

Applicazione del Laser Scanner Terrestre (TLS) per la costruzione di una tavola di cubatura in un popolamento di Douglasia (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) nel Sud Italia

Gabriele Arcangelo Macellaro,
Rossella Castronuovo,
Emanuele Giuzio,
Nicola Moretti,
Angelo Nolè

*Application of the terrestrial laser scanner (TLS) for dendrometric analyses of a Douglas fir stand (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) in Southern Italy*

In recent years, the implementation of Light Detection and Ranging (LiDAR) technologies in forestry has significantly improved forest inventory methods, enabling rapid and accurate assessments of forest stand structure. Among these advancements, Terrestrial Laser Scanning (TLS) provides high-resolution data for fine structural characterization of forest ecosystems. This study presents an applied case of TLS-based forest assessment in an artificial Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) stand in southern Italy, focusing on the development of a site-specific volume table. By leveraging a non-destructive approach, TLS facilitated the accurate estimation of key dendrometric variables, including diameter at breast height (DBH), tree height, and volume. The comparison between traditional dendrometric surveys and TLS-derived measurements demonstrated high accuracy and reproducibility, significantly reducing subjectivity in forest measurements. The site-specific volume equation showed a strong correlation ($R^2 = 0.9735$) with national yield tables, confirming the reliability of TLS-based estimates. This study highlights the growing importance of TLS in modern forest management. Its integration into forest inventory protocols, even at local scales, enhances data-driven decision-making, supports sustainable resource utilization, and optimizes stand monitoring and planning processes. While TLS proves highly effective in localized applications, its broader implementation could contribute to large-scale forest monitoring, fostering the transition toward a more innovative, sustainable, and precise approach to forest management.

Keywords: LiDAR Technology, Precision Forestry, Forest Management, Sustainable Management, Yield Table

Introduzione

Negli ultimi anni, l'applicazione della tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR) si è diffusa nel settore forestale, fornendo un valido supporto alla gestione (Wang et al. 2018). Nelle sue varianti aerea (*Aerial Laser Scanning*, ALS) e terrestre (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS), il LiDAR è oggi utilizzato per la caratterizzazione del soprassuolo, la valutazione dettagliata della struttura degli alberi, la stima del volume e della biomassa, la classificazione del legname (Chianucci et al. 2020, Aalto et al. 2023, Eker 2023,

Puletti et al. 2023) e l'analisi del carico di combustibile (Luck et al. 2023, Labenski et al. 2023). L'impiego della tecnologia LiDAR rappresenta un'opportunità concreta per incentivare il processo di aggiornamento degli strumenti di pianificazione forestale.

In questo contesto, la costruzione di una tavola di cubatura sito-specifica, basata su rilievi TLS, rappresenta un valido strumento, fornendo un riferimento quantitativo affidabile per la stima del volume legnoso e l'ottimizzazione delle strategie selvicolturali. Le tavole di cubatura sono uno strumento consolidato nella stima della provvigione forestale soprattutto in contesti in cui non è possibile effettuare una stima diretta e speditiva del volume. Le tavole di cubatura, pur offrendo un riferimento utile, possono risultare poco rappresentative per popolamenti che, pur appartenendo alla stessa specie, crescono in condizioni stagionali differenti. Inoltre, le rapide variazioni ambientali e gestionali che hanno interessato i soprassuoli forestali negli ultimi 20 anni, possono ridurre la precisione e affidabilità di questi strumenti (Tabacchi et al. 2011). L'assenza di tavole sito-specifiche aggiornate, inoltre, aumenta il rischio di stime non coerenti con la realtà locale. In questo contesto lo sviluppo di tavole di cubatura aggiornate e adatte su scala locale consente una gestione più accurata (Puletti et al. 2023).

L'integrazione tra tecnologie avanzate come il Terre-

□ Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali, Alimentari e Ambientali (DAFE), Università della Basilicata, viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza (Italy).

