

Foreste digitali: innovazioni e opportunità

Piermaria Corona ⁽¹⁾,
Corrado Costa ⁽²⁾,
Roberto Barbetti ⁽³⁾,
Sara Bergante ⁽³⁾,
Lorenzo Cesaretti ⁽¹⁻⁷⁾,
Pier Mario Chiarabaglio ⁽³⁾,
Gherardo Chirici ⁽⁴⁾,
Francesca Giannetti ⁽⁴⁾,
Carlotta Ferrara ⁽⁵⁾,
Massimo Gennaro ⁽³⁾,
Matteo Guasti ⁽¹⁾,
Andrea Laschi ⁽⁶⁾,
Barbara Mariotti ⁽⁴⁾,
Elena Marra ⁽⁴⁾,
Walter Mattioli ⁽⁵⁾,
Nicola Puletti ⁽¹⁾,
Enrico Marchi ⁽⁴⁾

Digital Forests: innovations and opportunities

The forestry sector in Italy is facing issues related to the need to make the most of environmental, territorial and socio-economic opportunities. The research is called upon to translate technological advances into practical applications, even in the field of geomatics and information and communication technologies. The exploitation of precision technologies can foster innovation and the improvement of management processes as well as the development of new products useful for forest owners, entrepreneurs, forest technicians and citizens, with benefits for the quality of forest production, the reduction of production costs and the reduction of environmental and social impacts. This note provides a brief overview of precision technologies applied to forest farm-scale monitoring, silviculture management, logging, poplar farming, forest nursery and forest product traceability.

Keywords: Precision Forestry, Forest Geomatics, Information And Communication Technologies

Introduzione

In Italia il settore forestale si trova ad affrontare problematiche in ampia misura connesse alla necessità di valorizzare in maniera più efficace le potenzialità e le opportunità in termini di salvaguardia ambientale, presidio del territorio e sviluppo socioeconomico e occupazionale. In questo quadro, la ricerca ha raccolto la sfida di tradurre i risultati degli avanzamenti metodologici e tecnologici in applicazioni operative.

Un particolare ambito riguarda l'implementazione e integrazione delle tecnologie geomatiche e di quelle dell'informazione e della comunicazione (ICT), che si traduce nell'applicazione di quella che viene definita "selvicoltura

di precisione" o *precision forestry* (Lubello & Cavalli 2006, Corona et al. 2017, 2018, Corona 2022). Queste tecnologie possono svolgere un ruolo significativo per l'innovazione e l'efficientamento dei processi gestionali e la creazione di nuovi prodotti e utilità a sostegno dei proprietari di boschi e piantagioni da legno, imprenditori, tecnici forestali e cittadini. La presente nota ne offre una sintetica panoramica, con riferimento al monitoraggio a scala aziendale, alla gestione selvicolturale, alle utilizzazioni forestali, alla pioppicoltura, al vivaismo e alla tracciabilità dei prodotti forestali.

Monitoraggio a scala aziendale

Per il monitoraggio dendrometrico sono oggi disponibili strumenti digitali che permettono l'acquisizione e archiviazione automatica dei dati, come ipsometri laser o ad ultrasuoni in grado di misurare le altezze e di trasmettere le informazioni direttamente al cavalletto elettronico (ad esempio: <https://haglofsweden.com/project/md-ii-caliper>) o strumenti integrati (ad esempio: Mobileforester, <http://www.mobileforester.com/>). Sono state anche sviluppate numerose App per smartphone (ad esempio: App MOTI, <http://www.moti.ch/drupal/?q=it>; App Arboreal, <https://play.google.com/store/apps/details?id=se.arboreal.height&hl=en&gl=US>) che permettono di acquisire misure dendrometriche sfruttando i giroscopi, le camere e i GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*, sistemi di posizionamento satellitare globale) presenti in questi telefoni cellulari di ultima generazione.

Più sofisticato è l'impiego del *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), in modalità fissa o mobile, che può fornire informazioni dettagliate (con precisione centimetrica e subcentimetrica) e 3D sulla posizione, dimensione e forma dei fusti arborei, nonché dati sulla struttura dell'intero popolamento forestale (Puletti et al. 2021a, Ferrara et al. 2023) (Fig. 1). A tale scopo sono stati sviluppati algoritmi *open access* che, con un alto livello di automazione, sono in grado di estrarre dai dati TLS attributi dell'albero o del popolamento forestale (Puletti et al. 2021b). Gli strumenti TLS

□ (1) CREA, Centro di ricerca Foreste e Legno, I-52100 Arezzo (Italy); (2) CREA, Centro di ricerca Ingegneria e Trasformazioni agroalimentari, I-00015 Monterotondo, RM (Italy); (3) CREA, Centro di ricerca Foreste e Legno, I-15033 Casale Monferrato, AL (Italy); (4) Università degli Studi Firenze, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali - DAGRI, I-50145 Firenze (Italy); (5) CREA, Centro di ricerca Foreste e Legno, IT-00166 Roma (Italy); (6) Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali - SAAF, I-90133 Palermo (Italy); (7) Università La Sapienza di Roma, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - DICEA, I-00185 Roma (Italy)

@ Lorenzo Cesaretti (lorenzo.cesaretti@crea.gov.it)

Ricevuto: Mar 24, 2023 - Accettato: Apr 03, 2023

Citazione: Corona P, Costa C, Barbetti R, Bergante S, Cesaretti L, Chiarabaglio PM, Chirici G, Giannetti F, Ferrara C, Gennaro M, Guasti M, Laschi A, Mariotti B, Marra E, Mattioli W, Puletti N, Marchi E (2023). Foreste digitali: innovazioni e opportunità. *Forest@* 20: 52-60. - doi: 10.3832/efor4353-020 [online 2023-04-17]

