



LIFE
MODERN
NEC

Qualità dell'aria, la risposta degli ecosistemi

www.lifemoderneec.eu

Cambiamenti climatici e salute delle foreste in Italia: tendenze e scenari dal monitoraggio estensivo (rete di Livello I – ICP Forests) nel periodo 2010 - 2022



AZIONE D.1

GIORNATA DI STUDIO SU CAMBIAMENTI CLIMATICI E

MONITORAGGIO DELLE FORESTE

Citazione consigliata:

Bussotti F., Papitto G., Di Martino D., Cocciufa C., Cindolo C., Cenni E., Bettini D., Iacopetti G., Pollastrini M., 2023. Cambiamenti climatici e stato di salute delle foreste in Italia: tendenze e scenari dal monitoraggio estensivo (rete di Livello I - ICP Forests) nel periodo 2010-2022. Comando Unità Forestali, Ambientali e Agroalimentari Carabinieri (CUFAA). Roma.

Cambiamenti climatici e salute delle foreste in Italia: tendenze e scenari dal monitoraggio estensivo (rete di Livello I – ICP Forests) nel periodo 2010 - 2022

Filippo Bussotti¹, Giancarlo Papitto², Domenico Di Martino², Cristiana Cocciufa², Claudia Cindolo², Enrico Cenni¹, Davide Bettini¹, Giovanni Iacopetti¹ e Martina Pollastrini^{1*}

¹ *Università di Firenze, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI); filippo.bussotti@unifi.it, enrico.cenni@unifi.it, davide.bettini@unifi.it, martina.pollastrini@unifi.it*

² *Comando Unità Forestali, Ambientali e Agroalimentari Carabinieri (CUFAA). SM-Ufficio Progetti, convenzioni, educazione ambientale. giancarlo.papitto@carabinieri.it, domenico1.dimartino@carabinieri.it, cristiana.cocciufa@carabinieri.it, claudia.cindolo@carabinieri.it*

* Corrispondenza: filippo.bussotti@unifi.it; martina.pollastrini@unifi.it

Riassunto

Il monitoraggio estensivo delle condizioni delle foreste in Italia (Livello I – rete Con.Eco.For. – ICP Forests) ha messo in evidenza un progressivo peggioramento delle chiome, con una significativa tendenza all'aumento della defogliazione e della mortalità degli alberi nel periodo 2010 - 2022. I valori più alti di defogliazione coincidono con gli anni in cui si sono verificate ondate di calore e siccità (2012, 2017 e 2021-22) o gelate tardive (2016). La perdita di foglie è accompagnata da sintomi fogliari, soprattutto viraggi di colore. Latifoglie e conifere mostrano andamenti diversi. Le conifere occupano una specifica e limitata nicchia ecologica che si estende alla fascia montana dell'arco alpino. Hanno in genere un livello di defogliazione minore, rispetto alle latifoglie; ma negli ultimi anni la loro defogliazione è considerevolmente aumentata, probabilmente a causa di una combinazione di disturbi ambientali (tempesta Vaia e attacchi di bostrico). Per le latifoglie, abbiamo osservato risposte, in termini di defogliazione e mortalità di alberi, specie-specifiche, soprattutto in relazione alla capacità di ripristinare in breve tempo la condizione della chioma precedente agli impatti (resilienza). La roverella è la specie più resiliente, mentre il cerro, pur con livelli di defogliazione minori, mostra una maggiore mortalità. Le specie mesofile, come il faggio e il carpino nero, sono particolarmente soggette a defogliazione estiva; il castagno unisce agli impatti climatici i noti problemi fitosanitari. Anche le specie sempreverdi mediterranee (leccio) mostrano sensibilità agli eventi siccitosi. Le latifoglie hanno subito, inoltre, gli effetti delle anomalie climatiche estive del 2017 più intensamente alle basse quote, mentre nel 2022 è stato il piano montano appenninico a manifestare i maggiori incrementi di defogliazione. Dalle osservazioni e studi effettuati emergono le possibili evoluzioni delle condizioni delle foreste (resilienza, sub-ottimalità, declino), ed è evidenziata l'importanza del monitoraggio ai fini della futura gestione delle foreste e pianificazione territoriale e paesaggistica.

Parole chiave: ondate di calore e siccità, defogliazione, mortalità degli alberi, sintomi di danno, resilienza

Abstract

The extensive monitoring of forest conditions in Italy (Level I – Con.Eco.For. network – ICP Forests) has highlighted a progressive deterioration, with a significant trend towards an increase in defoliation and tree mortality during the period 2010 - 2022. Forest trees are strongly defoliated in the years in which heat waves and droughts (2012, 2017 and 2021-22) or late frosts (2016) occurred, causing defoliation followed by partial crown recovery in the following years. Leaf loss is accompanied by foliar symptoms, especially color changes. Broadleaved and conifers trees show different responses. Conifers occupy a specific and limited ecological niche in the mountain belt of the Alps. They generally have a lower level of defoliation, respect to broadleaves, but in recent years their defoliation has considerably increased probably due to a combination of recent disturbances (storm Vaia and bark beetle attacks). The trend of defoliation and tree mortality in broadleaves shows species-specific responses, especially in relation to the ability to recover, in a short time, the condition prior to impacts (resilience). The downy oak is the most resilient species, while the Turkey oak, albeit with lower levels of defoliation, shows high tree mortality. Mesophilous species, such as beech and hop hornbeam, are particularly subject to summer defoliation; the chestnut combines climatic impacts with well-known parasitic attacks. Even the Mediterranean evergreen species (holm oak) show sensitivity to drought events. In 2017, summer drought and heat wave impacts on broadleaved trees were more intense at low altitudes, while in 2022 the forests in the Apennine mountain belt showed the greatest increases in defoliation. The conclusions outline possible evolutions of forest conditions (resilience, sub-optimality, decline) and highlight the importance of monitoring for future forest management and territorial and landscape planning.

Key words: heat and drought waves, defoliation, mortality, damage symptoms, resilience.

Premessa

La salute delle foreste in relazione ai disturbi biotici e abiotici è una questione di rilevante interesse per scienziati e gestori forestali. Gli attacchi parassitari e gli impatti dei fattori climatici (siccità, gelate, tempeste, ecc.) possono compromettere l'economia forestale e anche la sopravvivenza stessa dei popolamenti forestali così come li conosciamo. Negli anni '80 il fattore più pericoloso per la salute delle foreste fu individuato nelle deposizioni atmosferiche acidificanti come causa del cosiddetto "declino delle foreste" (*Waldsterben* nella letteratura forestale tedesca) nell'Europa centro-settentrionale e nel Nord America. In questo contesto è stato lanciato in Europa, nel 1985, un programma per la valutazione delle condizioni delle foreste (ICP Forests - *International Co-operative Program on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests*) nell'ambito della Convenzione sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero a grande distanza (CLRTAP, attualmente *Air Convention*) e l'*European Union Scheme on the Protection of Forests Against Atmospheric Pollution*. Il problema del *forest decline* ha avuto una grande popolarità tra gli scienziati e l'opinione pubblica, e negli anni '90 Kandler e Innes (1995) hanno contestato la teoria che un solo fattore (l'inquinamento atmosferico) fosse responsabile di tutte le manifestazioni di declino descritte per le varie specie arboree, nonché la generalizzazione del concetto di "danni di nuovo tipo" (*Neuartige Waldschäden*).

La defogliazione, come indice di salute e vitalità degli alberi in foresta, è il principale parametro utilizzato nel programma di monitoraggio pan-europeo. La defogliazione è un parametro aspecifico, che integra la variabilità genetica intrinseca degli alberi, gli effetti del sito (fertilità del suolo, caratteristiche climatiche, struttura e composizione del popolamento forestale) e fattori esterni, come gli stress abiotici e biotici. La defogliazione non è necessariamente equivalente a un danno subito dall'albero, e può essere considerata indicativa dell'equilibrio plastico di un albero nel proprio ambiente.

La defogliazione è stata criticata come strumento diagnostico perché è valutata visivamente e può essere influenzata dalla soggettività dei rilevatori in campo. Nonostante questi problemi, la valutazione della defogliazione si è consolidata nel tempo e si è dimostrata capace di produrre robuste serie di dati ecologicamente coerenti. Inoltre, la valutazione dei sintomi di danno nelle diverse parti dell'albero (foglie, rami, tronco e radici) fornisce un quadro più completo dell'intera condizione di salute di un albero.

La progressiva riduzione d'importanza delle deposizioni acide come fattore globale di impatto sulle foreste, nonché la difficoltà di trovare chiare relazioni fra condizioni delle chiome e fattori ambientali, ha determinato una progressiva attenuazione dell'interesse sul tema del declino delle foreste, e alcuni paesi europei hanno ridotto le attività relative al monitoraggio di larga scala. Tuttavia, in anni più recenti, il verificarsi di una serie di anomalie climatiche, tra cui la siccità dell'estate 2017 in Italia, *megadrought* in Europa centrale nel biennio 2018-19, la tempesta Vaia nell'arco alpino nel 2018, e l'intensificarsi di attacchi parassitari, soprattutto opportunisti, ha fatto sì che l'interesse per le condizioni delle foreste abbia un rinnovato interesse.

Recenti pubblicazioni hanno evidenziato una tendenza crescente della defogliazione e mortalità nelle foreste italiane ed europee (Bussotti et al., 2021, 2022; Potocic et al., 2022; Jaime et al.; 2022; George et al., 2022). Il presente rapporto fa il punto sulla situazione e le tendenze in Italia

nel periodo 2010 – 2022, cercando di evidenziare risposte specie-specifiche degli alberi e le possibili evoluzioni ecologico-vegetazionali.

Metodi - La rete di monitoraggio in Italia

In Italia l'estensione e l'intensità degli effetti di fattori ambientali sullo stato di salute delle foreste sono rilevati in modo sistematico con le reti di monitoraggio nazionale (Livello I e Livello II), nell'ambito del programma pan-Europeo ICP Forests. Le attività di monitoraggio dello stato di salute delle foreste sono iniziate dal 1997 sulle aree di Livello I (indagine estensiva) e dal 1996 sulle aree di Livello II (indagine intensiva).

