



Considerations on global forest research

Considerazioni sulla ricerca forestale mondiale ^(a)

Elena Paoletti ^(b)

^(a) Prolusione tenuta alla Cerimonia di Inaugurazione del 74° Anno accademico dell'Accademia Italiana di Scienze Forestali.

^(b) Vice Presidente IUFRO, Membro del Consiglio AISE, Membro del Board EFI, Responsabile IRET-CNR Firenze, Via Madonna del Piano 10 - 50019 Sesto Fiorentino, Italia; elena.paoletti@cnr.it

Abstract: Forest research is critical to face old and new challenges to global forests, in particular climate crisis, loss of biodiversity, environmental pollution and social injustice. This work synthesizes the top subjects of forest research, as emerging from recent activities of the International Union of Forest Research Organizations (IUFRO). Forest research main aims at present are devoted to find solutions to: Strengthen forest resilience and climate adaptation; Maintain and enhance the social values of forests for sustainable societies; Expand the role of forests and forest products in a responsible circular bioeconomy; and Transform forest-related sciences for the future.

Key words: digital forests; ecosystem services; forest restoration; silviculture.

Citation: Paoletti E., 2025 - *Considerazioni sulla ricerca forestale mondiale*. L'Italia Forestale e Montana, 80 (2): 67-83; <https://dx.doi.org/10.36253/ifm-1177>

Received: 11/06/2025 **Revised version:** 10/07/2025 **Published online:** 15/07/2025

1. INTRODUZIONE

Le foreste coprono 4,06 miliardi di ettari nel mondo, corrispondenti al 31% della superficie terrestre totale, e offrono soluzioni a problemi globali (FAO, 2024). A livello nazionale, la superficie forestale italiana copre 11 milioni di ettari, pari al 37% del territorio nazionale, ed è cresciuta del 20% negli ultimi 30 anni (Gasparini *et al.*, 2022).

Le foreste sono cruciali per la biodiversità, la stabilità climatica e il benessere della popolazione. Oggi il mondo forestale si confronta con emergenze mondiali gravissime, quali la

perdita di biodiversità, gli squilibri nei cicli del carbonio e dell'acqua, l'inquinamento, i cambiamenti climatici e socio-economici, che mettono a rischio la resilienza e sostenibilità delle foreste e richiedono interventi concreti. Ad esempio, deforestazione e degradazione forestale contribuiscono a circa il 10% delle emissioni globali di gas serra (Shukla *et al.*, 2019).

Guidata da queste sfide globali, la ricerca forestale si evolve rapidamente. Solo una ricerca di qualità può fornire le basi scientifiche per interventi appropriati e per informare i decisori politici. L'obiettivo di questo lavoro è

riassumere i recenti sviluppi della ricerca forestale mondiale, visti attraverso la lente dell'*International Union of Forest Research Organizations* (IUFRO), di cui l'autrice ha coordinato lo *Scientific Committee* dell'ultimo congresso mondiale ed è stata da poco nominata Vice Presidente per le *Task Forces*.

2. LA IUFRO

La IUFRO è un'associazione indipendente e no-profit che promuove un futuro sostenibile per le foreste e la società, e incoraggia la collaborazione globale tra società e organizzazioni di ricerca forestale (iufro.org). La sua missione è far crescere l'eccellenza in ricerca, condividere la conoscenza e incoraggiare lo sviluppo di soluzioni basate sulle foreste per affrontare le sfide a cui le foreste sono sottoposte in tutto il mondo.

Al momento, la IUFRO riunisce oltre 15 mila membri e 630 organizzazioni distribuiti in 115 paesi. Tradizionalmente, è suddivisa in Divisioni che al momento sono nove: Selvicoltura; Fisiologia e Genetica; Operazioni forestali; Valutazione, modellistica e gestione forestali; Prodotti forestali; Aspetti sociali; Salute forestale; Ambiente forestale; Politica ed economia forestali.

Ogni Divisione è articolata in *Research Groups*, a loro volta suddivisi in *Working Parties*. Divisioni, *Research Groups* e *Working Parties* sono detti Unità. Il *Board* è l'organo esecutivo che assicura il funzionamento della IUFRO, ed include il *Management Committee* (costituito da Presidente, Vice Presidenti, e alcuni membri selezionati dal Presidente) e i coordinatori delle Divisioni (che sono Unità a lungo termine) e delle *Task Forces* (che invece sono create su base temporanea, come spiegato sotto). Ogni Unità ha 1 o 2 coordinatori e fino a 4 *deputy* coordinatori, nel complesso detti *officers*. Ad oggi gli

officers sono circa mille e lavorano su base volontaria.

Al momento, i nostri rappresentanti nell'*International Council*, un organo che si affianca al *Board* in alcune decisioni, sono la prof.ssa Claudia Coccozza del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali dell'Università di Firenze e il dott. Alessandro Paletto del CREA Foresta Legno come sostituto.

Nell'organigramma attuale, figurano ben 39 *officers* italiani e 7 organizzazioni italiane: l'Accademia Italiana di Scienze Forestali, L'Istituto di Bioscienze e Biorisorse del Consiglio Nazionale delle Ricerche, il Centro di ricerca per le foreste e legno del Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali dell'Università di Firenze, la Società Italiana di Selvicoltura ed Ecologia Forestale, il Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali dell'Università di Padova, e *Bioversity International*.

Del resto, le capacità dei nostri scienziati forestali sono ben note. Giannetti *et al.* (2016) hanno mostrato che il numero di pubblicazioni e citazioni dell'Italia nella categoria *Forestry* è cresciuto continuamente dal 2002 al 2012, un dato che dimostra la vitalità del settore e la reputazione della nostra ricerca forestale. Inoltre, l'Italia era la seconda Nazione più efficiente nell'investire in ricerca forestale, come dedotto dal rapporto tra Prodotto Interno Lordo speso in Ricerca e Sviluppo e produttività bibliometrica, e metà delle nostre pubblicazioni era scritta in collaborazione con scienziati non italiani, così confermando la nostra apertura e disponibilità alle collaborazioni. Oggi, nella disciplina *Forestry* di *ScholarGPS*, l'Italia è terza nel mondo per qualità e quantità della produzione scientifica dopo Stati Uniti e Canada (o Cina e Stati Uniti se guardiamo solo gli ultimi 5 anni) (<https://scholargps.com/disciplines/78/forestry>).

3. TEMI IMPORTANTI E/O EMERGENTI NELLE TASK FORCES IUFRO

Le *Task Forces* (TF) IUFRO vengono create con l'obiettivo di favorire la collaborazione trans-divisionale su argomenti innovativi o importanti che non siano già trattati in altre Unità della IUFRO. Sono stabilite su base volontaria a seguito di una call, generalmente all'inizio del *Term* (che è il periodo quinquennale tra due congressi mondiali) e una volta approvate durano un *Term*. Nell'ultima call, lanciata a fine 2024, sono state presentate 23 proposte e 12 sono state approvate dopo un'attenta selezione da parte del *Board*. Talvolta ci possono essere call intermedie, come accaduto nel precedente *Term* 2020-2024, e il *Board* ha approvato la continuazione di una di queste anche nel *Term* 2024-2029. Di seguito, riassumo queste 13 TF perchè affrontano temi emergenti o comunque attuali per la ricerca forestale (Tab. 1). Per contribuire ad una TF, si può contattare direttamente il coordinatore (<https://www.iufro.org/our-work#task-forces>).

La TF *Interaction and Synergy of Carbon "3S" (Sink, Storage and Substitution) in Forest Value Chains* affronta il tema del settore forestale nella rimozione del carbonio atmosferico, un argomento che è cresciuto in modo esponenziale negli ultimi anni, concentrandosi prevalentemente sulle foreste temperate, la gestione forestale, l'analisi dell'incertezza, i suoli forestali, il programma *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation* (REDD+) delle Nazioni Unite, e la produttività primaria netta (Huang *et al.*, 2020). I nuovi argomenti di ricerca si concentrano sui cambiamenti nello stoccaggio del carbonio, il potenziale di sequestro del carbonio nelle foreste secondarie o tropicali, il carbonio nella lettiera, e i nuovi inventari forestali.