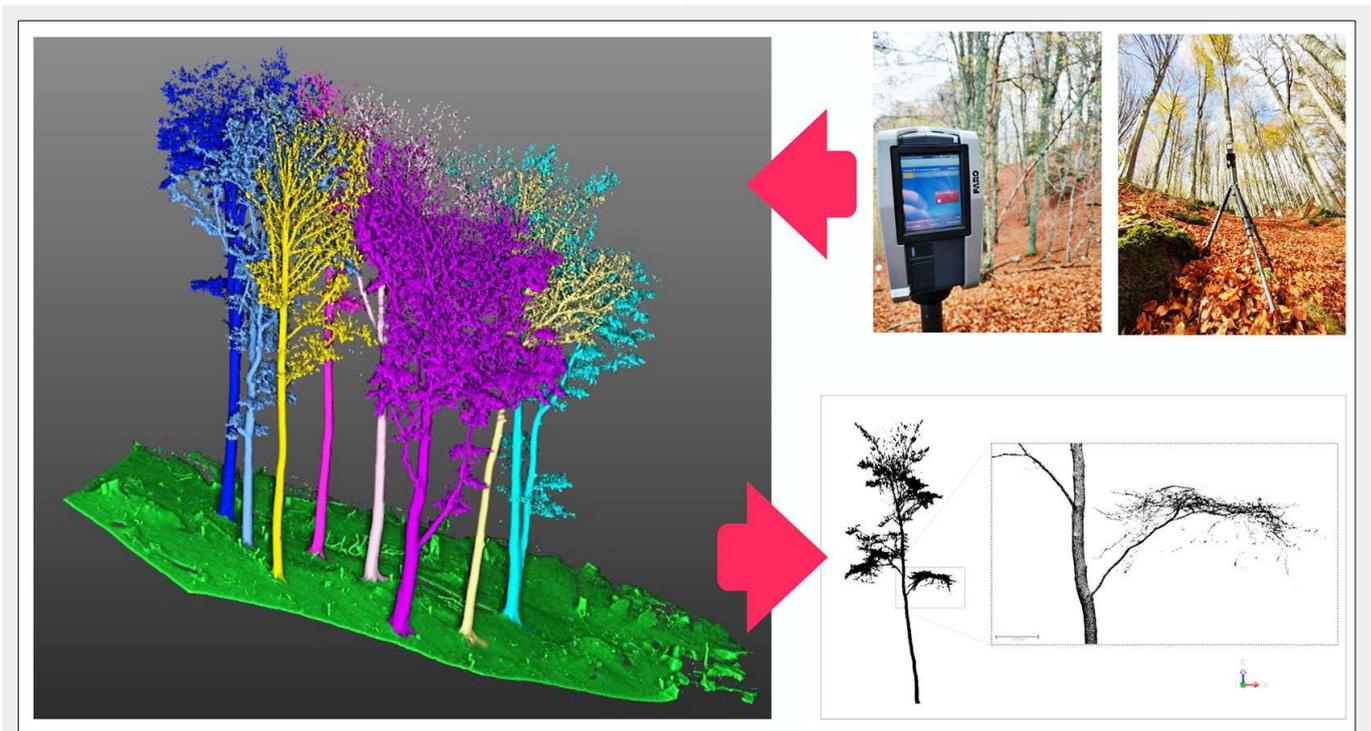


Fig. 1 - Acquisizione con Terrestrial Laser Scanning: nuvola di punti 3D di un soprassuolo forestale e di un singolo albero (immagini: N. Puletti, M. Guasti).

sono ancora relativamente costosi ma il loro valore aggiunto risiede nella capacità di ottenere informazioni di dettaglio che possono essere agevolmente riprese in tempi successivi per la quantificazione di attributi strutturali anche inizialmente non considerati (cosiddetta “monumentalizzazione delle aree di rilevamento”): questa metodologia di lavoro può consentire di creare modelli tridimensionali in cui sono raccolte le informazioni necessarie per estrarre metriche e fare misurazioni utili al tempo zero, ma anche di immagazzinare immagini su cui successivamente tornare per comparazioni o nuove misure di parametri non considerati in precedenza. La possibilità, inoltre, di ottenere misure georiferite dei singoli alberi permette una più semplice connessione con i dati telerilevati ottenuti da sensori remoti, facilitando le procedure di integrazione e scalarità tra le varie fonti di informazione.

L'impiego dei droni, in grado di eseguire voli automatici grazie ai sistemi di navigazione satellitari e all'intelligenza artificiale e dotati in genere di fotocamere in grado di acquisire immagini con risoluzione a terra centimetrica (3-10 cm), può fornire informazioni dettagliate e accurate in modo rapido ed efficiente, ad esempio sulla copertura arborea, la densità degli alberi, la distribuzione delle specie e il loro stato di salute, anche in aree difficilmente accessibili. Inoltre, i droni dotati di sensori Lidar (*Light Detection and Ranging*) possono generare modelli 3D della vegetazione e consentono di effettuare un'analisi dettagliata della struttura del bosco o della piantagione, come ad esempio la quantità di biomassa e la distribuzione delle specie (Chirici et al. 2016, Giannetti et al. 2017, Barzagli et al. 2018, Pecchi et al. 2019, D'Amico et al. 2021, Puletti et al. 2021c). Con l'avvento della fotogrammetria digitale è anche possibile elaborare le immagini ottiche e derivare informazioni sulla superficie forestale 2D (ortofoto) e 3D (nuvole di punti fotogrammetriche e DSM) utili per stimare, predire e mappare molti indicatori di gestione forestale (Giannetti et al. 2018, 2020, Barzagli et al. 2018).

Gestione selvicolturale

Anche nel nostro Paese sono state avviate sperimentazioni operative di sistemi che permettono di integrare le banche dati raccolte nelle fasi di monitoraggio della foresta a fini selvicolturali con la registrazione digitale e georiferita delle operazioni realizzate. Nell'ambito del progetto Agridigit (<https://www.progettoagridigit.it/>) è stata sviluppata una web-App che consente di integrare vari strati informativi raccolti con sistemi digitali basati su radiofrequenza o QRcode, permettendo una tracciabilità completa dei singoli prodotti legnosi, dalla martellata alle successive fasi di taglio, esbosco, trasporto, e trasformazione. La web-App è predisposta per l'inserimento dati tramite dettatura vocale, anche in associazione a un cavalletto elettronico che registra i dati e li trasmette tramite connessione *bluetooth*. La web-App sviluppata è stata pensata per un utilizzo nell'ambito delle operazioni di martellata forestale: l'utente può gestire più operazioni di martellata, chiamate genericamente rilievi, ed in ciascuna di esse può inserire una lista di alberi specificando le caratteristiche principali quali specie e diametro; l'applicativo è in grado di ricevere dati da dispositivi connessi secondo protocollo BLE (*Bluetooth Low Emission*); in particolare, è implementata la lettura attraverso protocollo BLE del diametro mediante il cavalletto elettronico *open-source* sviluppato dal CREA (Ortenzi et al. 2021).