La rete di Livello I comprende in Italia un campione di circa 5000 alberi con diametro superiore a 9,5 cm. Le 260 aree permanenti di osservazione di Livello I sono disposte ai vertici di un reticolo di 15x18 Km, e sono state selezionate sulla base dei punti geografici del primo Inventario Forestale Nazionale (1985) ricadenti in formazioni forestali (Gasparini et al., 2016). Differenze anno per anno nel numero di alberi sono dovute alla demografia dei popolamenti come, per esempio, la morte di alberi e l'ingresso di nuove piante che hanno raggiunto le condizioni di rilevabilità.

Sebbene che, nell'attuale forma, il programma di monitoraggio estensivo delle condizioni delle foreste abbia avuto inizio in Italia nel 1996, a causa di successivi adeguamenti della rete e aggiornamenti del manuale comune pan-europeo, disponiamo di una serie di dati affidabile e coerente a partire dal 2010.

Il parametro principale rilevato in bosco per definire la salute delle foreste è la defogliazione. Per gli standard di defogliazione delle principali specie forestali italiane si fa riferimento alle fotoguide di Müller e Stierlin (1990) per le specie montane e Ferretti (1994) per le specie mediterranee. La metodologia è definita da manuali comuni europei (Eichhorn et al. 2020), i cui principi sono recepiti in manuali nazionali. La defogliazione è stimata visivamente utilizzando una scala proporzionale, con classi di entità del 5% (da 0% = pianta completamente sana, fino a 100% = pianta morta; alle piante completamente defogliate ma non morte viene attribuito il valore convenzionale 99%). Oltre alla defogliazione, sono rilevati anche i danni su foglie, rami e fusto. Si tratta di danni causati da agenti biotici, come insetti e funghi, e abiotici tra cui la grandine, il gelo, i fulmini, il fuoco, la siccità estiva. I sintomi sono identificati e classificati per manifestazione visibile e agente di danno e vengono quantificati per mezzo di una scala semi proporzionale (0 = 0%, assenza di sintomi; 1 = 1-10%; 2 = 11-20%; 3 = 21-40%; 4 = 41-60%; 5 = 61-80%; 6 = 81-99%; 7 = 100%).

I rilievi sono svolti annualmente nei mesi estivi (luglio e agosto). Sono svolti corsi di intercalibrazione per il personale addetto ai rilievi in bosco e controlli in campo della correttezza della procedura di valutazione (Ferretti et al. 1999; Bussotti et al., 2009).

Risultati - Andamento della defogliazione nel periodo 2010-2022

Composizione del popolamento investigato

Le circa 5000 piante del campione comprendono 60 specie arboree, di cui 46 latifoglie e 14 conifere. Le latifoglie sono circa il 75 % del totale, e sono presenti in tutto l'Appennino, nelle aree collinari e mediterranee dell'Italia centro-meridionale e nella fascia prealpina. Le conifere sono invece concentrate nell'arco alpino. La maggior parte della popolazione investigata (circa l'80%) è rappresentata da 10 specie (dati relativi al 2020): 6 latifoglie (*Fagus sylvatica* L. - 945 alberi; *Quercus pubescens* Willd. - 473 alberi; *Quercus cerris* L. - 380 alberi; *Ostrya carpinifolia* Scop. - 351 alberi; *Castanea sativa* Mill - 272 alberi; *Quercus ilex* L. - 130 alberi) e 4 conifere (*Picea abies* (L.) Karst. - 384 alberi; *Larix decidua* L. - 225 alberi; *Pinus sylvestris* L. - 151 alberi; *Pinus nigra* Arn. - 145 alberi).

Andamenti complessivi di defogliazione e mortalità

Fra il 2010 e il 2022 la defogliazione media delle varie specie analizzate è andata aumentando in maniera significativa, con picchi nel 2012, 2017 e nel biennio 2021-2022 (Fig. 1A). Questi picchi corrispondono ad anni siccitosi (2012, 2017 e 2022) e ad attacchi di insetti e patogeni particolarmente estesi e intensi (attacchi di *Ips typographus* – bostrico - sulle conifere alpine nel 2021 e 2022). È interessante osservare che a seguito dei picchi di defogliazione corrispondenti alle siccità del 2012 e del 2017 non corrisponde, negli anni successivi, una rapida ripresa della condizione delle chiome, ma i livelli di defogliazione media restano alti. Questo "effetto memoria" è durato un anno dopo la siccità del 2012 (il livello di defogliazione precedente la siccità è stato ripristinato nel 2014), mentre per quanto riguarda la siccità del 2017, tali livelli nel 2022 non sono ancora stati recuperati.

La defogliazione media è stata, nel periodo d'osservazione, generalmente maggiore nelle latifoglie rispetto alle conifere (Fig. 1B). Anche la tendenza all'incremento nel tempo è stata maggiore nelle latifoglie che nelle conifere, così come i picchi di defogliazione negli anni siccitosi (2012 e 2017). Nel biennio 2021 e 2022, tuttavia, le conifere hanno mostrato un brusco aumento di defogliazione, rispetto agli anni precedenti. Conifere e latifoglie hanno mostrato risposte diverse ed indipendenti fra loro.

La mortalità (percentuale di alberi morti fra due successive indagini) segue anch'essa una tendenza all'incremento (Fig. 2) nel periodo considerato. La mortalità è stata particolarmente elevata dopo il 2017. Il picco iniziale (2010) è dovuto al fatto che, fino a quell'anno, venivano inseriti nel computo anche gli alberi rimossi per operazioni selvicolturali.

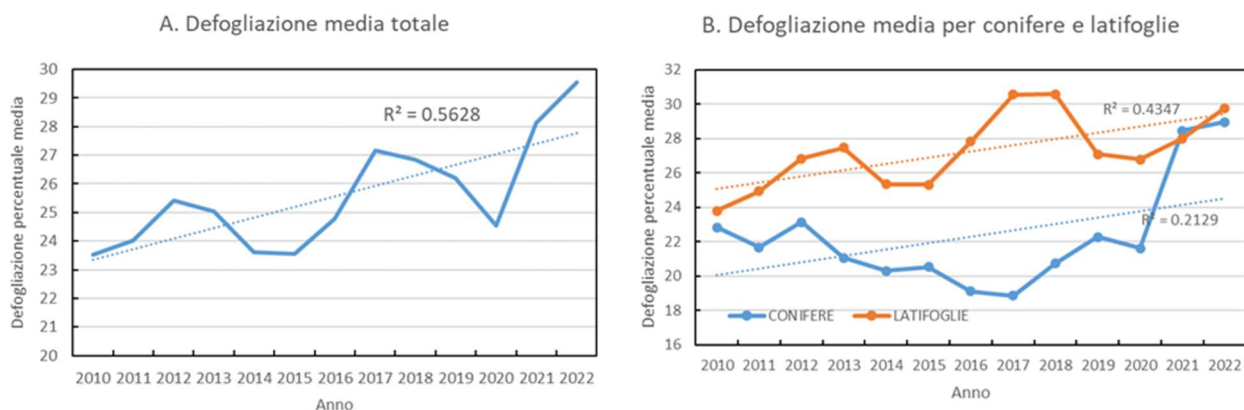


Fig. 1. (A) Andamento della defogliazione media totale nel periodo 2010-2022. (B) Andamento della defogliazione media nel periodo 2010-2022 distinta per conifere e latifoglie.

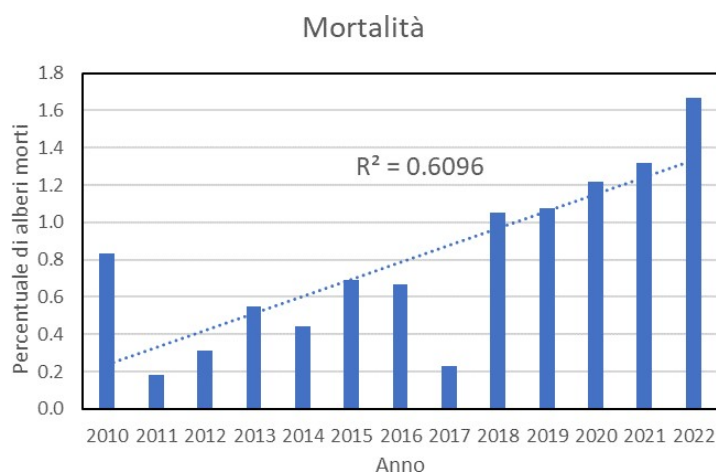


Fig. 2. Andamento della mortalità complessiva nel periodo 2010-2022

Andamenti per le specie principali

Latifoglie (Fig. 3)

Il faggio (*Fagus sylvatica*) mostra, nel periodo esaminato, un andamento significativo di defogliazione con picchi nel 2016-2017 (il picco del 2016 è stato causato da una gelata tardiva che ha colpito gran parte delle faggete nell'Appennino centro-meridionale) e nel 2021-2022. La mortalità è andata aumentando nel tempo, ed ha mostrato i valori più alti dopo il 2017.

Il castagno (*Castanea sativa*) è la specie con i livelli più alti di defogliazione a causa delle fitopatie che la colpiscono da molti anni. Nel corso del periodo di osservazione è stato rilevato un significativo incremento di defogliazione seguito da una decisa diminuzione. Questo andamento è attribuito all'impatto della vespa asiatica (*Dryocosmus kuriphilus*) e alla successiva lotta biologica

che ne ha mitigato l'impatto. La mortalità ha mostrato un continuo aumento nel tempo. Il castagno è risultato la latifoglia con i più alti livelli di mortalità.