@ Rossella Castronuovo (rossella.castronuovo@unibas.it)

Ricevuto: 8 Gennaio 2025 - Accettato: 4 Maggio 2025

Citazione: Macellaro GA, Castronuovo R, Giuzio E, Moretti N, Nolè A (2025). Applicazione del Laser Scanner Terrestre (TLS) per la costruzione di una tavola di cubatura in un popolamento di Douglasia (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) nel Sud Italia. *Forest@* 22: 47-55. - doi: 10.3832/efor4790-022 [online 2025-06-09]

strial Laser Scanner (TLS) e strumenti tradizionali come le tavole di cubatura permette di ottimizzare le decisioni gestionali, rendendo la pianificazione forestale più efficiente e adattabile alle specificità territoriali.

Il TLS consente di ottenere stime ad alta precisione delle variabili dendrometriche, supportando l'aggiornamento delle tecniche di monitoraggio e l'evoluzione verso inventari forestali avanzati (*enhanced forest inventory* – Corona et al. 2022). In particolare, permette di determinare direttamente la provvigione, operando su singole piante per la costruzione di una tavola di cubatura, mediante campionamento non distruttivo.

Questo approccio fornisce un riferimento facilmente consultabile e aggiornabile nel tempo, adattabile a diversi contesti forestali. Tuttavia, alcune criticità vanno prese in considerazione, come ad esempio i costi dell'attrezzatura, la necessità di formazione del personale specializzato e la complessità del flusso di elaborazione dei dati. Negli ultimi anni, la tecnologia LiDAR è stata caratterizzata da un rapido sviluppo tecnologico che ha reso disponibili strumenti più performanti, compatti e accessibili sia nell'utilizzo che dal punto di vista economico. Tali miglioramenti, uniti alla disponibilità di *software* proprietari e *open source* sempre più intuitivi, hanno reso la tecnologia più fruibile, riducendo le difficoltà operative e incentivando l'adozione sul campo.

Questo studio si configura come un caso applicativo del TLS in un contesto pratico di gestione forestale a scala locale, con l'obiettivo di valutare l'efficacia nella stima degli attributi strutturali e del volume legnoso in un popolamento di origine artificiale di Douglasia (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb] Franco). Il presente lavoro si propone di: (i) sviluppare una tavola di cubatura cormometrica a una

entrata, basata su un approccio di campionamento non distruttivo mediante TLS in un popolamento di origine artificiale di Douglasia; (ii) valutare il confronto tra approccio manuale e automatico nell'analisi dei dati TLS per la stima delle principali variabili dendrometriche; (iii) effettuare una valutazione degli assortimenti legnosi del soprassuolo.

Materiali e metodi

L'indagine è stata condotta mediante realizzazione di tre aree circolari di saggio di 15 metri di raggio ciascuna. In ognuna di esse sono stati eseguiti rilievi dendrometrici, utilizzando metodi e strumenti tradizionali (misure manuali di diametro, altezza e età) e successivamente, scansioni TLS impiegando il Leica BLK360 G1, un *laser scanner* terrestre contraddistinto da elevata portabilità e facilità d'uso in campo. A partire dai fusti digitalizzati ottenuti dalle scansioni TLS, è stata condotta un'analisi delle variabili dendrometriche e realizzata una tavola di cubatura cormometrica a singola entrata. Inoltre, è stata effettuata una valutazione qualitativa e quantitativa degli assortimenti legnosi presenti nel soprassuolo forestale.