Inoltre, si stanno progressivamente sviluppando sistemi informatici in grado di supportare le decisioni operative (DSS) dei gestori dei boschi e delle piantagioni da legno. Questi DSS si basano su sistemi esperti e basati sulla conoscenza, tecniche multicriterio, nonché strumenti di comunicazione e visualizzazione, e consentono attraverso semplici interfacce di estrarre informazioni e proporre decisioni di dettaglio a scala di azienda e di singola particella. Esempi di DSS per la gestione selvicolturale sono: B-FOREST (<https://www.bforest.it/>), che consente di importare e/o disegnare gli interventi selvicolturali e automaticamente di aggiornare le mappe degli indicatori di gestio-

ne forestale sostenibile e i dati sulla singola particella; GO-SURF (<https://www.go-surf.it/piattaforma-dss.html>), sviluppato come *web-gis-suite* per valutare l'accessibilità delle superfici forestali e le aree tecnicamente esboscabili; mappare la produzione legnosa dei soprassuoli forestali, sia in termini di provvigione legnosa che di biomassa epigea (peso secco e peso fresco), sia effettiva che potenzialmente ritraibile (al netto di impedimenti fisiografici o normativi) e valutare la possibile destinazione d'uso del materiale legnoso presente nell'area di interesse; PRI.FOR.MAN (<http://212.237.26.38:8080/priforman/login>), sviluppato per le zone montane del Friuli-Venezia Giulia, che permette di estrarre informazioni relative a volume legnoso, incremento corrente di volume legnoso e accessibilità; DSS r.forcircular (<https://www.dendronatura.net/progetti-1/progetto-for-circular/>), progettato per migliorare la performance della filiera foresta-legno in una prospettiva di bioeconomia circolare, analizzando e misurando il livello di sostenibilità della filiera; CFOR (<https://www.smart-forest.it/cfor/>), sviluppato in Calabria con le finalità di integrare informazioni da inventariazione continua di variabili dendrometriche e mappatura delle risorse forestali al fine di definire opzioni di gestione forestale multifunzionale (Fig. 2).

Utilizzazioni forestali

Uno specifico campo di applicazione della *precision forestry* è la cosiddetta *precision harvesting*, nell'ambito della quale geomatica e ICT trovano impiego, ad esempio, per risolvere problematiche relative alla produttività delle macchine operatrici, alla sicurezza degli operatori, alla riduzione e mitigazione degli impatti e alla formazione degli operatori.

Pianificazione e progettazione

La gestione delle utilizzazioni forestali e la loro sostenibilità si basano sulla disponibilità di una rete viabile forestale adeguata alle esigenze e agli obiettivi gestionali, così come definita dall'art. 3, comma 2, lettera f del decreto legislativo 34/2018 e dal decreto interministeriale n. 563734 del 28 ottobre 2021. I DSS sviluppati in questa prospettiva supportano le azioni di monitoraggio, pianificazione e gestione della viabilità forestale, consentendo l'ottimizzazione delle funzioni che le sono riconosciute nei diversi contesti e di ridurre i potenziali impatti e di limitare la superficie forestale perturbata durante le operazioni di raccolta del legno (Labelle et al. 2022).

I sistemi tradizionali di rilievo della viabilità forestale,

onerosi, con un grado di precisione limitato e generalmente caratterizzati da un livello informativo ridotto, possono essere sostituiti da sistemi più efficienti che utilizzano database collegati a cartografia digitale, anche con l'introduzione del *laser scanning* per la mappatura dei tracciati e delle strade forestali. I moderni sistemi GNSS permettono di organizzare, archiviare e visualizzare i dati di interesse, anche sotto forma di sistemi di navigazione su smartphone e tablet (Laschi et al. 2019), oltre a garantire il facile e rapido aggiornamento degli stessi (ad esempio, FORCIP+, <http://www.forcip.eu/action/ict-applications>).

La definizione del sistema di utilizzazione forestale più idoneo rientra nel campo di applicazione dell'MCDA (*Multi-Criteria Decision Analysis*). Le procedure più impiegate nel nostro Paese si focalizzano sulla scelta del sistema di esbosco, dal momento che nel contesto italiano le operazioni di abbattimento ed allestimento avvengono per la stragrande maggioranza in maniera semi-meccanica mediante l'utilizzo della motosega, e si basano sulla integrazione tra ambiente GIS e la teoria AHP (*Analytic Hierarchy Process* – Picchio et al. 2019, Laschi et al. 2016).

Con riguardo alla organizzazione dei cantieri forestali sono disponibili *web-App* e *software* utili a stimare i consumi, i costi e le emissioni per diverse tecnologie di utilizzazione forestale in funzione delle caratteristiche del sito (ad esempio, <https://agroener.crea.gov.it/modello/formEF.html> – Fig. 5) e sistemi per fornire informazioni sulla percorribilità dell'area con mezzi forestali (ad esempio: T4E Mapping, <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.latschbacher.t4emappingapp&hl=it&gl=US>; o Meteoblu, https://www.meteoblu.com/en/blog/article/show/34885_Soil+Trafficability++).

Per la progettazione e realizzazione degli interventi è comunque necessario tener conto che in Italia le imprese forestali sono spesso ditte locali medio-piccole con un livello di meccanizzazione basso o intermedio, in genere ricadenti nell'ambito della *small-scale forestry*: opzioni operative efficaci possono essere basate sull'utilizzo di *smartphone* con tecnologia GPS/GNSS, ad esempio per analizzare la produttività di lavoro, tracciare i prodotti forestali, gestire i dati sui prelievi legnosi e per il *geofencing* (individuazione dei confini dell'area da utilizzare), nonché per condividere la posizione degli operatori in cantiere (varie *App*: Avenza Maps, LocusMap, OruxMaps, ecc.).

Macchine operatrici

La crescente diffusione di macchine abbattitrici/allestitrici in grado di raccogliere informazioni sul lavoro svolto