Le due principali specie di querce caducifoglie, roverella e cerro (*Quercus pubescens* e *Quercus cerris*), hanno andamenti di defogliazione e mortalità ben distinti fra loro. La roverella ha valori di defogliazione mediamente più elevati rispetto al cerro, e fluttuazioni evidenti con forti incrementi di defogliazione negli anni siccitosi e un recupero della chioma altrettanto marcato. Complessivamente, la roverella non mostra tendenze significative di defogliazione. Il cerro, invece, evidenzia un aumento significativo di defogliazione e di mortalità nel tempo. La mortalità è notevolmente incrementata dopo il 2017 e i valori più elevati sono stati registrati alcuni anni dopo gli eventi siccitosi.

Il leccio (*Quercus ilex*), quercia sempreverde, mostra un andamento significativo di incremento di defogliazione, con picchi negli anni siccitosi. Casi di mortalità sono stati registrati solo negli ultimi anni (2019 e 2022).

Il carpino nero (*Ostrya carpinifolia*) mostra un andamento significativo di incremento di defogliazione, con picchi molto evidenti negli anni siccitosi. La mortalità ha avuto un incremento dopo il 2017.

Conifere (Fig. 4)

Nell'abete rosso (*Picea abies*) la defogliazione non mostra un andamento univoco nell'arco di tempo considerato, bensì sono stati rilevati fra il 2010 e il 2022, due tendenze distinte: una riduzione della defogliazione fino al 2017, seguita da un successivo incremento dal 2017 in poi. Questo incremento è stato particolarmente forte negli ultimi due anni (2021 e 2022), in corrispondenza di estesi attacchi di bostrico successivi alla tempesta Vaia del 2018. La mortalità degli alberi di abete rosso ha un incremento significativo, soprattutto a partire dal 2017.

Il larice (*Larix decidua*), diversamente dall'abete rosso, mostra un significativo aumento della defogliazione e della mortalità, soprattutto negli anni successivi al 2017.

I due pini montani, il pino silvestre e il pino nero (*Pinus sylvestris* e *Pinus nigra*), mostrano un aumento della defogliazione nel corso del tempo. La mortalità nel pino silvestre è molto alta e progressiva nel tempo, raggiungendo il picco fra il 2020 e il 2021. Nel pino nero la mortalità è pressoché costante durante l'intero periodo considerato. Nel pino silvestre il precario stato di salute può essere considerato nell'ambito del più vasto fenomeno del deperimento di questa specie al limite meridionale del suo areale e sul versante sud delle Alpi (Vacchiano et al., 2012). Nel caso del pino nero possono essere considerate un insieme di cause che comprendono l'invecchiamento dei soprassuoli di origine artificiale (rimboschimenti), la loro scarsa compatibilità ecologica in siti poco idonei e gli attacchi del fungo endofita *Sphaeropsis sapinea* (= *Diplodia pinea*) favoriti dall'aumentata siccità.



Fig. 3. Defogliazione media annuale (linea spezzata) e mortalità (istogramma) per le singole specie di latifoglie. Le linee tratteggiate a R^2 (coefficiente di determinazione) rappresentano gli andamenti delle tendenze.

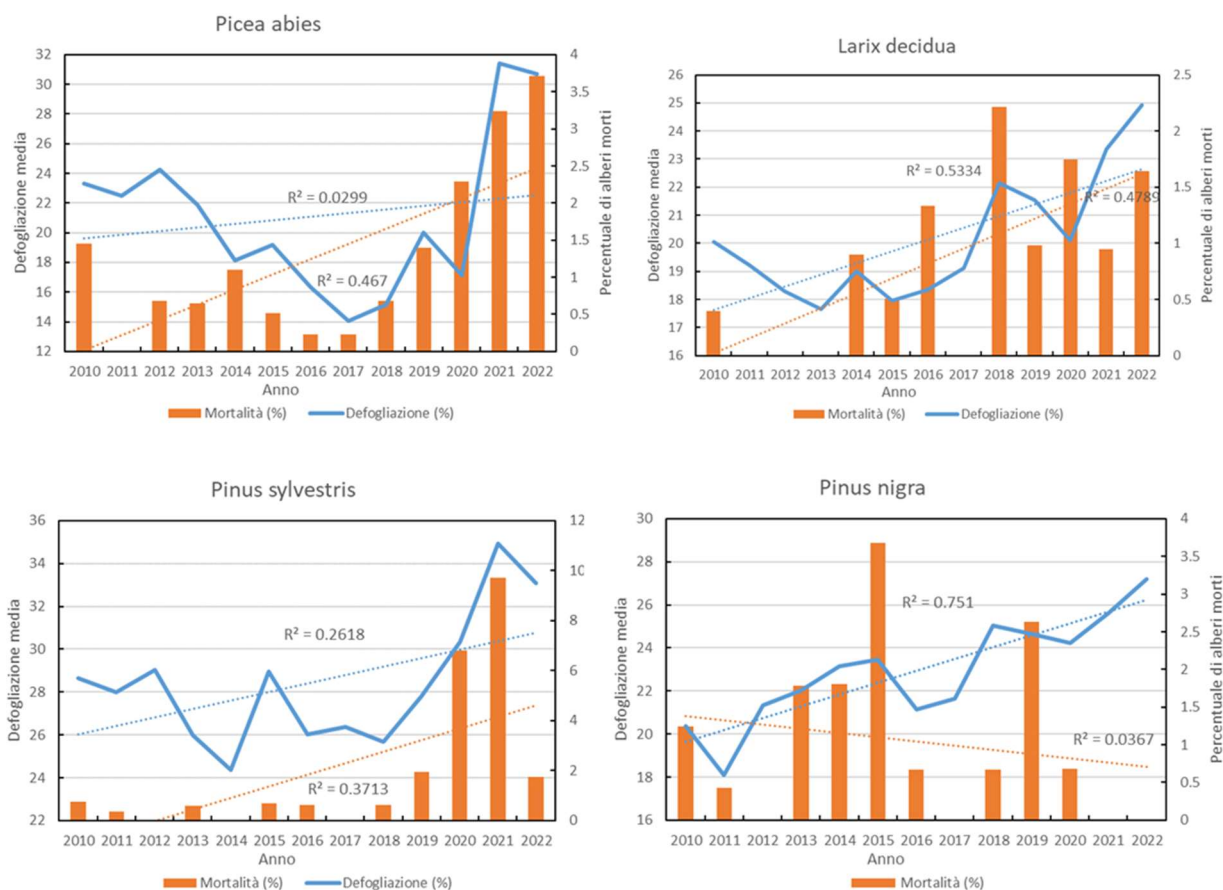


Fig. 4. Defogliazione media annuale (linea spezzata) e mortalità (istogramma) per le singole specie di conifere. Le linee tratteggiate a R^2 (coefficiente di determinazione) rappresentano gli andamenti delle tendenze.

Andamenti della defogliazione per fasce altitudinali

I maggiori livelli di defogliazione sono stati riscontrati nella fascia sopra-mediterranea (300 – 600 m slm), mentre quelli più bassi nella fascia montana (>1200 m slm) (Fig. 5). L’impatto della siccità del 2017 ha interessato soprattutto le fasce altimetriche più basse, fino ai 900 m slm.

Le differenze di defogliazione fra le fasce altitudinali sono state molto marcate, almeno fino al 2020. La fascia montana ha subito un forte incremento di defogliazione nel 2021; la fascia submontana (900 – 1200 m slm) nel 2022. L’aumento di defogliazione nella fascia montana ha interessato soprattutto le conifere; quello nella fascia submontana il faggio e altre latifoglie accompagnatrici. Complessivamente, tra il 2021 e 2022 le differenze fra le fasce si sono molto assottigliate.

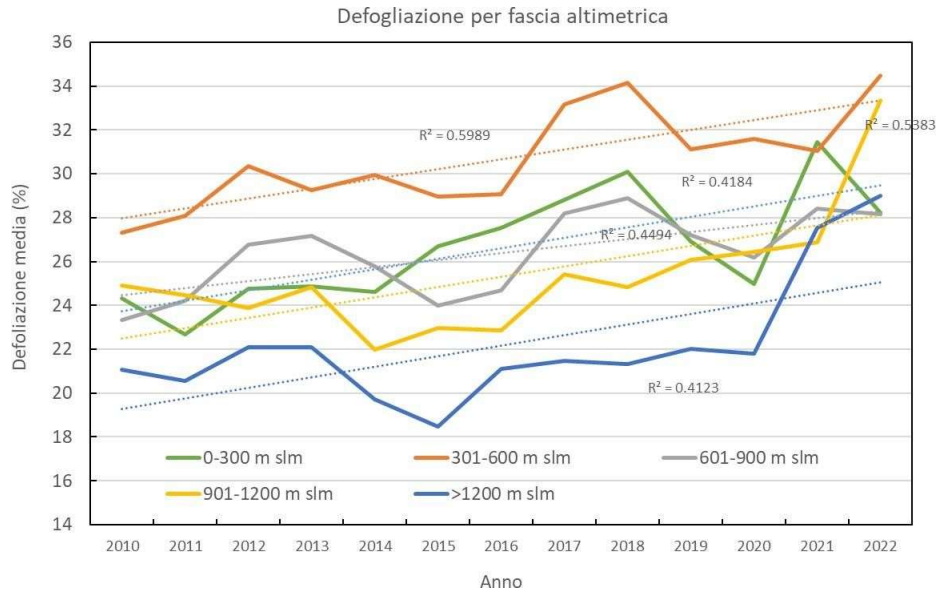


Fig. 5. Andamenti della defogliazione media annuale suddivisi per fasce altitudinali.

Relazioni fra defogliazione e sintomi di danno

Sono stati esaminati i sintomi di danno sui rami e sulle foglie (percentuale media di chioma interessata per area di monitoraggio) in relazione alla defogliazione. I sintomi sui rami (Fig. 6) hanno mostrato un incremento nell'ultimo anno (2022); i sintomi sulle foglie (Fig. 7A) non hanno un andamento significativo, ma mostrano valori particolarmente elevati negli anni di maggiore siccità (2012, 2017 e 2022). I sintomi sulle foglie sono stati suddivisi in tre categorie principali: erosioni e abscissione, viraggi di colore e malformazioni (Fig. 7B). In tutti i casi si osserva un aumento dei valori di frequenza di danno nel 2022 per le erosioni ed abscissione; per i viraggi di colore nel 2017 e nel 2012 e, in maniera secondaria, nel 2015.