La rimozione del carbonio nel settore forestale avviene attraverso tre meccanismi in-

terconnessi: i serbatoi di carbonio negli ecosistemi forestali, rappresentati essenzialmente da suolo e biomassa (*sink*); lo stoccaggio del carbonio nei prodotti forestali a lungo termine, in particolare nel legno (*storage*); e la sostituzione del carbonio attraverso l'utilizzazione della biomassa per bio-prodotti (per esempio biocombustibili) (*substitution*). Ecco perché la TF rilancia la strategia delle 3S per il carbonio nelle catene del valore forestali (Forster *et al.*, 2023) e si pone l'obiettivo di riconciliare la ricerca adesso frammentata in questi tre settori e migliorare le interazioni tra selvicoltori, ecologi, economisti e politici.

Le foreste mondiali ospitano l'80% della biodiversità terrestre (FAO, 2023) e quella del suolo è fondamentale per il mantenimento dei servizi ecosistemici (Spohn *et al.*, 2023). L'emissione di gas serra dai suoli forestali e l'immagazzinamento di carbonio nella sostanza organica del suolo dipendono in larga parte dalla biodiversità del suolo stesso. La gestione forestale ha un grande potenziale di impatto sulla biodiversità del suolo e a cascata sui cicli biogeochimici (Vanermen *et al.*, 2020). La TF *The Impact of Biodiversity on Carbon Related Ecosystem Services Provided by Soils of Managed Forests* capitalizza sui risultati del progetto *Holisoils* (<https://holisoils.eu/>) e porta avanti misure di mineralizzazione ad alta risoluzione abbinate alla quantificazione di indicatori di biodiversità (micro e meso fauna), con l'obiettivo primario di migliorare gli attuali modelli di stima del carbonio nel suolo delle foreste gestite.

Le foreste forniscono servizi legati all'acqua, essenzialmente approvvigionamento, controllo delle alluvioni e dei sedimenti, regolazione del clima, purificazione dell'acqua, e valore sociale, p.e. per l'agricoltura o la pesca (Springgay *et al.*, 2019). La crisi climatica e nell'uso del territorio erode questi servizi e genera insicurezza nella complessa e cross-disciplinare cate-

Tabella 1 - Task Forces IUFRO nel periodo 2024-2029.

TITOLO	COORDINATORE
Interaction and Synergy of Carbon “3S” (Sink, Storage and Substitution) in Forest Value Chains	Shuirong Wu, Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Pechino, Cina wushuirong@caf.ac.cn
The Impact of Biodiversity on Carbon Related Ecosystem Services Provided by Soils of Managed Forests	Lorenzo Menichetti, Luke Helsinki, Finlandia lorenzo.menichetti@luke.fi
Forest-Water-Livelihood-Governance Nexus	Mingfang Zhang, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Cina mingfangzhang@uestc.edu.cn
Forest Living Labs for Sustainable Climate Adaptation	Phillippe Rozenberg, INRAE Orléans, Francia philippe.rozenberg@inrae.fr
Stand Complexity in Planted Forests	Christophe Orazio, Institut Européen de la Forêt Cultivée, Cestas, Francia c.orazio@iefc.net
Building an Integrated Vision of the Forest-Based Sector within a Bioeconomy	Ivana Živojinović, BOKU, Vienna, Austria ivana.zivojinovic@boku.ac.at
Scaling-Up Science-based Forest Sector Innovation	Lyndall Bull, Forestry Division, FAO, Roma, Italia Lyndall.Bull@fao.org
Health, Safety and Social Dimensions of Forest Restoration Operations	Rene Zamora Cristales, World Resources Institute, Oregon State University, USA Rene.Zamora@wri.org
Post-Conflict Forest Landscape Restoration	Marine Elbakidze, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Svezia Marine.Elbakidze@slu.se
Precision Pest Management (PPM) in Forest Ecosystems	Jeremy Allison, Canadian Forest Service, Sault Ste. Marie, Ontario, Canada Jeremy.Allison@nrcan-rncan.gc.ca
Legacy Forest Data and Related Resources	Hans Jürgen Böhmer, Institute of Earth System Sciences, Leibniz Universität Hannover, Germania boehmer@phygeo.uni-hannover.de
AI for Forest Science	Liyong Fu, Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Pechino, Cina fuly@ifrit.ac.cn
Gender Equity, Diversity and Inclusion in Forest-Related Sectors	Todora Rogelja, TESAF, Università di Padova, Italia todora.rogelja@unipd.it

na foresta-acqua-servizi. L'obiettivo della TF *Forest-Water-Livelihood-Governance Nexus* è sviluppare approcci innovativi e soluzioni che mettano in contatto la scienza di questo settore con la società e i decisori politici.

Un modo per migliorare i servizi ecosistemici resi dalle foreste è attraverso i *living labs* (Hossain *et al.*, 2019), un concetto molto attuale al momento. I *living labs* creano opportunità di ricerca collaborativa tra scienziati e *stakeholders*, definendo le priorità della ricerca sulla base delle necessità degli *stakeholders*, e promuovendo il co-design e l'innovazione (Nijnik *et al.*, 2019). L'obiettivo della TF *Forest Living Labs for Sustainable Climate Adaptation* è sviluppare, implementare, valutare e condividere attività e risultati di vari *living labs* di interesse forestale come piattaforme per co-creare, verificare e trasferire conoscenze scientifiche agli *stakeholders* in merito alle strategie di gestione forestale adattativa in risposta alle sfide della crisi climatica.

La TF *Stand Complexity in Planted Forests* è una continuazione di una precedente TF sulle piantagioni forestali. Foreste piantate e piantagioni (con turno fino a 15 anni) rientrano nella categoria delle foreste gestite intensivamente, mentre le foreste rigenerate naturalmente possono essere semi-naturali o naturali se presentano o meno segni visibili di gestione. Le foreste piantate sono circa il 7% della superficie forestale globale, ma producono il 46% del legname tondo per usi industriali (FAO, 2024). Il consumo globale di prodotti legnosi aumenterà di un terzo entro il 2050 (FAO, 2023) o addirittura del 49% dal 2020 al 2050 (FAO, 2024), sebbene queste proiezioni siano soggette a notevoli incertezze. Il 44% delle foreste piantate utilizza specie non native, il che mette a rischio la conservazione della biodiversità, il sequestro del carbonio e la stabilità degli ecosistemi (Payn *et al.*, 2015). Inoltre, l'emergenza climatica e i disturbi connessi (insetti, malattie, incendi, vento) espongono le

piantagioni coetanee e monospecifiche a rischi crescenti. Infatti, è noto che la resilienza forestale aumenta all'aumentare della complessità (Wang *et al.*, 2025). L'obiettivo della TF è colmare le lacune conoscitive su come le foreste piantate possono essere rese più resilienti ai cambiamenti climatici e su come gestirle per assicurare che gli obiettivi economici, ambientali e sociali siano adeguatamente bilanciati.

La bioeconomia non è un concetto nuovo e la TF *Building an Integrated Vision of the Forest-Based Sector within a Bioeconomy*, infatti, è la seconda TF IUFRO sull'argomento. In passato l'attenzione era stata solo sul legno, mentre la nuova TF si concentra sulla straordinaria biodiversità forestale in termini di piante, funghi e animali per offrire cibo, medicine e nuovi prodotti (Corona *et al.*, 2016) con l'obiettivo di espandere il concetto di bioeconomia forestale. Il termine bioeconomia è stato introdotto all'inizio del XX secolo per descrivere l'economia basata sulla natura e si è finora sviluppato su tre grandi temi: biosfera, biotecnologia e biomassa (Bugge *et al.*, 2016). Oggi, la bioeconomia è definita come la produzione, utilizzazione, conservazione e rigenerazione delle risorse biologiche, incluse conoscenza, scienza, tecnologia e innovazione necessarie a fornire soluzioni (IACGB, 2024).

Le foreste giocano ovviamente un ruolo fondamentale nel fornire prodotti e servizi naturali, e quindi il settore basato sulle foreste è parte integrante della bioeconomia (Giurca e Befort, 2023). Tra i prodotti forestali non legnosi, abbiamo semi, frutti, funghi (con molteplici applicazioni, non solo alimentari), ma anche il biochar per migliorare la qualità del suolo e ridurre l'emissione di gas serra dal suolo (Corona *et al.*, 2016). Circa 6 milioni di persone usano i prodotti forestali non legnosi, soprattutto nel così detto *Global South*.