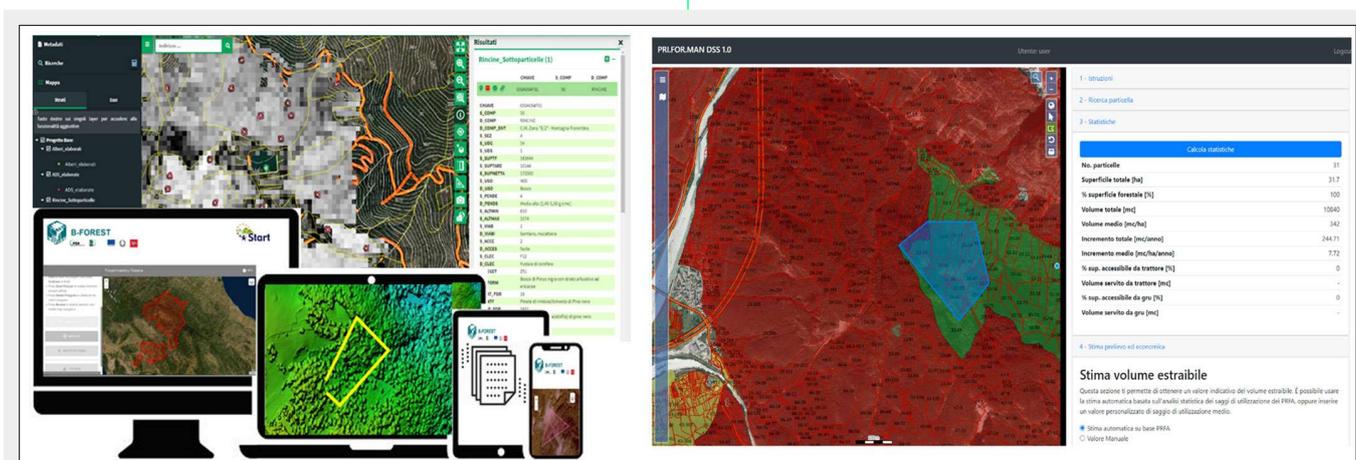


Fig. 2 - Esempi di interfaccia di DSS (immagini: F. Giannetti, G. Alberti e L. Cadez): a sinistra B-FOREST (<https://www.bforest.it/>); a destra PRI.FOR.MAN (<https://www.legnoservizi.it/pri-for-man-dss-un-sistema-di-supporto-delle-decisioni-forestali-a-scala-locale/>).

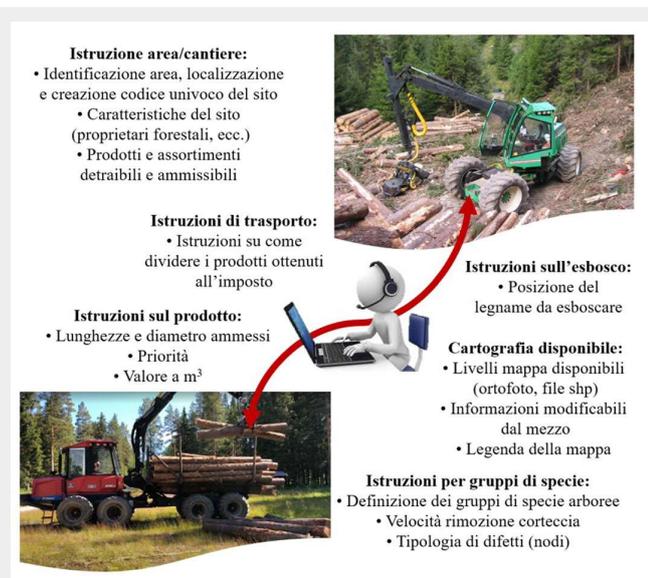


Fig. 3 - Rappresentazione schematica delle comunicazioni tra macchine operatrici combinate e tra macchine e responsabile dei cantieri di utilizzazione forestale (immagine: E. Marra). L'uso delle macchine operatrici combinate (*harvester* e *forwarder*) ha ricevuto un forte impulso a seguito della tempesta Vaia: la loro potenzialità nella raccolta, gestione e trasferimento di dati per l'ottimizzazione dei processi è però ancora poco sfruttata.

permette di ottenere informazioni dettagliate sui materiali lavorati, suddivisi per specie, qualità e assortimento legnoso, e su altri dati inerenti al funzionamento delle macchine stesse. L'utilizzo di tecnologie avanzate di comunicazione e sensori per lo scambio di dati tra macchine, attrezzature e operatori, nonché per l'assistenza a distanza e l'ottimizzazione delle prestazioni, è in ulteriore diffusione anche su altre tecnologie utilizzate nel settore delle utilizzazioni forestali (Fig. 3, Fig. 4).

La raccolta di dati, che possono essere trasmessi a distanza in tempo reale o in post-processamento, consente il monitoraggio delle attività svolte e la loro integrazione con informazioni rilevate a terra o già disponibili geo-referenziate (ad esempio: carte della viabilità, mappe del volume legnoso) al fine di ottimizzare il lavoro nelle fasi successive e nel suo complesso (ad esempio: TimberMatic Maps, <https://www.deere.co.uk/en/forestry/timbermatic-manager/>; MaxiXT: <https://www.komatsuforest.com/forest-machines/control-and-information-systems>).

Allestimento del legname

Nell'allestimento del legname l'impiego di apposite App (ad esempio: T4E Bucking, <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.latschbacher.buckingapp&hl=it&gl=US>) consente di individuare le misure ottimali degli assortimenti in relazione alla morfologia del fusto, alla lunghezza minima del toppe e alla presenza di alcune tipologie di difetti (nodi, cretti, ecc.).

La misurazione del legname allestito è poi un passo fondamentale. All'uopo sono state sviluppate App per misurare le dimensioni di singoli tronchi e di intere cataste (ad esempio: App Timbereter, https://play.google.com/store/apps/details?id=ee.timberdiameter&hl=en_GB&gl=US; App Timberlog, <https://www.androidfreeware.net/it/download-timber-volume-calculator-timber-volume-calculator.html>; App Timberer, https://play.google.com/store/apps/details?id=ee.timberdiameter&hl=en_GB&gl=US; App iFOVEA, <https://www.fovea.eu/index.php>).

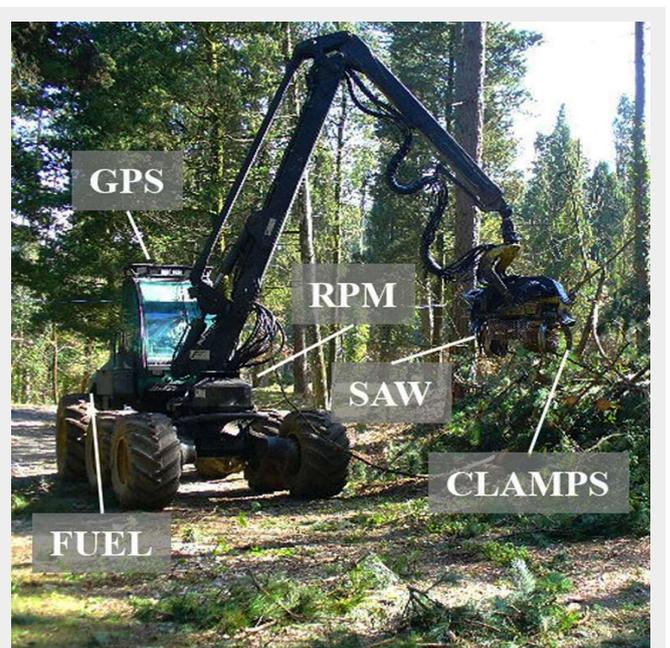


Fig. 4 - Esempi di sensori applicati a un mezzo forestale. Il computer di bordo permette all'operatore di ricevere informazioni sia sul funzionamento della macchina sia sulle sue prestazioni produttive (SAW - sega, CLAMPS - pinze, FUEL - carburante, RPM - giri al minuto, GPS - global positioning system) (immagine: E. Marra).