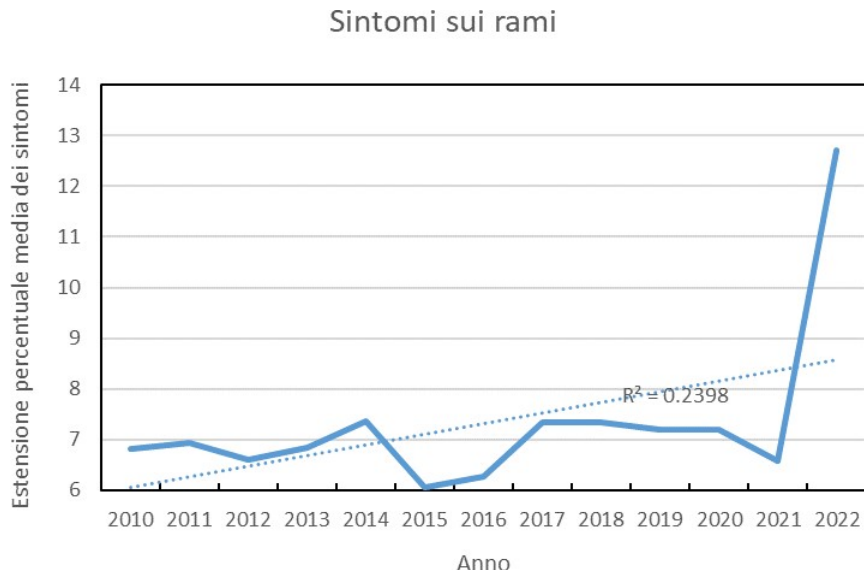


Fig. 6. Andamento della diffusione media dei sintomi sui rami.

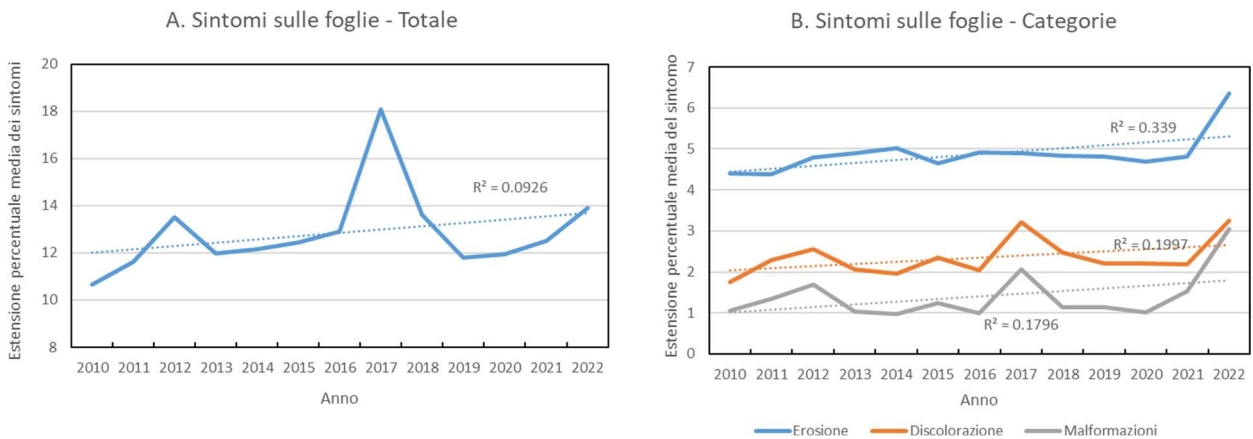


Fig. 7. (A) Andamento della diffusione media dei sintomi totali sulle foglie. (B) Andamento della diffusione media dei sintomi sulle foglie, suddivisi per categoria (erosione e abscissione, cambiamenti di colore, malformazioni)

Le relazioni fra defogliazione e sintomi di danno sono mostrate nella Fig. 8A, che riporta l'andamento dell'indice di determinazione (R^2) della correlazione tra defogliazione e sintomi, nel corso degli anni. In Fig. 8B sono mostrate le relazioni fra R^2 e la defogliazione. R^2 è generalmente più alto per i sintomi sui rami rispetto a quelli sulle foglie e mostra il valore più alto nel 2017, sia per rami che per foglie, e tende a decrescere negli anni successivi (Fig. 8A). Alti valori di defogliazione tendono ad essere disaccoppiati rispetto all'aumento dei sintomi (Fig. 8B).

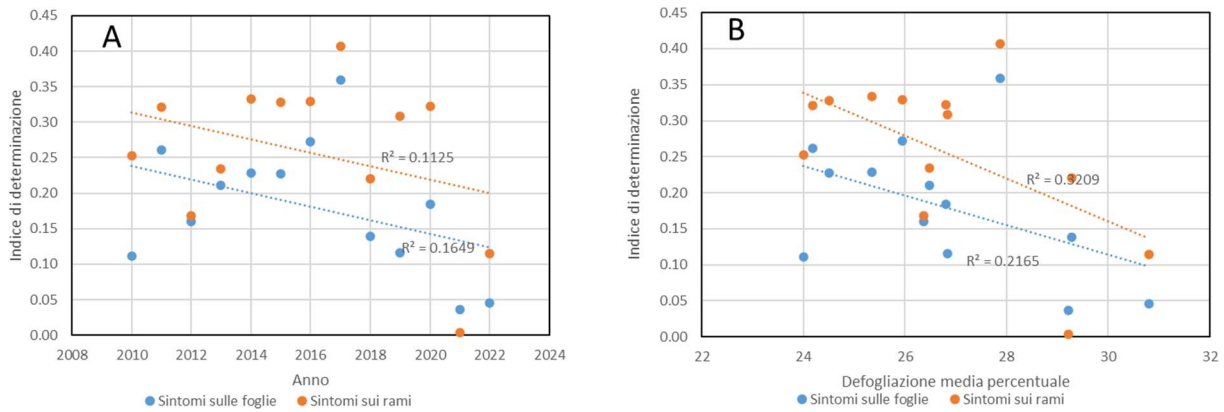


Fig. 8. *Variazione del valore dell'indice di determinazione (R^2) delle correlazioni fra defogliazione e sintomi di danno sui rami e sulle foglie. (A) Variazione di (R^2) nel periodo 2010-2022. (B) Variazione di (R^2) in relazione alla defogliazione media percentuale.*

Variazioni della defogliazione per anno e per area di monitoraggio

La distribuzione dei valori di defogliazione anno per anno per ciascuna area di osservazione è mostrata nelle Figure 9A e 9B. Alcune tendenze possono essere identificate chiaramente: nel 2016 la defogliazione aumenta, quindi abbiamo un peggioramento dello stato di salute delle foreste, soprattutto nell'Appennino centrale come conseguenza delle gelate tardive della primavera di quell'anno. Nel 2017 la defogliazione aumenta nelle regioni mediterranee e appenniniche centro-settentrionali in seguito alla forte siccità estiva; nel 2021-22 i maggiori incrementi di defogliazione sono stati registrati nell'area alpina e nelle regioni centro-nord occidentali. In quest'ultimo anno c'è stato un incremento di defogliazione anche in molte aree meridionali italiane.

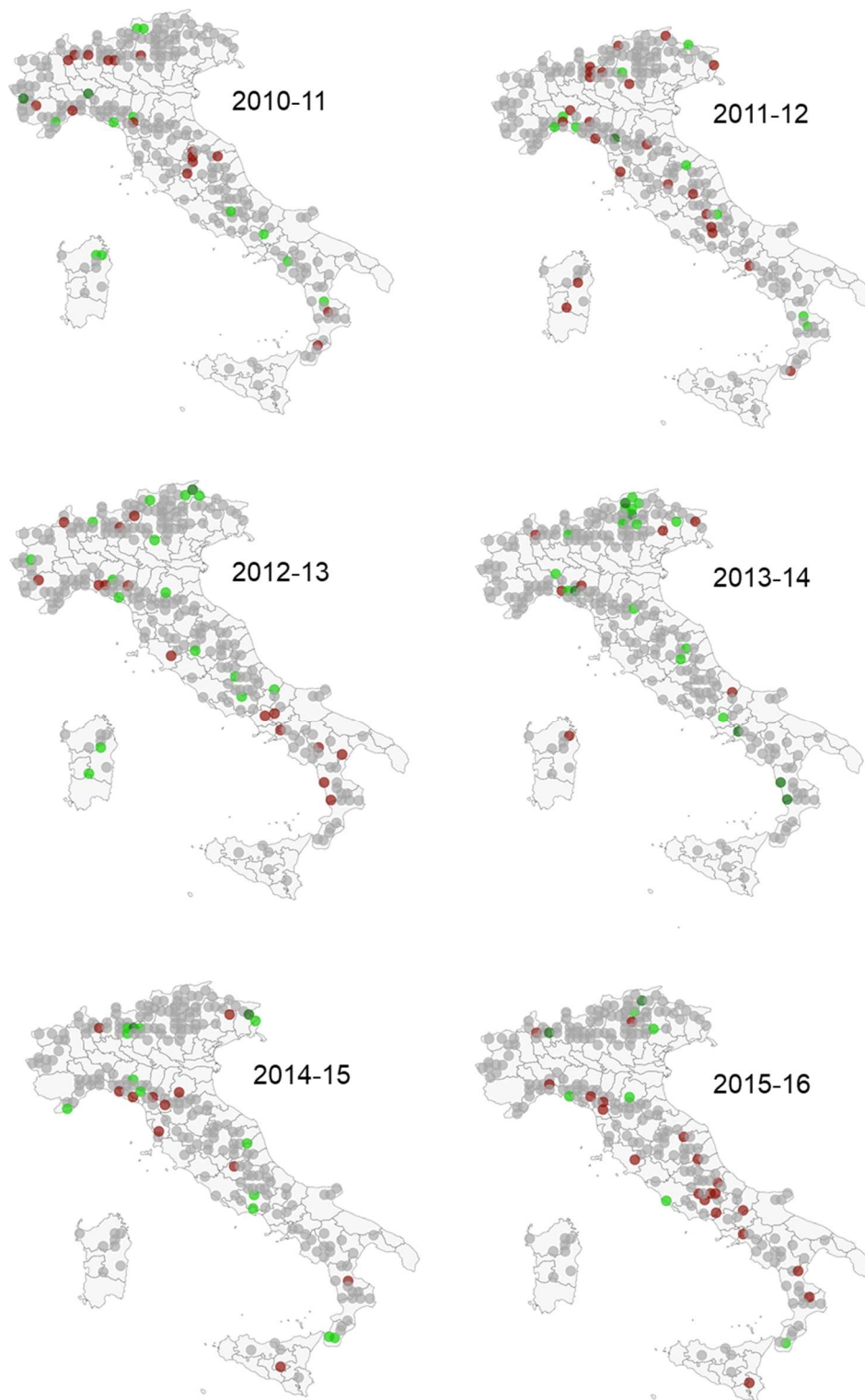


Fig. 9A. *Variazione della defogliazione media per area di monitoraggio fra due indagini successive. In rosso sono indicati gli incrementi medi > +10%; in verde le riduzioni medie < -10%; in grigio i valori compresi fra +10% e -10%.*