L'innovazione, guidata da ricerca e sviluppo, è la chiave per il successo dell'implementazione

della bioeconomia in base alle esigenze locali (Gardossi *et al.*, 2023) e per finalizzare il grande potenziale delle foreste nella realizzazione degli obiettivi di sviluppo sostenibile e degli obiettivi forestali globali definiti dal piano strategico delle Nazioni Unite per le foreste (UN DESA, 2019). La TF *Scaling-Up Science-based Forest Sector Innovation* si concentra sull'innovazione, che può essere tecnologica, istituzionale, sociale, politica o finanziaria (FAO, 2024). Per essere efficace a livello globale, l'innovazione deve essere basata sulla scienza, scalabile, equa e inclusiva. L'obiettivo della TF è combinare queste tipologie di innovazione nel settore forestale. Finora, questo settore ha mostrato una grande capacità di innovazione, per esempio nello sviluppo di diversi prodotti legnosi e non legnosi, sistemi di verifica, meccanismi di *governance*. Tuttavia, persiste una mancanza generalizzata di cultura dell'innovazione e una certa inerzia istituzionale.

Per massimizzare la fornitura di servizi forestali, è indispensabile che le foreste siano in salute. Le foreste degradate non sono in grado di svolgere al meglio le loro funzioni e fornire servizi ecosistemici. *Forest landscape restoration* è il processo di restauro della funzionalità ecologica dei territori degradati e deforestati, nel contempo migliorando il benessere delle popolazioni che vivono in questi territori (Mansourian, 2017). L'iniziativa denominata *Bonn Challenge*, lanciata da Germania e IUCN nel 2011, prevedeva inizialmente di restaurare 150 milioni di ettari di terreni deforestati e degradati entro il 2020, ma con la Dichiarazione di New York l'obiettivo è passato a 350 milioni di ettari entro il 2030. Al momento, i lavori sono in corso su 210 milioni di ettari. La TF *Health, Safety and Social Dimensions of Forest Restoration Operations* affronta le sfide per salute e sicurezza dei lavoratori e delle popolazioni coinvolte durante le operazioni di *forest restoration*. Di seguito userò il termine inglese *restora-*

tion che in italiano si può tradurre sia recupero che restauro con lievi differenze che però non emergono dal termine inglese. Per passare dalla teoria alla pratica, la TF selezionerà diversi casi di studio, per definire strategie che mitighino i rischi e massimizzino i benefici.

Un tipo particolare di *forest restoration* che purtroppo la IUFRO ha dovuto considerare come attuale è quello legato ai conflitti armati. Il mondo affronta un periodo di grande incertezza che scaturisce dalla convergenza delle crisi ambientale, sociale, politica, economica ed etica. Conflitti armati in aree importanti dal punto di vista forestale non si verificano solo in Ucraina, ma anche in America Latina, Medio Oriente, Africa, Asia, e causano ripercussioni geopolitiche, ambientali, economiche e sociali a livello locale, regionale e globale. Questi conflitti portano a grave deforestazione e degradazione forestale. L'obiettivo della TF *Post-Conflict Forest Landscape Restoration* è fornire conoscenza scientifica transdisciplinare di qualità e soluzioni innovative per capire gli impatti post-conflitto sui territori forestati e supportare decisori politici e *stakeholders* per interventi di *restoration* a scala multipla.

Un problema di lunga data negli ecosistemi forestali, rafforzatosi a causa dell'importazione di insetti e patogeni alieni, è la gestione delle malattie infettive, che è notoriamente molto più complessa rispetto a quella negli ecosistemi agrari. Nuove tecnologie, come i sensori per la sorveglianza, le analisi genomiche e chimiche, la raccolta di dati attraverso tecnologie smart e le tecniche di analisi di *big data*, permettono lo sviluppo di una gestione fitosanitaria di precisione anche nelle foreste, per interventi più rapidi e precisi (Slippers *et al.*, 2020). L'obiettivo della TF *Precision Pest Management (PPM) in Forest Ecosystems* è espandere il concetto di PPM nelle foreste naturali, piantate e urbane, trasferendo informazioni dalla ricerca alla pratica.

La TF *Legacy Forest Data and Related Resources* si pone l'obiettivo di facilitare l'accesso a dati forestali pregressi (almeno per il XX secolo se non oltre). Si tratta soprattutto di dati inventariali, ma anche vecchie fotografie. Questi “*dark data*” possono fornire dettagli sulla gestione della biodiversità e del territorio nel tempo. La TF intende renderli disponibili in formati digitali moderni con l'aiuto di tecniche di intelligenza artificiale e (AI).

Inoltre, la IUFRO ha una TF dedicata interamente ad *AI for Forest Science*. L'integrazione dell'AI nelle scienze forestali offre nuove possibilità per affrontare problemi forestali complessi. L'AI sta già cambiando significativamente il monitoraggio e la gestione forestali grazie alla capacità di analizzare grandi quantità di dati (Buchelt *et al.*, 2024). La TF ha quattro obiettivi principali: assemblaggio e armonizzazione dei dati, spesso frammentati, attraverso la creazione di un *repository* centralizzato, globalmente accessibile; sviluppo di strumenti AI adattati a diverse applicazioni gestionali; progetti pilota e casi di studio per applicare gli strumenti AI al mondo reale; *capacity building* e scambio di conoscenze per migliorare le conoscenze AI del settore forestale attraverso iniziative di formazione.

Infine, la TF *Gender Equity, Diversity and Inclusion in Forest-Related Sectors* affronta i temi dell'equità di genere, la diversità e l'inclusione nel settore forestale. La IUFRO ha sempre dedicato una grande attenzione a questi aspetti e finalmente i risultati stanno arrivando. Per la prima volta nella lunghissima storia della IUFRO, nata nel 1892, è stata eletta la prima Presidente donna, la prof.ssa Daniela Kleinschmit, un'economista forestale dell'Università di Friburgo in Germania. Tuttavia, c'è ancora un lungo percorso da fare soprattutto in regioni come l'America Latina, l'Asia e l'Africa.

Anche per questo, la IUFRO ha deciso di organizzare il suo prossimo congresso mon-

diale, quello del 2029, a Nairobi in Kenia. Si tratta del primo congresso mondiale IUFRO in Africa, un'occasione per portare al centro dell'attenzione mondiale le foreste e la ricerca forestale di questo continente così importante dal punto di vista forestale, dato che ha un tasso di deforestazione superiore a quello del Sud America (4,41 *versus* 2,95 milioni di ha), il 90% del legname viene utilizzato per legna da ardere e comunque il legname tondo per uso industriale è il 39% di quello mondiale, ha una superficie forestale che copre il 16% di quella mondiale ma esporta solo il 2% del valore dei prodotti legnosi forestali (mentre l'Unione Europea ha il 3,9% di foreste e il 43% del valore delle esportazioni mondiali di prodotti legnosi forestali) (Hetemäki e Seppälä, 2022; FAO, 2024).

4. PROSPETTIVE DI RICERCA DAL CONGRESSO MONDIALE IUFRO

Una delle principali attività della IUFRO è l'organizzazione di eventi per favorire il dialogo nella ricerca forestale. L'evento principale è sicuramente il congresso mondiale che si tiene ogni cinque anni. L'ultimo congresso, dal titolo *Forests and Society Towards 2050*, si è tenuto nel 2024 a Stoccolma (Svezia) con oltre 4200 partecipanti da 110 Nazioni, 437 sessioni (orali e poster) per un totale di oltre 5000 *abstracts*. L'Italia è stata la settima Nazione per numero di partecipanti, a confermare il ruolo importante che svolge nei consessi internazionali forestali. Il programma scientifico si è ispirato all'Agenda 2030 con i suoi 17 obiettivi di sviluppo sostenibile, ed è stato suddiviso in 5 temi principali (Tab. 2). I principali contenuti discussi in ognuno di questi temi sono riassunti di seguito.

Nel tema 1, dedicato alla resilienza ai cambiamenti e all'adattamento agli stress, si è parlato

Tabella 2 - Tematiche del congresso mondiale IUFRO tenutosi a Stoccolma nel 2024.