Sicurezza degli operatori forestali

Oltre alle tecniche di *geofencing* per condividere la posizione degli operatori in cantiere esistono vari dispositivi (ad esempio, *smartwatch*) e si stanno sviluppando veri e propri indumenti che consentono un monitoraggio continuo dello stato di salute del singolo operatore.

Recentemente sono state, inoltre, sviluppate esperienze di didattica immersiva, basata su applicazioni di realtà virtuale applicate nel settore della formazione degli operatori per le utilizzazioni forestali (ad esempio: <https://www.cm-labs.com/immersive-simulation-products/forestry-equipment-training-simulators/harvester/>): questo approccio consente di svolgere, in particolare nelle fasi iniziali, le attività di formazione in ambiente sicuro e con una maggiore attenzione ai dettagli che spesso non possono essere apprezzate nella formazione in campo per la necessità di mantenere adeguate distanze di sicurezza (Fig. 6).

Pioppicoltura di precisione

L'impiego delle tecnologie di precisione può essere di significativo supporto per il miglioramento qualitativo e quantitativo delle produzioni e di metodi culturali sostenibili in pioppicoltura, settore trainante dell'industria del legno nel nostro Paese.

Sono a disposizione tecnologie per eseguire il corretto livellamento dei terreni di impianto che tramite una lama di adeguata robustezza asportano il terreno in eccesso e lo depositano dove manca rispetto ad un piano di riferimento. Sono disponibili sistemi a controllo elettronico che utilizzano impianti idraulici sulla base di segnali provenienti da emettitori e ricevitori laser. Il laser è la parte tecnologicamente più innovativa dell'attrezzatura: si compone di emettitore, ricevitore e *control box* che gestisce l'impianto idraulico della lama (Paudel et al. 2023).

La tracciatura dello schema di impianto (identificazione della posizione delle buche che ospitano gli alberi) può essere condotta mediante sistemi a controllo elettronico tramite sistemi satellitari di posizionamento applicati a

Fig. 5 - Varie sono le *smartphone* App per raccogliere dati dendrometrici e ottimizzare le attività di gestione forestale. A sinistra *web app* sviluppata per la previsione di stima dei consumi, dei costi e delle emissioni per le attività di ettaro-coltura (immagine: C. Costa). A destra *screenshot* dell'App MOTI che consente di effettuare misure dendrometriche, supportare la navigazione GPS, applicare modelli dendroauxometrici, ecc.

Progetto AGROENER
Modello previsionale per la stima dei consumi, dei costi e delle emissioni per le attività di lavoro in ettaro-coltura forestale.

Step 1: Dataset
Tipologia: abbattimento, abbattimento e allestimento, allestimento

Step 2: Dati Agronomici
OPERAZIONE
• Abbattimento
• Abbattimento e allestimento
• Allestimento
GOVERNO
• Ceduo
• Fustaia di transizione
• Fustaia
SPECIE
• Castoreo
• Misto
• Latifoglie
TRATTAMENTO
• Avviamento all'alto fusto
• Diradamento
• Taglio a raso
• Diradamento selettivo
• Conversione a fustaia
DBH medio (cm): 0,00
Volume Pianta (m³): 0,00

Step 3: Dati Meccanici
Macchina
• Felle-buncher & processore
• Harvester
• Motosega
Potenza del motore (kW): 00,00
Carburante: Miscela

Step 4: Dati Economici
Costo d'acquisto della macchina (€): 00,00
CALCOLA

Step 1: Dataset
Tipologia: eobosco

Step 2: Dati Agronomici
GOVERNO
• Ceduo
• Fustaia di transizione
• Fustaia
SPECIE
• Castoreo
• Misto
• Latifoglie
TRATTAMENTO
• Avviamento all'alto fusto
• Diradamento
• Taglio a raso
• Diradamento selettivo
DBH medio (cm): 0,00
Volume Pianta (m³): 0,00
Distanza Eobosco (m): 0

Step 3: Dati Meccanici
Macchina
• Forwarder
• Skidder
• Gru a cavo
• Trattore, cingolato, rimorchio, verricello, gabbio, piza
Potenza del motore (kW): 00,00

Step 4: Dati Economici
Costo d'acquisto della macchina (€): 00,00
CALCOLA

MOTI
13:56 53%
Strumento di misura
Area b... Numer... Altezz... Provv...
0 m²/ha 0 -/ha 0 m 0 m³/ha
Inventari
Area campione
Inventari del popolamento
Inventari locali

trattrice e trivella. Questi sistemi, oltre a rendere più agevoli e veloci le operazioni di posizionamento e apertura delle buche, aumentano la precisione di posizionamento degli alberi e permettono di ottimizzare lo sfruttamento della superficie di impianto, soprattutto se di forma irregolare (Beyaz & Gerdan 2019).

Migliorie di precisione per i trattamenti fitosanitari possono essere adottate con accorgimenti in uso in altre colture, come l'irrorazione con ausilio di fotocellule per confinare il principio attivo ai soli fusti senza sprechi negli spazi interfila o la somministrazione di principi attivi sistemici disciolti nell'acqua avvalendosi di impianti di irrigazione a goccia (Manda et al. 2021).

Un avanzamento significativo per una difesa di precisione può, inoltre, essere ottenuto con la introduzione di

tecnologie attinenti agli *Early Warning Systems* (EWS), cioè sistemi di rilievo precoce delle avversità; ciò consente sia migliorie in prospettiva di una efficace difesa integrata da patogeni e infestanti, attraverso la conseguente ridotta necessità di trattamenti chimici, sia una diminuzione dei costi assicurativi per i coltivatori in virtù dell'associata riduzione del rischio. In particolare, l'attenzione è diretta verso *satellite-remote sensing*, *proximal-remote sensing* (telerilevamento con droni opportunamente attrezzati) e *proximal sensing* (strumenti di rilievo sotto chioma – Fig. 7). Nelle prime due metodiche menzionate si punta in particolare su rilevazione di parametri di rilievo precoce di stress idrico, nella terza su strumenti e sistemi di individuazione precoce di patogeni o insetti infestanti (ad esempio spettrometri portatili, sistemi di amplificazione

Fig. 6 - La didattica immersiva nel settore forestale sviluppata attraverso sistemi di realtà virtuale è stata sperimentata e utilizzata anche in Italia: essa consente di formare operatori e tecnici simulando condizioni di lavoro anche molto complesse e potenzialmente rischiose (immagine: F. Fabiano).