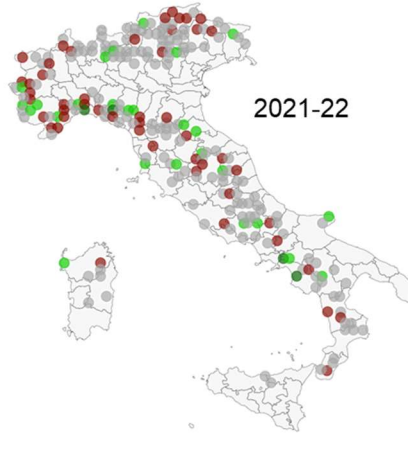
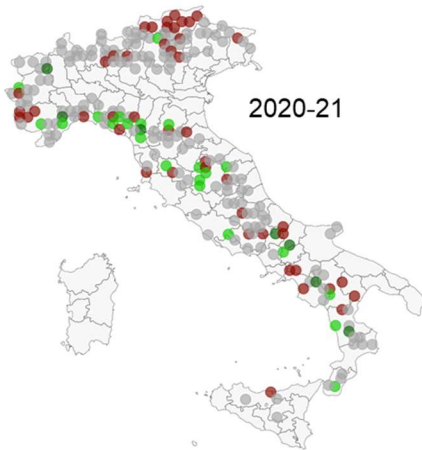
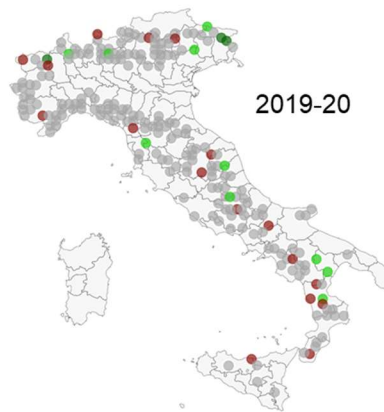
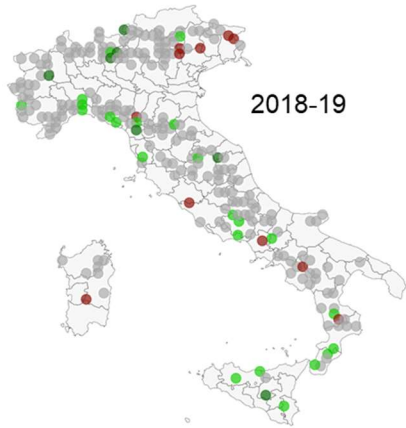
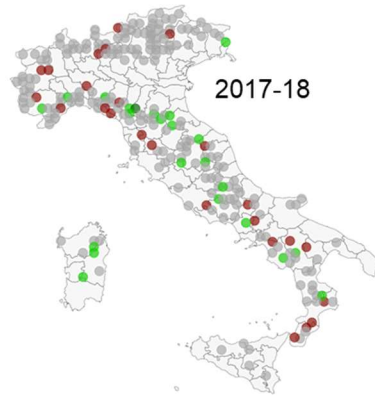
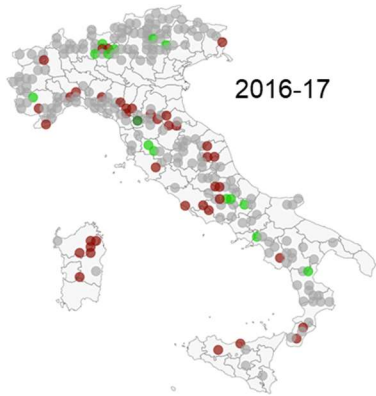


Fig. 9B. *Variazione della defogliazione media per area di monitoraggio fra due indagini successive. In rosso sono indicati gli incrementi medi > +10%; in verde le riduzioni medie < -10%; in grigio i valori compresi fra +10% e -10%.*

Cause di danno (Fig. 10)

Le cause di danno ai rami e alle foglie sono state riconosciute su meno della metà dei casi rilevati in bosco. Fra le cause note il maggior contributo proviene dai danni da insetti, soprattutto dai defogliatori. I danni da insetti, tuttavia, hanno mostrato una tendenza alla riduzione nel periodo considerato, con riduzioni marcate soprattutto negli anni di maggiore siccità (2017 e 2022). Un simile andamento è stato osservato per i patogeni fungini. I danni per agenti abiotici sono invece in crescita. Fra questi si evidenziano i danni per siccità, con picchi nel 2012, 2017, 2022. La diffusione dei sintomi di insetti defogliatori è negativamente correlata con la defogliazione, mentre una correlazione positiva risulta tra defogliazione e sintomi di siccità (Fig. 11). Considerando la relazione tra sintomi di insetti defogliatori e quelli di siccità risulta una correlazione negativa (Fig. 12).