TEMA	SOTTO-TEMA
1. Strengthening forest resilience and adaptation to stress	1.1 Maintaining forest health in the face of global change 1.2 Forests, soil and water 1.3 Forest management for global change adaptation and mitigation
2. Towards a responsible forest bioeconomy	2.1 Sustainable forest operations 2.2 Innovations, markets, and industrial developments for the forest products 2.3 Planted forests for a resourceful forest bioeconomy
3. Forest biodiversity and its ecosystem services	3.1 Harnessing underused forest genetic resources 3.2 Biodiversity, deforestation, and restoration 3.3 Emerging issues in forest landscape ecology
4. Forests for sustainable societies	4.1 Nature-Based Solutions 4.2 Power and equity in the forest sector 4.3 Forests, trees, and human well-being 4.4 The complexity of forest governance
5. Forests for the future	5.1 Innovation on forest research and emerging methodologies 5.2 Modelling the future of our forests: projections and uncertainties 5.3 Quality forest education

soprattutto di selvicoltura, definita *close-to-nature* (Sferlazza *et al.*, 2023) o *closer-to-nature* (Motta e Larsen, 2022) più che *climate-smart forestry* (Yousefpour, 2025). Quest’ultimo termine sta infatti perdendo momento, ma in ogni caso si tratta sempre dei principi fondamentali dettati dalla selvicoltura naturalistica (Ciancio, 2009). Nel dettaglio, la *climate-smart forestry* punta a massimizzare la multifunzionalità delle foreste e i benefici climatici delle foreste e del settore forestale per bilanciare servizi ecosistemici e produzione legnosa attraverso interventi attivi che specificatamente mirano a ridurre l’emissione di gas serra, adattare la gestione per ottenere foreste resilienti, aumentare sostenibilmente sia la produttività sia i servizi ecosistemici.

La *close-to-nature silviculture* (o selvicoltura naturalistica) utilizza la rinnovazione na-

turale, i boschi misti e la diversità strutturale per produrre foreste il più possibile naturali, al fine di aumentare stabilità e biodiversità. Si differenzia dalla *closer-to-nature silviculture* perchè quest’ultima può sacrificare la produzione a favore dei processi naturali in foreste non gestite o minimamente gestite. Nella selvicoltura sistemica, il bosco non è un insieme di alberi ma un sistema biologico autopoietico, estremamente complesso, che ha valore intrinseco e al quale sono attribuibili dei diritti. La selvicoltura sistemica segue un approccio di gestione non lineare, che varia nel tempo e nello spazio adattandosi alle diverse realtà, per cui tende all’aumento della biodiversità, della disformità e della disomogeneità.

Al congresso IUFRO di Stoccolma, si è parlato di come utilizzare la selvicoltura e la

gestione forestale per contrastare gli effetti negativi della “crisi climatica”, come ora si preferisce definire il “cambiamento climatico”, o addirittura per mitigare i cambiamenti stessi. Il recupero dai disturbi anche climatici è stato un tema ampiamente discusso, perchè comprendere le cause e i meccanismi della vulnerabilità significa imparare a gestire e minimizzare i rischi. In particolare, è consolidato il concetto che foreste multifunzionali sono più resilienti ai cambiamenti, si adattano meglio agli stress e permettono di migliorare la fornitura di servizi ecosistemici (Morel e Nogue, 2019). La ricerca di campo in questo settore si avvale soprattutto di esperimenti manipolativi a lungo termine, per esempio si manipola la disponibilità idrica (Huang *et al.*, 2024) o la presenza di inquinanti (Lazzara *et al.*, 2025) oppure si applicano tipi gestionali diversi (Paffetti *et al.*, 2012), ed inoltre si lavora su gradienti lungo transetti (Fabbio *et al.*, 2018).

Cambiamento climatico e inquinamento atmosferico sono due facce della stessa medaglia, perchè molti inquinanti atmosferici sono anche gas serra e comunque provengono dalle stesse fonti e impattano congiuntamente sugli ecosistemi (Bytnerowicz *et al.*, 2007). Il congresso ha dimostrato che la consapevolezza dei legami tra crisi climatica e inquinamento dell'aria è ormai radicata tra gli scienziati, il che può portare importanti conseguenze sulle politiche ambientali, perchè le azioni climatiche possono generare impatti positivi sulla qualità dell'aria e viceversa (Yin *et al.*, 2024).

Fra gli impatti, quelli che attualmente attraggono il maggiore interesse dei ricercatori sono le dinamiche del carbonio (Vacek *et al.*, 2023) e dei nutrienti (Hume *et al.*, 2018), nonchè gli effetti a livello di suolo (Mayer *et al.*, 2020) e di acqua (Vicente-Serrano *et al.*, 2020). Del resto, i periodi di siccità sono aumentati del 40% globalmente dal 1981 (Gebrechorkos *et al.*, 2025). In parallelo, gli stock

di carbonio nella biomassa degli ecosistemi al di sopra del 30° parallelo Nord stanno diminuendo a partire dal 2016 e in particolare nell'anno 2022 che ha visto una grave siccità (Li *et al.*, 2025). L'attenzione verso gli incendi forestali è sempre molto alta, e non più soltanto in ambiente mediterraneo, con l'obiettivo di capire sia come migliorare le previsioni, sia come rendere il territorio più resiliente, sia come recuperare le foreste percorse da incendi. Del resto, intensità e frequenza degli incendi stanno aumentando. Nel 2021, le foreste boreali hanno emesso circa un quarto della CO₂ dovuta agli incendi (FAO, 2024). Nel 2023, gli incendi hanno prodotto circa 6687 Mt di CO₂ globalmente, che è più del doppio delle emissioni dell'Unione Europea dovute a combustibili fossili in quell'anno.

Nel tema 2, verso una bioeconomia forestale responsabile, si è discusso di come rendere la bioeconomia sempre più sostenibile, circolare e responsabile, per renderci sempre più indipendenti dai combustibili fossili e promuovere risorse naturali rinnovabili. Finora l'attenzione si è concentrata sul sostituire prodotti non-rinnovabili con il legno e prodotti derivati, e sull'usare il legno in modo più efficiente, sofisticato e innovativo (Giurca e Befort, 2023). Ma le foreste forniscono molto più che solo legno, cellulosa e carbonio (Chamberlain e Smith-Hall, 2024), si pensi ai prodotti forestali non-legnosi, all'identità culturale e all'opportunità di ricreazione, il che rende la bioeconomia forestale un concetto molto ampio e multifunzionale. Più di un terzo delle Nazioni del mondo sta operando una transizione verso la bioeconomia (Smith-Hall e Chamberlain, 2024). Le pratiche circolari e la valorizzazione di specifici prodotti a base biologica sono temi innovativi chiave, mentre l'inquinamento da polveri sottili derivanti dall'uso della biomassa legnosa a fini energetici (Dong *et al.*, 2020) ha raffreddato gli iniziali entusiasmi, nonostante

che le caldaie a biomassa siano diventate molto più efficienti nell'abbattimento delle polveri (<https://energiadallegno.it/caldaie-a-biomasse-a-emissioni-quasi-zero/>). Comunque, circa 2,3 miliardi di persone nel mondo (29% del totale) ancora si affida al legno a fini energetici, p.e. nell'Africa sub-sahariana e in Asia meridionale (IEA, 2023).

Si è riparlato anche di bioraffinerie, perché dal legno si possono ottenere monomeri e macromolecole che hanno un grande potenziale per rimpiazzare i materiali grezzi fossili (Amidon *et al.*, 2011). Il problema è soprattutto la logistica, in particolare l'approvvigionamento, per cui si sono discusse soluzioni su scala locale con bioraffinerie integrate nelle segherie o nelle cartiere. Anche la tecnologia del legno ha fatto progressi straordinari (Klarić e Obučina, 2020; Ma *et al.*, 2024; Graf *et al.*, 2025), si pensi alla possibilità di costruire grattacieli in legno (Buffi e Angelini, 2019), il che è importante per prolungare lo stoccaggio del carbonio e mitigare il cambiamento climatico (Carcassi *et al.*, 2020). Ad esempio, nel Regno Unito, l'approccio circolare di riciclare il truciolo a media densità fornisce il 75% in più di mitigazione del cambiamento climatico rispetto allo scenario *business-as-usual* (Forster *et al.*, 2023). In generale, i prodotti a base di legno sono percepiti come portatori di un "valore aggiunto", che può essere ambientale, economico, sociale (Calvano *et al.*, 2025).