Fig. 7 - Immagine acquisita da drone su vivaio di pioppo (immagine: P.M. Chiarabaglio).

veloce in campo di materiale genetico, trappole a feromoni per monitoraggio precoce).

Su base estensiva, si vanno, infine, diffondendo in pioppicoltura le applicazioni basate su approcci a rateo variabile (*Variable Rate Treatments*, VRT) che, tramite telerilevamento, consentono di quantificare con precisione la risposta agli *input* esterni in termini di acque di irrigazione, così come di fertilizzanti o erbicidi. In particolare, gli impianti di irrigazione a goccia permettono un elevato controllo delle quantità di acqua da fornire e permettono inoltre di inserire nutrienti (come anche prodotti sistemici) nel flusso irriguo. Se gestiti tramite elettrovalvole collegate a sensori prossimali in grado di misurare lo stato idrico delle piante oppure degli orizzonti suolo, questi impianti permettono di fornire quantità di acqua e nutrienti quando necessario (Chawade et al. 2019).

Vivaismo forestale

La filiera vivaistica forestale sta assumendo rinnovata importanza per le crescenti richieste di mercato legate ai programmi di forestazione e riforestazione per lotta ai cambiamenti climatici e progetti di recupero ambientale (Fig. 8).

Per il settore vivaistico sono state sviluppate tecnologie completamente automatizzate “*user friendly*” (*smart nurseries*) utilizzando sensori avanzati, immagini multispettrali a realtà aumentata (<https://plantvision.org/>), sistemi robotici (<http://octinion.com/products>; <https://www.ecoation.com>; <https://holspraying.com>; <https://patsdrones.com>), algoritmi per l’elaborazione dati e modelli a supporto delle decisioni (<https://www.biobestgroup.com/en/crop-scanner>), sia in ambiente protetto che in pieno campo. La piattaforma Nurset® (<https://nurset.it/>), ad esempio, consente un monitoraggio continuo del vivaio attraverso il controllo digitale in tempo reale dei consumi idrici della coltura sulla base di informazioni rilevate da sensori per l’umidità del suolo e di altri parametri ambientali. Peraltro, l’integrazione di queste tecnologie nei vivai specializzati per la produzione di piantine forestali è ancora ai primi passi nel nostro Paese.

Per quanto riguarda la tracciabilità delle piantine il CREA ha realizzato una App sperimentale che implementa un semplice sistema basato sulle tecnologie *blockchain*, denominata “Vivaio Forestale”, sviluppata in ambiente Android® utilizzando il sensore *Near Field Communication* (NFC) e il GPS dei dispositivi dello *smartphone*; la lettura



Fig. 8 - Vivaio di pioppo (immagine: P.M. Chiarabaglio).

Fig. 9 - Schematizzazione della filiera di tracciabilità digitale dei prodotti legnosi (immagine: C. Costa).



dei tag NFC avviene a contatto (prossimità) dell'antenna NFC dello *smartphone* al tag; il punto GPS viene registrato automaticamente se la soglia di precisione del segnale è inferiore a 10 m (Figorilli et al. 2021).

Presso il CREA è in corso la messa a punto di una piattaforma nazionale per la programmazione delle richieste di materiale e la fornitura di informazioni sulle disponibilità a breve e medio termine: questo tipo di realizzazione (portale *online open-access* dedicato alla vivaistica forestale) potrebbe anche supportare la tracciabilità del prodotto e la certificazione della filiera dalla raccolta di frutti e semi alla messa a dimora del materiale vivaistico, consentendo di ottemperare agli obblighi previsti dal decreto legislativo 386/2003 (Gazzetta Ufficiale 2004).

Tracciabilità dei prodotti legnosi

La tracciabilità dei prodotti rappresenta un aspetto cruciale nella gestione della filiera foresta-legno, anche in relazione al Regolamento UE n. 995/2010 (EUTR - Timber Regulation – Fig. 9). I sistemi di marcatura e tracciabilità si basano sull'applicazione di un codice univoco su ogni parte da identificare e sull'impiego di sistemi di lettura automatici installati in punti prefissati del processo produttivo.

Possono essere identificati due tipi di sistemi di marcatura e identificazione adatti alla filiera foresta-legno: i sistemi ottici, basati sulla lettura con sensori ottici di codici (Fig. 10) o direttamente delle caratteristiche degli assortimenti legnosi, e i sistemi elettronici, basati sulla trasmissione di dati tramite onde elettromagnetiche. Sono disponibili vari esempi di sistemi ottici ed elettronici per la tracciabilità, come la marcatura visiva con codici unici impresso direttamente sul legno, il *fingerprinting* basato sull'identificazione delle caratteristiche uniche di ogni tronco, e i sistemi di identificazione elettronici come RFID (*Radio Frequency Identification*) e NFC. In particolare, l'identificazione in radiofrequenza sembra molto promettente, considerando che i sistemi RFID consentono l'identificazione rapida, georiferita e ad alto contenuto informativo dei singoli elementi.

La piattaforma che integra le informazioni acquisite lungo la filiera e ne consente la fruizione ad ogni fase e ad ogni livello strutturato è definita *infotracing*. L'*infotracing* è la procedura che integra le informazioni legate al prodotto e alle fasi di trasformazione con quelle legate alla tracciabilità per consentirne la fruizione in ogni fase e livello della filiera è definita *infotracing*. Una delle tecnolo-

gie più sicure per garantire la tracciabilità informativa è la *blockchain*. Un sistema *blockchain* è un database distribuito di registrazioni, costituito da "blocchi" criptati di tutte le transazioni o eventi digitali che sono stati eseguiti e condivisi tra le parti partecipanti (Figorilli et al. 2018).

