 903–917. <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01596-z>
- Mildrexler, D. J., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). A global comparison between station air temperatures and MODIS land surface temperatures reveals the cooling role of forests. *Journal of Geophysical Research*, 116(G3), G03025. <https://doi.org/10.1029/2010JG001486>
- Mukul, S. A., Halim, M. A., & Herbohn, J. (2020). Forest carbon stock and fluxes: Distribution, biogeochemical cycles, and measurement techniques. In *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation* (pp. 1–16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71065-5_23-1
- O'Brien, R. M. (2007). A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & Quantity*, 41(5), 673–690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- Palli, J., Mensing, S. A., Schoolman, E. M., Solano, F., & Piovesan, G. (2023). Historical ecology identifies long-term rewilding strategy for conserving Mediterranean mountain forests in south Italy. *Ecological Applications*, 33(2), e2758. <https://doi.org/10.1002/eap.2758>
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought* (Research Paper No. 45). U.S. Weather Bureau.
- Pesaresi, S., Biondi, E., & Casavecchia, S. (2017). Bioclimates of Italy. *Journal of Maps*, 13(2), 955–960. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1413017>
- Piovesan, G., Cannon, C. H., Liu, J., & Munné-Bosch, S. (2022). Ancient trees: Irreplaceable conservation resource for ecosystem restoration. *Trends in Ecology & Evolution*, 37(12), 1025–1028. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.09.003>
- QGIS.org. (2024). *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association.
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Solano, F., Mansi, C., Baliva, M., Canestrelli, D., Chiarucci, A., Manicone, R., Maugeri, M., Modica, G., Palli, J., Quilghini, G., & Piovesan, G. (2025). Mediterranean strictly protected forests are cooler. *Agricultural and Forest Meteorology*, 375, 110858. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110858>
- Tabacchi, G., Di Cosmo, L., Gasparini, P., & Morelli, S. (2011). *Stima del volume e della fitomassa delle principali specie forestali italiane: Equazioni di previsione, tavole del volume e tavole della fitomassa arborea epigea*. Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale.
- van der Schrier, G., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (2013). A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901–2009. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10), 4025–4048. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50355>
- Vandewiele, M., Geres, L., Lotz, A., Mandl, L., Richter, T., Seibold, S., Seidl, R., & Senf, C. (2023). Mapping spatial microclimate patterns in mountain forests from LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 341, 109662. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109662>

- Wang, Z., Ginzler, C., & Waser, L. T. (2020). Assessing structural changes at the forest edge using kernel density estimation. *Forest Ecology and Management*, 456, 117639. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117639>
- Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 17(12), 2335–2351. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2335:ASPD-SI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPD-SI>2.0.CO;2)
- Wood, S. N. (2017). *Generalized additive models: An introduction with R* (2^a ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315370279>
- Xu, X., Huang, A., Belle, E., De Frenne, P., & Jia, G. (2022). Protected areas provide thermal buffer against climate change. *Science Advances*, 8(44), eabo0119. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abo0119>
- Zellweger, F., De Frenne, P., Lenoir, J., Vangansbeke, P., Verheyen, K., Bernhardt-Römermann, M., Baeten, L., Hédél, R., Berki, I., Brunet, J., Van Calster, H., Chudomelová, M., Decocq, G., Dirnböck, T., Durak, T., Heinken, T., Jaroszewicz, B., Kopecký, M., Máliš, F., ... Coomes, D. (2020). Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science*, 368(6492), 772–775. <https://doi.org/10.1126/science.aba6880>
- Zhang, Q., Barnes, M., Benson, M., Burakowski, E., Oishi, A. C., Ouimette, A., Sanders-DeMott, R., Stoy, P. C., Wenzel, M., Xiong, L., Yi, K., & Novick, K. A. (2020). Reforestation and surface cooling in temperate zones: Mechanisms and implications. *Global Change Biology*, 26(6), 3384–3401. <https://doi.org/10.1111/gcb.15069>