Sempre nel tema 2, si è molto discusso sulla gestione delle piantagioni forestali e come renderle sempre più sostenibili. Le piantagioni possono alleviare la pressione sulle foreste naturali e gestite (Deng *et al.*, 2024), purché si risolvano i problemi di impatto sulla biodiversità, il bilancio del carbonio, i sistemi socio-ecologici locali (Wang *et al.*, 2022). C'è necessità di nuovi modelli di gestione (come le piantagioni miste, Kremer *et al.*, 2025) e nuovi modelli di business, tra cui la certificazione dei

prodotti sembra la più valida (Tonouweva *et al.*, 2024). Collegato all'argomento delle piantagioni e della certificazione, il Congresso ha dimostrato che l'attenzione della ricerca verso l'agro-selvicoltura non accenna a diminuire (Sheban *et al.*, 2025), coniugandosi a concetti più moderni come la fornitura di servizi ecosistemici e di posti di lavoro in aree depresse.

Infine, in questo tema erano comprese le operazioni forestali sostenibili, un concetto che mira a riconciliare abbattimento ed esbosco con la protezione ambientale e che è stato sviluppato per la prima volta nell'ambito di una TF IUFRO coordinata dall'autrice (Marchi *et al.*, 2018). Al congresso, questo concetto si è dimostrato ampiamente consolidato e sono stati presentati risultati scientifici sui suoi cinque pilastri: efficienza, qualità dei prodotti, salute e sicurezza dei lavoratori, accettabilità sociale e sostenibilità nel futuro.

Il terzo grande tema del Congresso è quello della biodiversità. In primis, si sono discusse strategie genetiche messe in atto per aiutare l'adattamento ai cambiamenti climatici, come la migrazione assistita (Chakraborty *et al.*, 2024), lo studio della genomica adattativa (Sang *et al.*, 2022) e ovviamente il miglioramento genetico (Cappa *et al.*, 2025). Un altro grande argomento è relativo a come monitorare la biodiversità forestale e quindi quali sono i migliori indicatori, per esempio il DNA ambientale (Leskey *et al.*, 2025) o le firme spettrali (Marques *et al.*, 2024), per arrivare a sviluppare schemi di monitoraggio quali le *Essential Biodiversity Variables* (EBV) (Reddy *et al.*, 2025). Senza consenso sugli indicatori, non è possibile verificare il successo delle politiche, in particolare quelle settate dalla *Convention on Biological Diversity* (Affinito *et al.*, 2025).

L'attacco alla biodiversità viene anche dall'introduzione di specie aliene, soprattutto se invasive e patogene. Un recente studio dimostra che i costi monetari delle invasioni biologiche sono

stati finora gravemente sottostimati (Soto *et al.*, 2025). Al congresso, si è discusso come limitarle e controllarle, per cui la biosicurezza sembra oggi uno dei problemi fitosanitari più pressanti (Warman *et al.*, 2025). Si è parlato anche di biodiversità della fauna, sia del suolo sia selvatica, e di come la caccia spesso illegale stia producendo una defaunizzazione (dall'inglese *defaunation*) delle foreste tropicali con ripercussioni negative sulle loro funzioni ecologiche e sui loro servizi ecosistemici (Brodie *et al.*, 2025). Si è discusso dell'effetto dell'urbanizzazione sulla biodiversità (Weiskopf *et al.*, 2024), ed in particolare se incoraggiare solo l'uso di specie native per il verde urbano, senza tuttavia trovare un consenso su questo scottante argomento.

Per la conservazione della biodiversità forestale, l'*Integrated Forest Management* (IFM) è considerato la tecnica migliore, dato che integra la scala locale con quella territoriale (Corona *et al.*, 2015). Si è poi discusso di quale materiale vegetale utilizzare per la *forest restoration* e per la riforestazione, constatando però che il mercato del postime è molto lento a rispondere a queste mutate necessità (non solo in Italia). In generale c'è necessità di decisioni a livello politico capaci di individuare gli strumenti tecnici adeguati.

Il quarto tema del Congresso è relativo alla dimensione sociale delle foreste. Per lo sviluppo di politiche di adattamento è necessario uno scambio di dati e informazioni che vada al di là dei limiti nazionali e legislativi. Il dialogo è l'unico modo per riunificare politiche frammentate e raggiungere una *governance* forestale equa e traducibile nella pratica, attraverso processi decisionali che includano un'analisi del rischio e delle aspettative della società. Tuttavia, la ricerca su temi politici e sociali rimane ancora sottorappresentata rispetto agli argomenti ecologici e tecnologici.

Soprattutto si è parlato di foreste urbane, come mai in passato a questi congressi, il che

significa che le foreste urbane hanno assunto un ruolo davvero rilevante dal punto di vista sociale e che i forestali oggi sono interessati ad occuparsene senza lasciare il passo ad altri come accaduto in passato. I servizi ecosistemici forniti dalle foreste urbane, infatti, attraggono sempre più attenzione (Samson *et al.*, 2019). In generale, cresce l'attenzione della ricerca forestale verso le così dette *nature-based solutions* (NBS), definite come azioni per proteggere, conservare e restaurare gli ecosistemi naturali al fine di rispondere a sfide socialmente rilevanti e in ultima analisi contribuire alla nostra salute e al nostro benessere (Seddon *et al.*, 2020). I benefici delle NBS non sono stati ancora esplorati rigorosamente, per cui rappresentano un argomento prioritario per la ricerca.

Al congresso, si è parlato dei pro e dei contro della digitalizzazione nel settore forestale, non solo in merito alla produzione, conservazione e gestione dei *big data* derivanti dal monitoraggio (Damaševičius *et al.*, 2024), ma anche perché la digitalizzazione influenza la *governance* (Rantala *et al.*, 2020), in quanto migliora la trasparenza, avvicina i piccoli proprietari e migliora l'efficienza delle catene del valore forestale. Anche la comunicazione digitale, cioè i social media, è emersa con importanza nel settore forestale, ma c'è ancora la percezione che non siamo in grado di trasmettere i nostri messaggi nel modo più efficiente possibile.

Molto spazio è stato dedicato alle differenze di genere e al ruolo delle donne nella ricerca e nella gestione forestali, e si è suggerito che appropriati programmi di formazione e *mentorship* potrebbero essere uno strumento utile a colmare queste differenze. Un grandissimo aiuto contro le disparità sociali nel settore forestale è poi dato dai programmi di certificazione (McDermott *et al.*, 2025).

Nel quinto tema, foreste per il futuro, si è parlato soprattutto di monitoraggio forestale

che effettivamente ha visto una specie di rivoluzione perché è sempre più strumentale ed è sempre più combinato (Dainelli *et al.*, 2021). Gli inventari odierni sono basati su droni, *remote sensing*, fotogrammetria digitale, sensori RGB e *machine learning*. E oggi non si monitora più “solo” la crescita o il carbonio, ma anche le risposte ecofisiologiche, per esempio l’assorbimento stomatico di ozono (Paoletti *et al.*, 2019), e questo grazie allo sviluppo tecnologico dei pannelli solari e delle batterie, nonché dei sistemi di trasmissione dati che ci permettono di riceverli in continuo sui nostri computer. Per l’analisi di questa grande massa di dati, le tecniche di intelligenza artificiale sono utilissime e si stanno sviluppando in modo veramente rapido. *Machine learning*, *data fusion*, e *open-source datasets* sono sempre più utilizzati nelle scienze forestali (Nitoslawski *et al.*, 2021). Al congresso si è ovviamente parlato anche di educazione forestale, non solo di *curricula*, ma anche di come la pandemia ha introdotto possibilità di educazione online, delle foreste sperimentali e universitarie (tipo la Riserva Naturale Biogenetica di Vallombrosa a Reggello), e delle tecniche di realtà virtuale che possono ricreare il bosco ovunque sei.

La modellistica forestale è uno strumento essenziale per la ricerca, la gestione e le politiche forestali, ma al momento è in una fase di grande trasformazione (Blanco e Lo, 2023). Forse per questo al Congresso non ha ricevuto la dovuta attenzione, per cui emerge sicuramente come un settore prioritario per la ricerca forestale.

5. CONCLUSIONI

L’umanità sta affrontando una crisi senza precedenti, con la crisi climatica che accelera e le specie che scompaiono ad un ritmo preoccupante. Dobbiamo ripensare il nostro rapporto con le foreste e il nostro modo di gestirle. Que-

sto spaccato di attività IUFRO mostra la grandissima vivacità e diversificazione della ricerca forestale mondiale, su tematiche importanti come i servizi ecosistemici, in particolare il sequestro del carbonio, e le tecnologie digitali. Mentre lo sviluppo tecnologico sta trasformando il monitoraggio e la gestione, l’integrazione tra ricerca e politica e le dimensioni sociali ed economiche rimangono sottorappresentate.