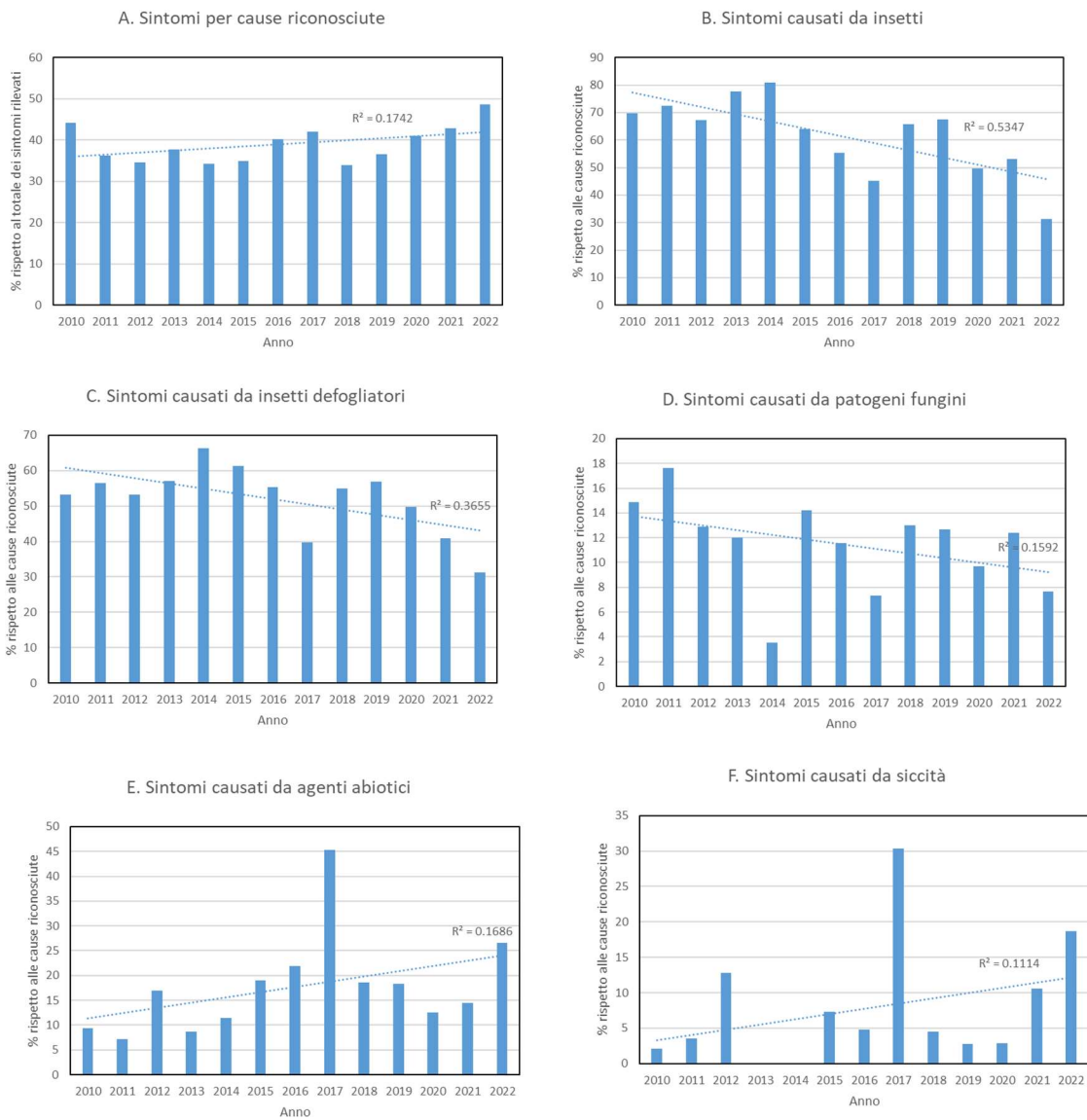


Fig. 10. *Andamento nel tempo delle principali cause di danno ai rami e foglie*

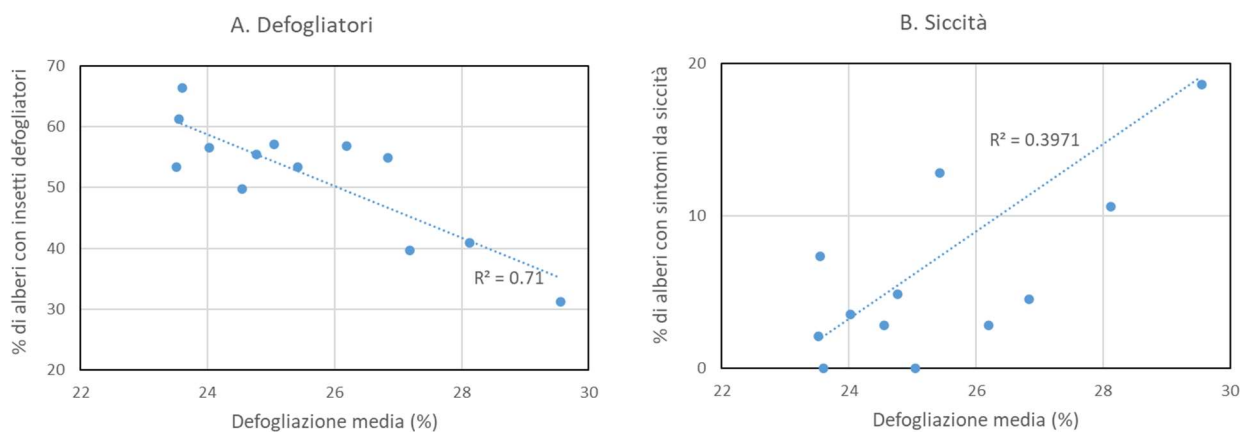


Fig. 11. Correlazione dei sintomi di insetti defogliatori (A) e siccità (B) con la defogliazione media

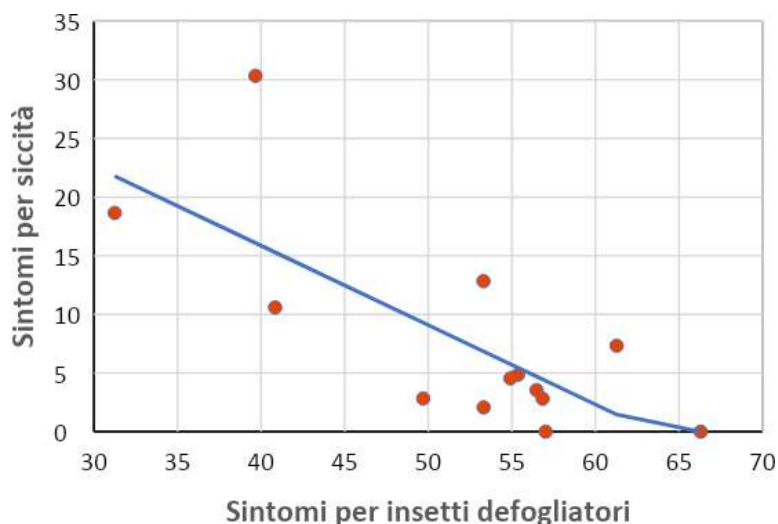


Fig. 12. Relazione tra sintomi di insetti defogliatori i sintomi da siccità

Discussione

Il risultato più evidente ottenuto dal monitoraggio estensivo dello stato di salute delle foreste in Italia è l'incremento di defogliazione, con una tendenza significativa nel periodo dal 2010 al 2022. Il peggioramento delle condizioni delle foreste è attribuibile al ripetersi di eventi climatici estremi seguiti da estesi attacchi parassitari. Si ricordano in particolare la siccità negli anni 2012, 2017 e 2021-22; le gelate tardive nella primavera del 2016; la tempesta Vaia nel 2018 che ha colpito foreste di conifere alpine e i successivi attacchi di bostrico. L'anno chiave è stato il 2017, dopo il quale anche la mortalità degli alberi è andata crescendo con una tendenza significativa.

Nel 2017 c'è stato un significativo aumento di defogliazione che ha interessato soprattutto le latifoglie alle quote più basse. E' stato rilevato anche un consistente aumento della diffusione di sintomi fogliari, soprattutto i viraggi di colore e disseccamenti, e sono fortemente correlati alla defogliazione stessa.

Negli anni successivi al 2017 il recupero delle chiome danneggiate (defogliate e con sintomi di danno) è stato parziale. Negli anni successivi agli impatti, le chiome si sono riorganizzate su livelli di defogliazione alti, ma senza processi di abscissione attivi e sintomi fogliari estesi. Nelle specie arboree ad accrescimento predeterminato (come le querce decidue e il faggio) lo sviluppo delle gemme e la crescita dei getti dell'anno sono determinati dalle condizioni climatiche dell'anno precedente, quindi, l'effetto di un evento siccitoso si protrae nel tempo.

Questo comportamento suggerisce, inoltre, un disaccoppiamento fra defogliazione e sintomi fogliari, soprattutto gli ingiallimenti e altri viraggi di colore (*photobleaching*). Nel corso del periodo investigato, infatti, i valori di R^2 nelle correlazioni fra sintomi di danno e defogliazione sono progressivamente diminuiti, seppur sempre significativi. Osservazioni empiriche suggeriscono che per i viraggi di colore le condizioni edafiche e gli squilibri nutrizionali delle piante svolgano un ruolo importante (Braun et al., 2021).

La defogliazione è positivamente correlata con i sintomi da siccità, confermando il ruolo dei fattori climatici nella salute delle foreste. Tuttavia, meno ovvia è la forte correlazione negativa fra defogliazione e sintomi da insetti defogliatori. Per avere una corretta interpretazione di questa apparente contraddizione, i due andamenti devono essere letti insieme: negli anni siccitosi (con alta defogliazione) le popolazioni degli insetti defogliatori hanno minore possibilità di prosperare sia per la mancanza del loro substrato di alimentazione (le foglie), sia perché le foglie residue hanno un minore contenuto idrico e una minore palatabilità. Questo *trade off* fra defogliazione e insetti defogliatori è già stata evidenziata da Carnicer et al. (2014) nella Penisola Iberica.

Nelle estati con ondate di calore e siccità estreme lo stato di salute delle chiome può essere molto dinamico e cambiare nel corso del periodo in cui vengono svolte le indagini in bosco. La perdita delle foglie per siccità avviene, in faggio e altre latifoglie decidue mesofile, fra la fine di luglio e la fine d'agosto, cioè nel periodo in cui sono svolti i rilievi. Aree visitate all'inizio dei rilievi possono pertanto mostrare una defogliazione minore rispetto alle aree visitate alla fine del periodo di rilievi. In alcuni casi può succedere il contrario, con una nuova emissione di foglie dopo i temporali estivi. La discolorazione delle foglie può preludere ad una caduta anticipata delle stesse, che tuttavia non sempre viene colta al momento dell'indagine.

Conifere e latifoglie hanno un comportamento diverso tra loro. Le conifere sono concentrate nella fascia montana delle Alpi, soprattutto nel settore centro-orientale (Lombardia, Trentino-Alto Adige, Veneto, Friuli), con condizioni climatiche e ambientali ben distinte da quelle delle fasce vegetazioni in cui ricadono gli altri tipi di bosco (la regione prealpina, l'Appennino e la regione mediterranea e sopra-mediterranea). Le conifere sono rappresentate da abete rosso e larice per numerosità delle aree a prevalenza di queste specie, mentre l'abete bianco ed i pini costituiscono una frazione minoritaria del campione. Le conifere hanno mostrato in genere un livello di defogliazione inferiore rispetto alle latifoglie. Solo negli ultimi anni (2021 e 2022) la defogliazione nelle conifere ha raggiunto valori simili, e in alcuni casi anche maggiori, rispetto a quelli delle latifoglie, a causa di un improvviso e consistente peggioramento delle loro condizioni.

Il peggioramento delle condizioni delle conifere nell'arco alpino può essere messo in relazione alla tempesta Vaia del 2018 e agli attacchi di bostrico che ne sono seguiti; tuttavia, il fatto che il peggioramento interessi anche il larice alle alte quote può far ritenere che queste cause non siano sufficienti nello spiegare la situazione. Probabilmente un peggioramento delle condizioni climatiche complessive alle alte quote, con anomalie di temperatura e precipitazioni, può avere svolto un ruolo rilevante.

Nelle latifoglie, i comportamenti e le dinamiche osservate risultano coerenti con quanto descritto da Bussotti et al. (2023) (Fig. 13). La maggiore defogliazione è stata osservata nella fascia sopra-mediterranea (300 – 600 m slm). Gli effetti della siccità del 2017 si sono manifestati soprattutto alle quote basse, mentre nel 2021-22 sono stati maggiormente colpiti i boschi alle quote più alte (900-1200 m slm).

Nella fascia sopra-mediterranea la roverella, pur considerata specie xerofila ben adattata alle estati mediterranee, è particolarmente sensibile ai periodi siccitosi e risponde a queste anomalie climatiche con una rapida abscissione fogliare. Questa specie ricostruisce la chioma nell'anno successivo all'evento siccitoso, con un recupero pressoché completo. Anche la mortalità degli alberi non mostra andamenti significativi. Complessivamente, la roverella ha mostrato notevole resilienza: subisce l'impatto ma ha una grande capacità di recupero.

Differente è il comportamento delle specie più mesofile del piano sopra-mediterraneo, in particolare il cerro ed il carpino nero. Il carpino nero è particolarmente sensibile alla perdita estiva di foglie, con picchi evidenti di defogliazione nel 2012, 2017 e 2022, probabilmente a causa dell'apparato radicale superficiale. Il carpino nero ricostituisce la chioma l'anno successivo l'impatto, ma mostra una tendenza significativa all'aumento di defogliazione nel corso del tempo. Il cerro ha mostrato, complessivamente, valori di defogliazione più bassi rispetto a quello di altre specie mesofile e mantiene la chioma densa anche nel corso di eventi estremi. Tuttavia, questa specie mostra un incremento significativo di defogliazione nel tempo e alti livelli di mortalità, crescenti nel corso del periodo di osservazione. Defogliazione e mortalità possono essere ritardate rispetto agli eventi siccitosi.