Conclusioni

Le foreste sono al centro dell'attenzione globale e l'introduzione delle tecnologie di precisione può contribuire in modo significativo all'innovazione e all'efficientamento dei processi di monitoraggio, gestione e valorizzazione. Esiste una vasta gamma di strumenti digitali, App per *smartphone*, droni, sistemi di supporto alle decisioni, macchine operatrici, sistemi di tracciabilità e altre tecnologie che consentono di monitorare, pianificare e gestire le risorse forestali in modo accurato ed efficiente, con importanti ricadute positive sulla qualità delle produzioni, sulla riduzione dei costi di gestione e sulla minimizzazione degli impatti ambientali e sociali.

Di fatto, l'impiego delle tecnologie di precisione può condurre a una significativa revisione delle modalità di gestione dei boschi e delle piantagioni da legno. L'integrazione di tecnologie consolidate (ad esempio, telerileva-



Fig. 10 - Esempio di codice QR per la tracciabilità di prodotti legnosi (immagine: C. Costa).

mento, sistemi informativi geografici) con quelle di più recente sviluppo (ad esempio, sistemi aerei a pilotaggio remoto, *web-GIS*, *smartphone* App, realtà aumentata e virtuale) apre concrete prospettive di valorizzazione per la filiera foresta-legno: l'opportunità di definire ed inserire, in un ampio e completo processo organizzativo, parametri quali, ad esempio, la posizione, la quantità, la qualità e le dimensioni del legname permette di fornire un quadro più esaustivo rispetto alle richieste di mercato, favorendo la valorizzazione del prodotto, la tracciabilità e la certificazione, oltre a poter contribuire alla salvaguardia della funzionalità ecologica dei boschi e delle piantagioni da legno. Un approccio integrato e connesso offre anche il vantaggio di poter adattare in corso d'opera gli interventi programmati, attraverso comunicazioni dirette tra proprietario/acquirente e operatori in bosco, favorendo la riduzione dei tempi necessari per la raccolta, il trasporto e lo stoccaggio dei materiali. Le prospettive in questo contesto promuovono, inoltre, la disponibilità distribuita e interattiva dell'informazione (*web* e *mobile GIS*) e una caratterizzazione quali-quantitativa delle risorse che supera l'informazione testuale e cartografica su area minima rappresentata (approccio tradizionale della pianificazione forestale) e adottano quella più innovativa "in continuo" (ad alta risoluzione spaziale) su ogni singolo punto del dominio territoriale considerato. La digitalizzazione è, inoltre, un elemento fondamentale per migliorare l'efficienza dei sistemi e ridurre gli impatti dei procedimenti amministrativi: la situazione italiana evidenzia l'esigenza di aumentare il grado e il livello di tale digitalizzazione, condividendo dati ed informazioni che possano essere aggregati, elaborati e resi disponibili per le decisioni a diverse scale territoriali (Carbone et al. 2023).

Infine, l'introduzione di tecnologie di precisione, auspicabilmente nell'ambito di veri e propri *knowledge and innovation systems* (<https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/tags/akis>), richiede un cambio di mentalità in un settore radicato nella tradizione come quello forestale. È, pertanto, necessario mettere in rete le competenze, favorendo il confronto tra i principali attori (ricerca, istituzioni pubbliche, proprietari forestali, professionisti, rappresentanze agricole, produttori dei mezzi tecnici, contoterzisti, ecc.), e promuovere una adeguata formazione per il rafforzamento delle abilità digitali degli operatori attuali e futuri (imprenditori, consulenti, studenti delle scuole professionali, secondarie e universitarie). Nella direzione prospettata, il CREA Foreste e Legno, nell'ambito delle attività previste dal programma della Rete Rurale Nazionale e in collaborazione con l'Accademia Italiana di Scienze Forestali, ha reso disponibili:

- una rassegna commentata dell'offerta metodologica e tecnologica relativa alla *precision forestry* (<https://www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/24330>);
- un *webinar* formativo, composto di 14 brevi lezioni, sulle applicazioni della *precision forestry* e sul loro potenziale di implementazione e sviluppo nel nostro Paese (<https://www.youtube.com/playlist?list=PLpsWhJw80jx8iHxp7f-xoaHIY1GhLXj9U3>).

Riconoscimenti

Lavoro svolto nell'ambito del programma Rete Rurale Nazionale 2014-2020 (Piano di azione biennale 2021-2022; scheda Foreste 22.2; autorità di gestione: Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali), con il contributo FEASR.

Tutti i link riportati nel testo sono stati verificati al 22 marzo 2023.

Bibliografia

Barzagli A, Nocentini S, Del Perugia B, Travaglini D, Giannetti F,

Zolli C, Carrara S, Nerli M, Rossi P, Barbati A, Ferrari B, Tomao A, Lasserre B, Santopoli G, Marchetti M, Balsi M, Chirici G (2018). L'utilizzo del telerilevamento a supporto della gestione forestale sostenibile. Primi risultati del progetto *Fresh Life Demonstrating Remote Sensing Integration in Sustainable Forest Management* (Life14_ENV/IT/000414). L'Italia Forestale e Montana 73: 169-194. - doi: [10.4129/ifm.2018.4.5.03](https://doi.org/10.4129/ifm.2018.4.5.03)

Beyaz A, Gerdan D (2019). Computer-aided stress analysis of a model of tractor mounted auger drill. *Agricultural Science Digest-A Research Journal* 39 (2): 90-95. - doi: [10.18805/ag-D-158](https://doi.org/10.18805/ag-D-158)

Carbone F, Alivernini A, Bascietto M, Oreti L, Barbarese F (2023). Quadro della digitalizzazione del sistema istituzionale forestale nazionale. Il punto al 2020. *Forest@* 20: 30-38. - doi: [10.3832/efor4265-020](https://doi.org/10.3832/efor4265-020)

Chawade A, Van Ham J, Blomquist H, Bagge O, Alexandersson E, Ortiz R (2019). High-throughput field-phenotyping tools for plant breeding and precision agriculture. *Agronomy* 9 (5): 258. - doi: [10.3390/agronomy9050258](https://doi.org/10.3390/agronomy9050258)

Chirici G, McRoberts RE, Fattorini L, Mura M, Marchetti M (2016). Comparing echo-based and canopy height model-based metrics for enhancing estimation of forest aboveground biomass in a model-assisted framework. *Remote Sensing of Environment* 174 (B4): 1-9. - doi: [10.1016/j.rse.2015.11.010](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.010)

Corona P, Chianucci F, Quatrini V, Civitarese V, Clementel F, Costa C, Floris A, Menesatti P, Puletti N, Sperandio G, Verani S, Turco R, Bernardini V, Plutino M, Scrinzi G (2017). Precision forestry: riferimenti concettuali, strumenti e prospettive di diffusione in Italia. *Forest@* 14: 1-21. - doi: [10.3832/efor2285-014](https://doi.org/10.3832/efor2285-014)

Corona P, Chianucci F, Grotti M, Quatrini V, Puletti N, Mattioli W (2018). Precision Forestry. *Agriregioneuropa* 14 (53): 35-41.