Al congresso di Stoccolma, si è confermato che la crisi climatica, la perdita di biodiversità, l’inquinamento ambientale e l’ingiustizia sociale sono tra le più severe crisi del nostro tempo e richiedono azioni risolutive ed eque (Stockholm declaration, 2024) per:

1. rafforzare la resilienza e l’adattamento climatico delle foreste, promuovendo la collaborazione tra scienza, tecnologia, gestione e politica per migliorare la salute delle foreste, impegnandosi nei processi politici volti a fermare deforestazione e perdita di biodiversità, e favorendo una gestione forestale sostenibile e adattativa, il *forest landscape restoration* e le *Nature-Based Solutions* contro gli effetti negativi della crisi climatica e per assicurare i servizi ecosistemici legati alle foreste;
2. mantenere e migliorare i valori sociali delle foreste per società sostenibili, supportando lo sviluppo di politiche basate sulla scienza e l’impegno a migliorare la consapevolezza pubblica sul ruolo delle foreste, dei prodotti forestali e dei servizi ecosistemici forestali, utilizzando conoscenza e esperienza su sistemi istituzionali e di governo per migliorare la qualità della vita, in particolare per donne, popolazioni indigene, giovani e altri gruppi marginalizzati, e promuovendo una selvicoltura urbana innovativa e altri approcci basati sulla natura per migliorare il funzionamento degli ecosistemi, il benessere umano e la resilienza al cambiamento climatico nelle città;

3. espandere il ruolo delle foreste e dei prodotti forestali in una bioeconomia responsabile e circolare, supportando l'innovazione basata sulla scienza lungo le catene del valore di prodotti e servizi forestali attraverso regolamenti e principi sostenibili, e utilizzando la ricerca sociale, economica e politica per sviluppare forme di governo e di finanza che rendano possibile una transizione giusta verso la gestione sostenibile, un comportamento più responsabile di produttori e consumatori, e modelli di business che mettano al primo posto i benefici pubblici piuttosto che i profitti privati;
4. trasformare le scienze forestali per il futuro, attraverso un uso responsabile delle nuove tecnologie, la digitalizzazione, gli strumenti di intelligenza artificiale, basato su una piena comprensione delle loro implicazioni socio-economiche ed etiche, supportando lo sviluppo di tecniche di insegnamento moderne, e infine diversificando e rafforzando i percorsi educativi e formativi a tutti i livelli per tenere il passo dei rapidi cambiamenti tecnologici, sociali e ambientali.

Il dialogo - tra discipline e utenti diversi - è la base per una ricerca di qualità in un settore altamente multidisciplinare come quello forestale. Le associazioni nazionali e internazionali, come l'Accademia Italiana di Scienze Forestali e la IUFRO, svolgono un ruolo fondamentale nel favorire i contatti all'interno e all'esterno della comunità scientifica forestale. I futuri sviluppi della ricerca forestale dipendono in larga parte dalla nostra capacità di collaborazione interdisciplinare in un mondo in continuo e rapido cambiamento. Questi messaggi mirano a sviluppare azioni a tutti i livelli per assicurare un pianeta stabile che garantisca il benessere della popolazione in tutto il mondo.

Ringraziamenti

Ringrazio l'Accademia Italiana di Scienze Forestali per il gradito invito a tenere la prolusione su questo tema all'inaugurazione dell'Anno Accademico 2025, in particolare la Presidente Prof.ssa Susanna Nocentini e il *Past President* Prof. Orazio Ciancio, e ringrazio la IUFRO nella quale ho svolto un importante percorso di crescita professionale e personale.

RIASSUNTO

La ricerca forestale è la base per fronteggiare le sfide a cui le foreste sono sottoposte, quali la crisi climatica, la perdita di biodiversità, l'inquinamento ambientale e l'ingiustizia sociale. Questo lavoro riassume gli argomenti principali per la ricerca forestale così come emersi durante le attività recenti della Unione Internazionale delle Organizzazioni di Ricerca Forestale (IUFRO). I principali obiettivi della ricerca forestale al momento sono rivolti a trovare soluzioni per: rafforzare la resilienza e l'adattamento climatico delle foreste; mantenere e migliorare i valori sociali delle foreste per società sostenibili; espandere il ruolo delle foreste e dei prodotti forestali in una bioeconomia responsabile e circolare; e trasformare le scienze forestali per il futuro.

BIBLIOGRAFIA

- Affinito F., Butchart S.H.M., Nicholson E. *et al.*, 2025 - *Assessing coverage of the monitoring framework of the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework and opportunities to fill gaps*. Nature Ecology & Evolution. <https://doi.org/10.1038/s41559-025-02718-3>
- Amidon T.E., Bujanovic B., Liu S., Howard, J.R., 2011 - *Commercializing biorefinery technology: a case for the multi-product pathway to a viable biorefinery*. Forests, 2 (4): 929-947. <https://doi.org/10.3390/f2040929>
- Blanco J.A., Lo Y.-H., 2023 - *Latest trends in modelling forest ecosystems: new approaches or just new methods?* Current Forestry Reports, 9 (4): 219-229. <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00189-y>
- Brodie J.F., Bello C., Emer C., Galetti M., Luskin M.S., Osuri A., Peres C.A., Stoll A., Villar N., López A.-B., 2025 - *Defaunation impacts on the carbon balance of tropical forests*. Conservation Biology, 39 (1), e14414.

- Buchelt A., Adrowitzer A., Kieseberg P., Gollob C., Notherdt A., Eresheim S., Tschischek S., Stampfer K., Holzinger A., 2024 - *Exploring artificial intelligence for applications of drones in forest ecology and management*. Forest Ecology and Management, 551, 121530. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121530>
- Buffi A., Angelini G.M., 2019 - *Adaptive timber towers. an evolutionary prototype for the 21st century skyscraper*. Lecture Notes in Civil Engineering, 24: 971-987. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8_39
- Bugge M.M., Hansen T., Klitkou A., 2016 - *What is the bioeconomy? A review of the literature*. Sustainability, 8 (7): 1-22. <https://doi.org/10.3390/su8070691>
- Bytnerowicz A., Omasa K., Paoletti E., 2007 - *Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective*. Environmental Pollution, 147: 438-445.
- Calvano S., Negro F., Blanc S., Bruzzese S., Brun F., Zannuttini R., 2025 - *Adding value to wood-based products: a systematic literature review on drivers*. Forests, 16, 590. <https://doi.org/10.3390/f16040590>
- Cappa E.P., Chen C., Klutsch J.G. et al., 2025 - *Revealing stable SNPs and genomic prediction insights across environments enhance breeding strategies of productivity, defense, and climate-adaptability traits in white spruce*. Heredity, 134: 186-199. <https://doi.org/10.1038/s41437-025-00747-z>
- Carcassi O.B., De Angelis E., Iannaccone G., Malighetti L.E., Masera G., Pittau F., 2020 - *Bio-based materials for the Italian construction industry: Buildings as carbon sponges*. Research for Development, p. 237-247.
- Chakraborty D., Ciceu A., Ballian D. et al., 2024 - *Assisted tree migration can preserve the European forest carbon sink under climate change*. Nature Climate Change, 14: 845-852. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02080-5>
- Chamberlain J., Smith-Hall C., 2024 - *Harnessing the full potential of a global forest-based bioeconomy through non-timber products: Beyond logs, biotechnology, and high-income countries*. Forest Policy and Economics, 158, 103105.
- Ciancio O., 2009 - *Selvicoltura naturalistica e selvicoltura sistemica. Teorie, Assiomi, Stati e Processi*. L'Italia Forestale e Montana, 64 (6): 343-349.
- Corona P., Ascoli D., Barbati A., Bovio G., Colangelo G., Elia M., Garfi V., Iovino F., Laforteza R., Leone V., Lovreglio R., Marchetti M., Marchi E., Menguzzato G., Nocentini S., Picchio R., Portoghesi L., Puletti N., Sanesi G., Chianucci F., 2015 - *Integrated forest management to prevent wildfires under Mediterranean environments*. Annals of Silvicultural Research, 39 (1): 1-22. <https://doi.org/10.12899/ASR-946>
- Corona P., Cutini A., Chiavetta U., Paoletti E., 2016 - *Forest-food nexus: a topical opportunity for human well-being and forestry*. Annals of Silvicultural Research, 40 (1): 1-10.
- Dainelli R., Toscano P., Gennaro S.F.D., Matese A., 2021 - *Recent advances in unmanned aerial vehicle forest remote sensing - a systematic review. Part I: A general framework*. Forests, 12 (3), 327. <https://doi.org/10.3390/f12030327>
- Damaševičius R., Mozgeris G., Kurti A., Maskeliūnas R., 2024 - *Digital transformation of the future of forestry: an exploration of key concepts in the principles behind Forest 4.0*. Frontiers in Forests and Global Change, 7, 1424327. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1424327>
- Deng L., Hu H., Li J., Li X., Huang C., Yu Z., Zhang H., Qu Q., Wang X., Dong L., Shangguan Z., 2024 - *Pursuing the goal of carbon neutrality in China: path for realization of carbon sequestration in planted forests*. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 11 (3): 355-366. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2023534>
- Dong J., Chi Y., Ephraim A., Nzihou A., Millán L.M.R., 2020 - *Particulate matter*. Handbook on Characterization of Biomass, Biowaste and Related By-products, p. 1267-1306. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35020-8_14
- Fabbio G., Cantiani P., Ferretti F., di Salvatore U., Bertini G., Becagli C., Chiavetta U., Marchi M., Salvati L., 2018 - *Sustainable land management, adaptive silviculture, and new forest challenges: Evidence from a latitudinal gradient in Italy*. Sustainability (Switzerland), 10 (7), 2520. <https://doi.org/10.3390/su10072520>
- FAO, 2023 - *Towards more resilient and diverse planted forests*. Unasylva No. 254, Vol. 74 2023/1. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc8584en>
- FAO, 2024 - *The State of the World's Forests 2024 - Forest-sector innovations towards a more sustainable future*. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cd1211en>
- Forster E.J., Healey J.R., Newman G. et al., 2023 - *Circular wood use can accelerate global decarbonisation but requires cross-sectoral coordination*. Nature Communication, 14, 6766. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42499-6>
- Gardossi L., Philp J., Fava F., Winickoff D., D'Aprile L., Dell'Anno B., Jørgen Marvik O., Lenz A., 2023