Un caso particolare è rappresentato dal castagno, che all'impatto del cambiamento climatico unisce quello dei numerosi parassiti che lo affliggono. Questa specie in futuro difficilmente potrà essere coltivata nelle condizioni più xeriche, mentre potrà essere conservata nei siti migliori, dove è possibile una regolare gestione selvicolturale.

Il faggio, ampiamente diffuso nella fascia montana dell'Appennino e in quella sub-montana delle Alpi, è anch'esso sensibile alla perdita estiva di foglie, con picchi evidenti di defogliazione nel 2012, 2017 e 2022. In quest'ultimo anno ha subito un forte impatto nella fascia 900 – 1200 m slm. Il faggio, mostra una buona capacità di recupero, ma in situazioni edafico-ecologiche particolarmente difficili, e in piante che hanno subito ripetuti stress climatici, sono stati riscontrati casi di morte della pianta intera o di singoli rami dovuti ad attacchi di *Biscogniauxia nummularia*. La diffusione di endofiti che passano da una fase latente ad una fase parassitaria in seguito a periodi di siccità costituisce una dei maggiori rischi per la salute delle foreste in un'epoca di cambiamenti climatici. Inoltre, il faggio ha subito l'effetto delle gelate tardive della primavera del 2016, nell'Appennino centrale. Questa specie mostra un incremento significativo di defogliazione e mortalità nel tempo.

Per quanto riguarda le specie sempreverdi della fascia mediterranea il leccio, sia pure con livelli di defogliazione media relativamente bassi, ha mostrato una spiccata sensibilità agli eventi siccitosi (Pollastrini et al., 2019). Ancorché non registrati nella rete di monitoraggio, casi estesi di mortalità di questa specie sono stati osservati nella fascia costiera della Toscana (Fig. 14), innescando dinamiche vegetazionali regressive verso la macchia e la gariga.

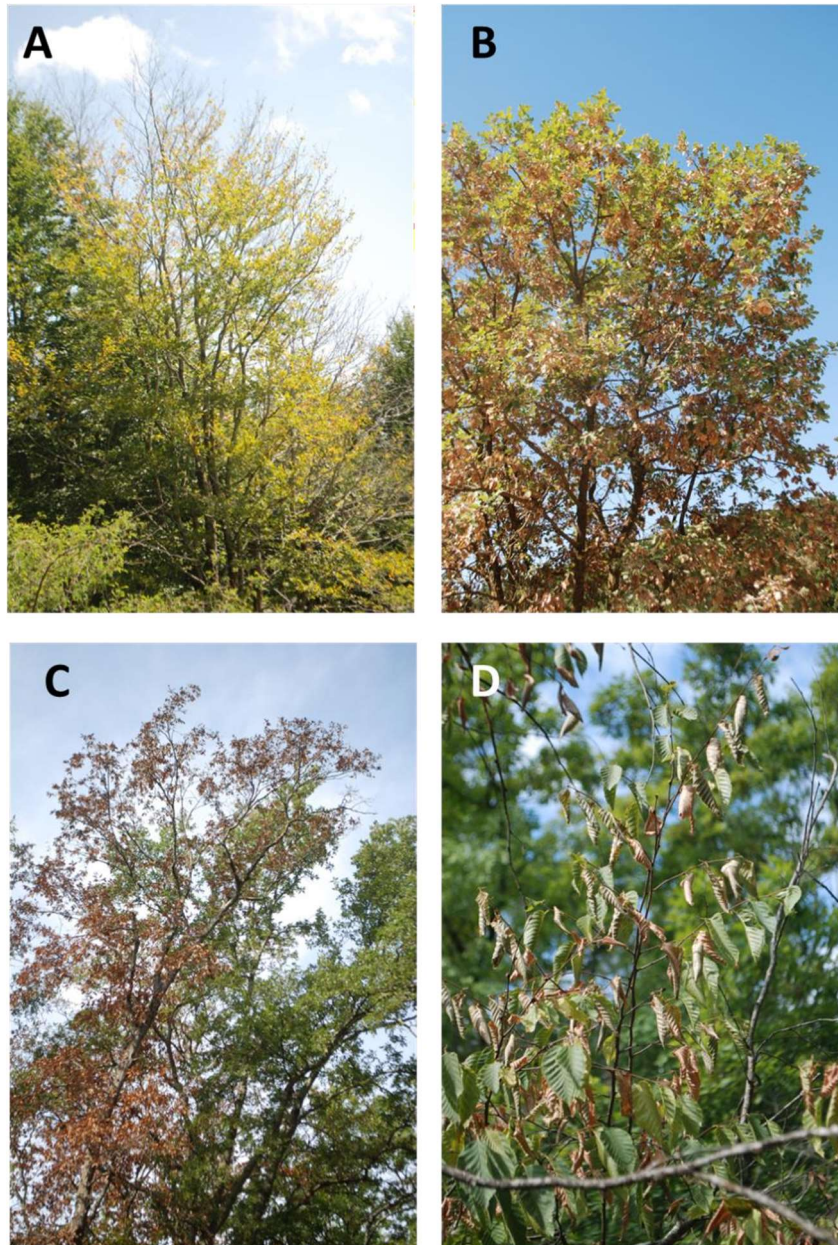


Fig. 13. Aspetti di defogliazioni indotta da episodi di siccità. (A) Faggio. (B) Roverella. (C) Cerro. (D) Carpino nero.



Fig. 14. *Lecci colpiti dall'ondata di calore e siccità del 2017, con parziale recupero.*

Conclusioni

Le priorità di ricerca

Le priorità di ricerca per il prossimo futuro riguardano:

- Analisi dei fattori causali e dei loro rispettivi ruoli nel determinare la defogliazione. Le serie storiche di defogliazione, e le differenze anno per anno, dovranno essere esaminate sulla base delle loro relazioni, per ciascuna area, con i fattori climatici, inquinamento, struttura e composizione delle foreste e così via, utilizzando dati rilevati direttamente e da archivi disponibili.
- Connessione del monitoraggio con attività sperimentali, sia in ambiente controllato o semi controllato, sia in ambiente naturale (*ecosystem manipulation*).
- Analisi dei comportamenti specie-specifici e dei pattern di risposta legati alle differenze di comportamento ecologico e fisiologico delle singole specie.

La possibile evoluzione delle condizioni dei boschi

L'evoluzione futura della salute delle foreste può essere riassunta in tre possibili scenari (Fig. 15).

1. **Resilienza.** L'attuale tendenza all'aumento della defogliazione e della mortalità degli alberi in bosco è collegata ad un ciclo climatico-ambientale reversibile. Già nel passato le foreste hanno subito periodi di alta defogliazione seguiti da periodi di bassa defogliazione a causa della fluttuazione dei fattori influenti e della capacità di risposta degli alberi, che sono in grado di ricostituire la situazione precedente l'evento di stress.
2. **Sub-ottimalità.** Le condizioni ambientali si stabilizzano su un livello medio-alto di stress. La defogliazione è maggiore rispetto alla situazione precedente, e si mantiene stabile nel tempo, sia pure con fluttuazioni anno per anno. La mortalità degli alberi, che ha già colpito gli individui e i popolamenti più sensibili, raggiunge una nuova stabilità. Complessivamente,

i sistemi forestali e ambientali si riorganizzano con una parvenza di equilibrio, sia pure ad un livello inferiore rispetto a quello precedente gli impatti.

3. **Declino.** Gli eventi estremi, secondo i modelli climatici correnti, si fanno sempre più frequenti fino a superare la capacità di recupero e resilienza delle specie e dei popolamenti. La mortalità aumenta e la diminuzione della copertura forestale provoca l'instaurarsi di serie vegetazionali regressive.

Si può ipotizzare che i tre scenari sopra descritti si possano verificare contemporaneamente e in maniera differenziata a seconda dell'eterogeneità ecologica dell'ambiente e delle prevalenti condizioni nei vari siti, creando un mosaico di situazioni ambientali con forti contrasti.

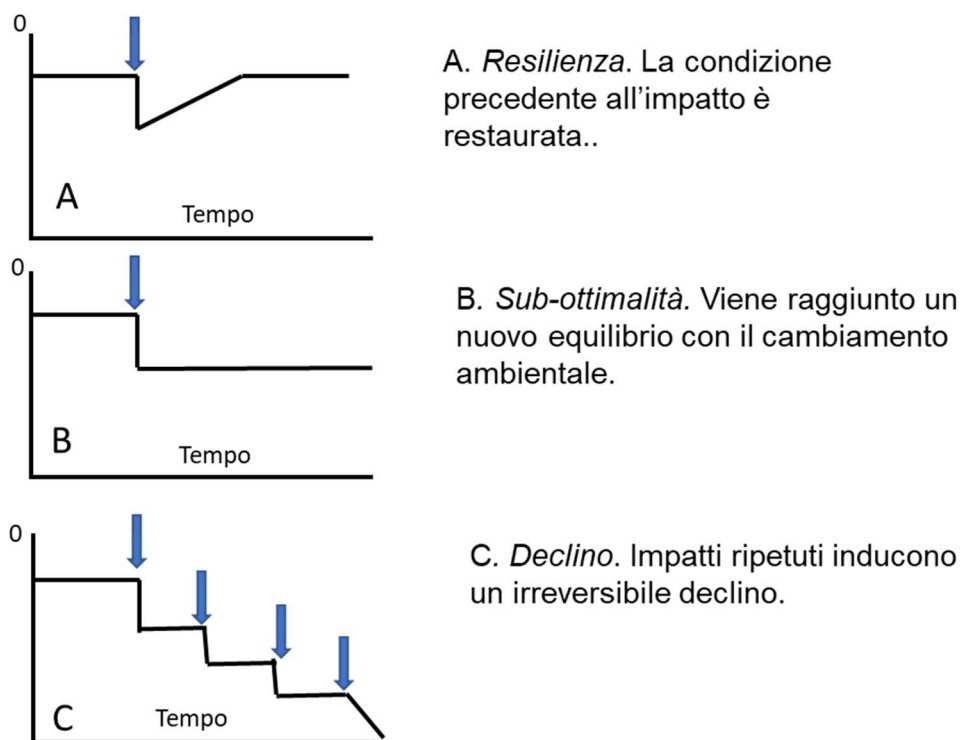


Fig. 15. Possibili scenari di evoluzione delle condizioni delle foreste soggette a cambiamento climatico.