Corona P (2022). Prospettive e potenzialità della digitalizzazione del settore forestale in Italia. Rete Rurale Nazionale 2014-2020, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Roma. [ISBN 9788833852157]

D'Amico G, Vangi E, Francini S, Giannetti F, Nicolaci A, Travaglini D, Massai L, Giambastiani Y, Terranova C, Chirici G (2021). Are we ready for a national forest information system? State of the art of forest maps and airborne laser scanning data availability in Italy. *iForest* 14: 144-154. - doi: [10.3832/ifor3648-014](https://doi.org/10.3832/ifor3648-014)

Ferrara C, Puletti N, Guasti M, Scotti R (2023). Mapping understory vegetation density in Mediterranean forests: insights from airborne and terrestrial laser scanning integration. *Sensors* 23 (1): 511. - doi: [10.3390/s23010511](https://doi.org/10.3390/s23010511)

Figorilli S, Antonucci F, Costa C, Pallottino F, Raso L, Castiglione M, Pinci E, Del Vecchio D, Colle G, Proto AR, Sperandio G, Menesatti P (2018). A blockchain implementation prototype for the electronic open source traceability of wood along the whole supply chain. *Sensors*, 18: 3133. - doi: [10.3390/s18093133](https://doi.org/10.3390/s18093133)

Figorilli S, Bruzzese S, Proto AR, Costa C, Moscovini L, Blanc S, Brun F (2021). A Blockchain implemented App for forestry nursery management. In: Proceedings of the "2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry". Trento-Bolzano (Italy) 3-5 Nov 2021, pp. 396-400.

Gazzetta Ufficiale (2004). D. Lgs. 386/2003. Attuazione della direttiva 1999/105/CE relativa alla commercializzazione dei materiali forestali di moltiplicazione. GU n. 23 del 29-01-2004.

Giannetti F, Puletti N, Quatrini V, Travaglini D, Bottalico F, Corona P, Chirici G (2017). Integrating terrestrial and airborne laser scanning for the assessment of single tree attributes in Mediterranean forest stands. *European Journal of Remote Sensing* 51: 795-807. - doi: [10.1080/22797254.2018.1482733](https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1482733)

Giannetti F, Chirici G, Gobakken T, Travaglini D, Puliti S (2018). A new approach with DTM-independent metrics for forest growing stock prediction using UAV photogrammetric data. *Remote Sensing of Environment* 213 (1): 195-205. - doi: [10.1016/j.rse.2018.05.016](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.016)

Giannetti F, Puliti S, Puletti N, Travaglini D, Chirici G (2020). Modelling Forest structural indices in mixed temperate forests: comparison of UAV photogrammetric DTM-independent variables and ALS variables. *Ecological Indicators* 117: 106513. - doi:

- 10.1016/j.ecolind.2020.106513
- Labelle ER, Hansson L, Högbom L, Jourgholami M, Laschi A (2022). Strategies to mitigate the effects of soil physical disturbances caused by forest machinery: a comprehensive review. *Current Forestry Reports* 8 (1): 20-37. - doi: [10.1007/s40725-021-00155-6](https://doi.org/10.1007/s40725-021-00155-6)
- Laschi A, Foderi C, Fabiano F, Neri F, Cambi M, Mariotti B, Marchi E (2019). Forest road planning, construction and maintenance to improve forest fire fighting: a review. *Croatian Journal of Forest Engineering* 37 (2): 319-331. [online] URL: <http://hrcak.srce.hr/en/217411>
- Laschi A, Neri F, Brachetti Montorselli N, Marchi E (2016). A methodological approach exploiting modern techniques for forest road network planning. *Croatian Journal of Forest Engineering* 37 (2): 319-331. [online] URL: <http://hrcak.srce.hr/en/173832>
- Lubello C, Cavalli R (2006). Ambiti applicativi della Precision forestry. *Sherwood* 125: 11-16.
- Manda RR, Addanki VA, Srivastava S (2021). Role of drip irrigation in plant health management, its importance and maintenance. *Plant Archives* 21 (1): 1294-1302. - doi: [10.51470/PLANTARCHIVES.2021.v21.S1.204](https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2021.v21.S1.204)
- Ortenzi L, Colle G, Costa C, Moscovini L (2021). Italian speech commands for forestry applications. In: *Proceedings of the "2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry"*. Trento-Bolzano (Italy), 3-5 Nov 2021, pp. 401-405. - doi: [10.1109/MetroAgriFor52389.2021.9628756](https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor52389.2021.9628756)
- Paudel GP, Khanal AR, Krupnik TJ, McDonald AJ (2023). Smart precision agriculture but resource constrained farmers: is service provision a potential solution? Farmer's willingness to pay for laser-land leveling services in Nepal. *Smart Agricultural Technology* 3: 100084. - doi: [10.1016/j.atech.2022.100084](https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100084)
- Pecchi M, Marchi M, Burton V, Giannetti F, Moriondo M, Bernetti I, Bindi M, Chirici G (2019). Species distribution modelling to support forest management. A literature review. *Ecological Modelling* 411: 108817. - doi: [10.1016/j.ecolmodel.2019.108817](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108817)
- Picchio R, Proto AR, Civitaresse V, Di Marzio N, Latterini F (2019). Recent contributions of some fields of the electronics in development of forest operations technologies. *Electronics* 8: 1465. - doi: [10.3390/electronics8121465](https://doi.org/10.3390/electronics8121465)
- Puletti N, Grotti M, Ferrara C, Chianucci F (2021a). Influence of voxel size and point cloud density on crown cover estimation in poplar plantations using terrestrial laser scanning. *Annals of Silvicultural Research* 46: 148-154. - doi: [10.12899/asr-2256](https://doi.org/10.12899/asr-2256)
- Puletti N, Galluzzi M, Grotti M, Ferrara C (2021b). Characterizing subcanopy structure of Mediterranean forests by terrestrial laser scanning data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 24 (4): 100620. - doi: [10.1016/j.rsase.2021.100620](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100620)
- Puletti N, Castronuovo R, Ferrara C (2021c). crossing3dforest: an R package for evaluating empty space structure in forest ecosystems. *BioRxiv* 2023.02.01.526548. - doi: [10.1101/2023.02.01.526548](https://doi.org/10.1101/2023.02.01.526548)