- *Bioeconomy national strategies in the G20 and OECD countries: sharing experiences and comparing existing policies*. EFB Bioecon. J. 3, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2023.100053>.
- Gasparini P., Di Cosmo L., Floris A., De Laurentis D., 2022 - *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio - Metodi e Risultati della Terza Indagine*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-98678-0>
- Gebrechorkos S.H., Sheffield J., Vicente-Serrano S.M. et al., 2025 - *Warming accelerates global drought severity*. Nature. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09047-2>
- Giannetti F., Chirici G., Paoletti E., Borghetti M., Corona P., Bucci G., 2016 - *Assessing the bibliometric productivity of forest scientists in Italy*. Annals of Silvicultural Research, 40 (1): 19-30.
- Giurca A., Befort N., 2023 - *Deconstructing substitution narratives: The case of bioeconomy innovations from the forest-based sector*. Ecological Economics. Volume 207, May 2023, 107753. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107753>
- Graf E., Matz P., Auer P. et al., 2025 - *Bending behavior of hybrid laminates made of aluminum and wood for sustainable lightweight structures*. Scientific Reports 15, 16495. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99234-y>
- Hetemäki L., Seppälä J., 2022 - *Planetary Boundaries and the Role of the Forest-Based Sector*. In: L. Hetemäki, J. Kangas & H. Peltola, eds. Forest Bioeconomy and Climate Change, vol. 42: 19-31. Managing Forest Ecosystems. Cham, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99206-4_2
- Hossain M., Leminen S., Westerlund M., 2019 - *A systematic review of living lab literature*. Journal of Cleaner Production, 213, 976-988. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.257>
- Huang J., Ladd S.N., Ingrisch J., Kubert A., Meredith L.K., van Haren J., Bamberger I., Daber L.E., Kuhnhammer K., Bailey K., Hu J., Fudyma J., Shi L., Dippold M.A., Meeran K., Miller L., O'Brien M.J., Yang H., Herrera-Ramirez D., Hartmann H., Trumbore S., Bahn M., Werner C., Lehmann M.M., 2024 - *The mobilization and transport of newly fixed carbon are driven by plant water use in an experimental rainforest under drought*. Journal of Experimental Botany, 75 (8): 2545-2557. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae030>
- Huang L., Zhou M., Lv J., Chen K., 2020 - *Trends in global research in forest carbon sequestration: A bibliometric analysis*. Journal of Cleaner Production, 252, 119908. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119908>
- Hume A.M., Chen H.Y.H., Taylor A.R., 2018 - *Intensive forest harvesting increases susceptibility of northern forest soils to carbon, nitrogen and phosphorus loss*. Journal of Applied Ecology, 55 (1): 246-255. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12942>
- IACGB, 2024 - *Communiqué*. Global Bioeconomy Summit 2024.
- IEA (International Energy Agency), 2023 - *A Vision for Clean Cooking Access for All*. Paris. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/75f59c60-c383-48ea-a3be-943a964232a0/AVisionforCleanCookingAccessforAll.pdf>
- Klarić S., Obućina M., 2020 - *New Trends in Engineering Wood Technologies*. Lecture Notes in Networks and Systems, 76: 712-727. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18072-0_83
- Kremer K., Jonsson B.-G., Dutta T., Tavares M.F., Bauhus J., 2025 - *Single- vs mixed-species plantations: A systematic review on the effects on biodiversity*. Biological Conservation, 307, 111182. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111182>
- Lazzara L., Marra E., Moura B.B., Manzini J., Viviano A., Garosi C., Hoshika Y., Paoletti E., 2025 - *FO3X (Ozone FACE - Free-Air Controlled Exposure): Un'infrastruttura innovativa per una valutazione realistica dell'impatto dell'ozono troposferico sulla vegetazione*. L'Italia Forestale e Montana, 80 (1): 7-22; <https://dx.doi.org/10.36253/ifm-1155>
- Leskey T.C., Carnio V., Nixon L.J., 2025 - *Chemically mediated trophic interactions of invasive herbivorous insects and their applications for monitoring and management*. Current Opinion in Insect Science, 69, 101364. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2025.101364>
- Li X., Ciais P., Fensholt R. et al., 2025 - *Large live biomass carbon losses from droughts in the northern temperate ecosystems during 2016-2022*. Nature Communication 16, 4980. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59999-2>
- Ma H., Liu C., Yang Z. et al., 2024 - *Programmable and flexible wood-based origami electronics*. Nature Communication, 15, 9272. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53708-1>
- Mansourian S., 2017 - *Governance and forest landscape restoration: A framework to support decision-making*. Journal for Nature Conservation, 37: 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2017.02.010>
- Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D., Nordfjell T., Mederski P.S., McEwan A., Brink M., Laschi A.,