Spunti per un più efficiente monitoraggio nel contesto del cambiamento climatico

1. **Intensificare la risoluzione spaziale.** L'attuale disegno della rete di monitoraggio estensiva (Livello I) è a bassa risoluzione spaziale, con un'area permanente ogni 270 Km². Se, come abbiamo visto, la distribuzione delle aree consente di rilevare gli effetti dei disturbi più importanti e che interessano vaste porzioni di territorio, non consente invece di cogliere impatti più localizzati o su componenti specifiche degli ecosistemi forestali. Si ritiene pertanto utile poter intensificare la rete nelle zone più a rischio, e per le formazioni forestali altrettanto suscettibili, coinvolgendo gli enti locali e i gestori delle aree protette, nonché poter disporre della collaborazione dei cittadini (*citizen science*, Castellaneta et al., 2021).

Inoltre, è di fondamentale importanza abbinare rilievi di *remote sensing* alle tradizionali osservazioni a terra in modo da poter arrivare ad una più efficace spazializzazione degli impatti.

2. **Intensificare la risoluzione temporale.** Negli anni critici, come quando sono in corso ondate di calore e siccità o altre anomalie climatiche, può essere utile (almeno nelle aree e nelle situazioni più a rischio) condurre più di un rilevamento nel corso del periodo vegetativo allo scopo di cogliere le dinamiche di senescenza precoce e abscissione anticipata, possibile emissione di nuovi getti o morte di alberi.
3. **Aumentare il potenziale informativo dell'indagine.** Una migliore conoscenza degli aspetti ecologici e strutturali dei boschi oggetto di attività di monitoraggio può certamente guidare l'interpretazione dei dati raccolti in maniera più efficace, così come una maggiore capacità diagnostica dei sintomi e delle cause di danno. Un campo di azione molto importante è rappresentato dalla possibilità di abbinare, alla tradizionale valutazione visiva delle chiome, l'applicazione di indici fisiologici di impatto, di stress e recupero in modo da ottenere una conoscenza fondata scientificamente sulla fragilità e resilienza delle formazioni forestali in risposta ai cambiamenti ambientali (Bussotti e Pollastrini, 2017a, b; 2021).

Dal monitoraggio alla gestione

I dati sulle condizioni di salute degli alberi costituiscono un patrimonio di informazioni che, insieme ad altri sistemi di monitoraggio (primo fra tutti l'INFC – Inventario Nazionale Foreste e serbatoi di Carbonio), rappresentano una base essenziale per conoscere le fragilità e i rischi che corrono le nostre foreste soggette a cambiamenti climatici, e produrre modelli per le possibili evoluzioni. Questa conoscenza potrà consentire di porre in atto misure di selvicoltura proattiva per migliorare la resilienza delle foreste e, d'altra parte, individuare le zone dove invece non saranno più possibili pratiche di selvicoltura produttiva.

Ringraziamenti

L'indagine è stata svolta nell'ambito del progetto "LIFE MODERn(NEC) - new MONitoring system to Detect the Effects of Reduced pollutants emissions resulting from NEC Directive adoption" - LIFE20 GIE/IT/000091.

Siamo grati al personale Carabinieri Forestale per la raccolta dei dati in campo per tutto il periodo dello studio. Si ringraziano inoltre tutti i colleghi che hanno collaborato, dall'inizio del progetto a oggi, allo sviluppo del sistema di monitoraggio e all'assistenza alle operazioni.

Bibliografia

Braun S, Hopf SE, Tresch S, Remund J., Schindler C. (2021) 37 Years of Forest Monitoring in Switzerland: Drought Effects on *Fagus sylvatica*. *Front. for. glob. change* 4: 765782.

Bussotti F, Pollastrini M (2017a). Observing climate change impacts on European forests: what works and what does not in ongoing long-term monitoring networks. *Frontiers in Plant Science* 8: 629.

- Bussotti F, Pollastrini M (2017b). Traditional and novel indicators of climate change impacts on European forest trees. *Forests* 8: 137.
- Bussotti F, Pollastrini M (2021). Revisiting the concept of stress in forest trees at the time of global change and issues for stress monitoring. *Plant Stress* 2: 100013.
- Bussotti, F., Cozzi, A., Cenni, E., Bettini, D., Sarti, C. and Ferretti, M. (2009). Measurement errors in monitoring tree crown conditions. *Journal of Environmental Monitoring* 11: 769–773.
- Bussotti F, Bettini D, Cenni E, Ferretti M, Sarti C, Nibbi R, Capretti P, Stergulc F, Tiberi R (2016). PARTE 2 - Valutazione della condizione delle chiome. Procedure di rilievo nelle aree di saggio e valutazione della condizione delle chiome. Manuale di campagna. Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, Roma.
- Bussotti F., Pollastrini M., Iacopetti G., Bettini D., Cenni E., Ferretti M., Panzavolta T., Bracalini M., Benassai D., Stergulc F., Tiberi R., Ghelardini L., Moricca S., Feducci M., Capretti. P. (2023) Procedure di rilievo nelle aree di saggio e valutazione della condizione delle chiome. Manuale di Campagna – Aggiornamento dell’edizione 2016. Pubblicato da Comando Carabinieri per la Tutela della Biodiversità e dei Parchi, Ufficio studi e progetti. Roma
- Bussotti F., G. Papitto, D. Di Martino, C. Cocciufa, C. Cindolo, E. Cenni, D. Bettini, G. Iacopetti, M. Pollastrini, (2021). Defoliation, Recovery and Increasing Mortality in Italian Forests: Levels, Patterns and Possible Consequences for Forest Multifunctionality. *Forests* 12: 1476
- Bussotti F., G. Papitto, D. Di Martino, C. Cocciufa, C. Cindolo, E. Cenni, D. Bettini, G. Iacopetti, M. Pollastrini, (2022). Le condizioni delle foreste italiane stanno peggiorando a causa di eventi climatici estremi? Evidenze dalle reti di monitoraggio nazionali ICP Forests - CON.ECO.FOR. *Forest@* 19: 74-81.
- Bussotti F, Bettini D, Carrari E, Selvi F, Pollastrini M (2023). Cambiamenti climatici in atto: osservazioni sugli impatti degli eventi siccitosi sulle foreste toscane. *Forest@* 20: 1-9.
- Carnicer J, Coll M, Ninyerola M, Pons X, Sánchez G, Peñuelas J (2011). Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 108, 1474–1478.
- Castellaneta M, Borghetti M, Colangelo M, Lapolla A, Rita A, Ripullone F (2021). *SilvaCuore*: un’App per monitorare lo stato di salute delle foreste italiane. *Forest@* 18: 74-78.
- Eichhorn J, Roskams P, Potočić N, Timmermann V, Ferretti M, Mues V, Szepesi A, Durrant D, Seletković I, Schröck H-W, Nevalainen S, Bussotti F, Garcia P, Wulff S (2020). Part IV: visual assessment of crown condition and damaging agents, version 2020-3. In: “Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests” (UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre ed). Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, pp. 49.
- Ferretti M (1994). Mediterranean forest trees. A guide for crown assessment. CEC-UN/ECE, Brussels, Geneva

- Ferretti M, Bussotti F, Cenni E, Cozzi A. 1999 Implementation of Quality Assurance procedures in the Italian programs of forest condition monitoring. *Water Air Soil Pollut.* 116, 371-376.
- Gasparini P, Di Cosmo L, Rizzo M (2016). Parte 1 - Procedure di rilievo nelle aree di saggio di Livello I. Procedure di rilievo nelle aree di saggio e valutazione della condizione delle chiome. Manuale di campagna, Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, Roma.
- George JP, Bürkner PC, Sanders TGM, Neumann M, Cammalleri C, Vogt JV, Lang, M. (2022). Long-term forest monitoring reveals constant mortality rise in European forests. *Plant Biology*, 24, 1108-1119.
- Jaime L. Battlori E, Ferretti M, Lloret F (2022). Climatic and stand drivers of forest resistance to recent bark beetle disturbance in European coniferous forests. *Global Change Biology* 28, 2830-2841.
- Kandler O, Innes JL (1995). Air pollution and forest decline in central Europe. *Environ. Pollut.* 90, 171-180.
- Müller E, Stierlin HR (1990). Tree crown photos. Sanasilva – Swiss Federal Institute for Forest Snow and Landscape Research, Birmensdorf, Switzerland.
- Pollastrini M, Puletti N, Selvi F, Iacopetti G, Bussotti F (2019). Widespread crown defoliation after a drought and heat wave in the forests of Tuscany (central Italy) and their recovery – a case study from summer 2017. *Front. for. glob. change* 2: 74.
- Potočić N, Timmermann V, Ognjenović M, Kirchner T, Prescher A-K, Ferretti M (2021). Tree health is deteriorating in the European forests. ICP Forests Brief No. 5, Programme Co-ordinating Centre of ICP Forests, Thünen Institute of Forest Ecosystems, Germany.
- Vacchiano G, Garbarino M, Borgogno M, Mondino E, Motta R (2012). Evidences of drought stress as a predisposing factor to Scots pine decline in Valle d'Aosta (Italy). *Eur. J. For. Res.* 131: 989-1000.



LIFE 20 GIE/IT/000091

Realizzato con il contributo dello strumento finanziario LIFE dell'EU