- 2018 - *Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate*. Science of the Total Environment, 634: 1385-1397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084>
- Marques E.Q., Silvério D.V., Galvão L.S. *et al.*, 2024 - *Assessing the effectiveness of vegetation indices in detecting forest disturbances in the southeast Amazon*. Scientific Reports, 14, 27287. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77924-3>
- Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.-P., Laganrière J., Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L., 2020 - *Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis*. Forest Ecology and Management, 466, 118127. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>
- McDermott C.L., Addoah T., Agyarko-Kwarteng T., Asare R., Assanvo A., Lima M.B., Bellfield H., Berlan A., Carodenuto S., Gardner T., Garrett R.D., Hafferty C., Hirons M., Ingram V., Kumeh E.M., Lyons-White J., Mason J., Meyfroidt P., Montana J., de Oliveira G.L.T., Ramcilovik-Suominen S., Sotirov M., Thompson W., Winkel G., 2025 - *Equity in unilateral value chain policies: A monitoring framework for the EUDR and beyond*. Forest Policy and Economics, 174, 103469. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2025.103469>
- Morel A.C., Nogué S., 2019 - *Combining Contemporary and Paleocological Perspectives for Estimating Forest Resilience*. Frontiers in Forests and Global Change, 2, 57. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00057>
- Motta R., Larsen J.B., 2022 - *A new paradigm for sustainable forest management: closeR to nature forest management*. Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology, 19: 52-62. <https://doi.org/10.3832/efor4124-019>
- Nijnik M., Secco L., Miller D., Melnykovych M., 2019 - *Can social innovation make a difference to forest-dependent communities?* Forest Policy and Economics, 100: 207-213. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.001>
- Nitoslawski S.A., Wong-Stevens K., Steenberg J.W.N., Witherspoon K., Nesbitt L., Konijnendijk van den Bosch C.C., 2021 - *The Digital Forest: Mapping a Decade of Knowledge on Technological Applications for Forest Ecosystems*. Earth's Future, 9 (8), e2021EF002123. <https://doi.org/10.1029/2021EF002123>
- Paffetti D., Travaglini D., Buonamici A., Nocentini S., Vendramin G.G., Giannini R., Vettori C., 2012 - *The influence of forest management on beech (Fagus sylvatica L.) stand structure and genetic diversity*. Forest Ecology and Management, 284: 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.026>
- Paoletti E., Alivernini A., Anav A., Badea O., Chivu-lescu S., Conte A., Carrari E., Ciriani M.L., Dalstein-Richier L., De Marco A., Fares S., Fasano G., Giovannelli A., Lazzara M., Leca S., Materassi A., Moretti V., Pitar-Silaghi D., Popa I., Sabatini F., Salvati L., Sicard P., Sorgi T., Hoshika Y., 2019 - *Toward stomatal-flux based forest protection against ozone: the MOTTLES approach*. Science of the Total Environment, 691: 516-527. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.525>
- Payn T., Carnus J.M., Freer-Smith P., Kimberley M., Kolbert W., Liu S., Orazio C., Rodriguez L., Silva L.N., Wingfield M.J., 2015 - *Changes in planted forests and future global implications*. For. Ecol. Manag., 352: 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.021>
- Rantala S., Swallow B., Paloniemi R., Raitanen E., 2020 - *Governance of forests and governance of forest information: Interlinkages in the age of open and digital data*. Forest Policy and Economics, 113, 102123. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102123>
- Reddy C.S., Athira K., Mudalkar S., 2025 - *Evolution of Global Biodiversity Monitoring: Innovations, Modern Approaches and Integration with Essential Variables*. Journal of the Indian Society of Remote Sensing. <https://doi.org/10.1007/s12524-025-02211-1>
- Samson R., Moretti M., Amorim J.U., Branquinho C., Fares S., Morelli F., Niinemets U., Paoletti E., Pinho P., Sgrigna G., Stojanovski V., Tiwary A., Sicard P., Calfapietra C., 2019 - *Towards an integrative approach to evaluate the environmental ecosystem services provided by urban forests*. Journal of Forestry Research, 30: 1981-1996.
- Sang, Y., Long, Z., Dan, X. *et al.*, 2022 - *Genomic insights into local adaptation and future climate-induced vulnerability of a keystone forest tree in East Asia*. Nature Communication, 13, 6541. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34206-8>
- Seddon N., Chausson A., Berry P., Girardin C.A.J., Smith A., Turner B., 2020 - *Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges*. Phil. Trans. R. Soc. B, 375:, 20190120. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2019.0120>
- Sferlazza S., Londi G., La Mela Veca D.S., Maetzke F.G., Vinciguerra S., Spampinato G., 2023 - *Close-to-Nature Silviculture to maintain a relict population of white oak on Etna volcano (Sicily, Italy): Prelimi-*

- nary results of a peculiar case study. *Plants*, 12 (10): 2053. <https://doi.org/10.3390/plants12102053>
- Sheban K.C., Kuebbing S.E., Duguid M.C. *et al.*, 2025 - *Keeping forests on the agroforestry agenda*. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02344-8>
- Shukla P.R., Skeg J., Buendia E.C., Masson-Delmotte V., Pörtner H.O., Roberts D.C., Zhai P., Slade R., Connors S., Van Diemen S. *et al.*, 2019 - *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/srccl/https://www.ipcc.ch/srccl/>
- Slippers B., Hurley B.P., Allison J.D., 2020 - *Harnessing the potential of Precision Pest Management in plantation forests*. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 82: 197-201.
- Soto I., Courtois P., Pili A., Tordoni E., Manfrini E., Angulo E., Bellard C., Briski E., Buric M., Cuthbert R.N., Kouba A., Kouranditou M., Macedo R.L., Leroy B., Haubrock P.J., Courchamp F., Leung B., 2025 - *Using species ranges and macroeconomic data to fill the gap in costs of biological invasions*. *Nature Ecology & Evolution*, 9: 1021-1030. <https://doi.org/10.1038/s41559-025-02697-5>
- Spohn M., Bagchi S., Biederman L.A., Borer E.T., Bråthen K.A., Bugalho M.N., Caldeira M.C., Catford J.A., Collins S.L., Eisenhauer N., Hagenah N., Haider S., Hautier Y., Knops J.M.H., Koerner S.E., Laanisto L., Lekberg Y., Martina J.P., Martinson, H., McCulley R.L., Peri P.L., Macek P., Power S.A., Risch A.C., Roscher C., Seabloom E.W., Stevens C., Veen G.F. (Ciska), Virtanen R., Yahdjian L., 2023 - *The positive effect of plant diversity on soil carbon depends on climate*. *Nature Communication*, 14, 6624.
- Springgay E., Ramirez S.C., Janzen S., Brito V.V., 2019 - *The forest-water nexus: An international perspective*. *Forests*, 10 (10), 915. <https://doi.org/10.3390/f10100915>
- Stockholm declaration, 2024 - *Stockholm congress declaration*. <https://www.iufro.org/media/fileadmin/events/iwc24/iwc24-Stockholm-Congress-Statement-en.pdf>
- Tonouéwa J.F.M.F., Biaou S.S.H., Assédé E.S.P., Agossou H., Balagueman R.O., 2024 - *Timber traceability, determining effective methods to combat illegal logging in Africa: A review*. *Trees, Forests and People*, 18, 100709. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100709>
- UN DESA, 2019 - *Global Forest Goals and Targets of the UN Strategic Plan for Forests 2030*. <https://www.un.org/esa/forests/wp-content/uploads/2019/04/Global-Forest-Goals-booklet-Apr-2019.pdf>
- Vacek Z., Vacek S., Cukor J., 2023 - *European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies*. *Journal of Environmental Management*, 332, 117353. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117353>
- Vanermen I., Muys B., Verheyen K., Vanwindekens F., Bouriaud L., Kardol P., Vranken L., 2020 - *What do scientists and managers know about soil biodiversity? Comparative knowledge mapping for sustainable forest management*. *Forest Policy and Economics*, 119, 102264. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102264>
- Vicente-Serrano S.M., Quiring S.M., Peña-Gallardo M., Yuan S., Domínguez-Castro F., 2020 - *A review of environmental droughts: Increased risk under global warming?* *Earth-Science Reviews*, 201, 102953. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102953>
- Wang C., Zhang W., Li X., Wu J., 2022 - *A global meta-analysis of the impacts of tree plantations on biodiversity*. *Global Ecology and Biogeography* 31, 576-587. <https://doi.org/10.1111/geb.13440>
- Wang L., Wei F., Tagesson T., Fang Z., Svenning J.-C., 2025 - *Transforming forest management through rewilding: Enhancing biodiversity, resilience, and biosphere sustainability under global change*. *One Earth*, 8 (3), 101195. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101195>
- Warman R., Lawson S., Glen M., Beazley H., Healey M., 2025 - *Biosecurity problem representation(s) by tree and forest health actors in Southeast Asia*. *Forest Policy and Economics*, 177, 103509. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2025.103509>
- Weiskopf S.R., Lerman S.B., Isbell F., Lyn Morelli T., 2024 - *Biodiversity promotes urban ecosystem functioning*. *Ecography*, 9, e07366. <https://doi.org/10.1111/ecog.07366>
- Yin H., McDuffie E.E., Martin R.V., Brauer M., 2024 - *Global health costs of ambient PM2.5 from combustion sources: a modelling study supporting air pollution control strategies*. *The Lancet Planetary Health*, 8 (7), e476-e488. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(24\)00098-6](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00098-6)
- Yousefpour R., 2025 - *Climate-smart forestry-potential and practicalities*. *Climate Change Reviews: 2022-2024*: 400-403.