Area di studio

L'area di studio è stata individuata all'interno della Foresta Regionale di Fossacupa, nel Comune di Abriola (Basilicata – Fig. 1), soggetta a un Piano di Gestione Forestale attualmente in fase di rinnovo. La Foresta regionale è caratterizzata dalla presenza di diverse consociazioni forestali tra cui: querceti caducifogli, composti da *Quercus cerris* L., *Quercus frainetto* Ten. e *Quercus pubescens* Willd., con specie accessorie come *Acer obtusatum* L., *Ostrya carpinifolia* Scop., *Carpinus betulus* L., *Cornus mas* L. e *Pyrus pyra-*

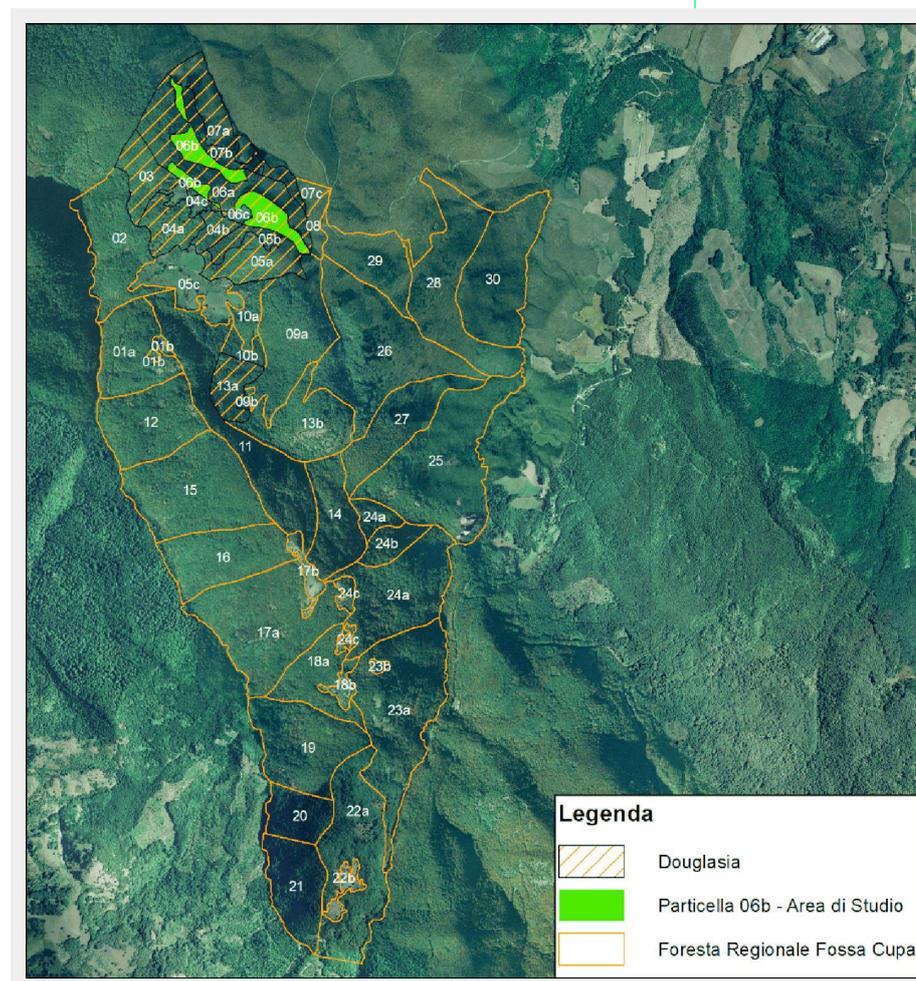


Fig. 1 - Foresta Regionale di Fossa Cupa (Basilicata). In verde sono riportate le particelle oggetto di studio interessate da significativa presenza di douglasia (circa 80%).

ster L.; faggete dominate da *Fagus sylvatica* L.; pinete di pino nero, costituite da *Pinus nigra* J.F. Arnold; e douglasieti, con *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

Il substrato geologico è prevalentemente composto da scisti e marne silicee, con suoli profondi e ben strutturati, particolarmente in aree con un modesto contenuto di argilla. Il clima dell'area è caratterizzato da una temperatura media annua di 13 °C e precipitazioni medie annuali di 677 mm, con un periodo di aridità che si estende dalla fine di maggio all'inizio di settembre.

Il popolamento di *Douglasia* oggetto di studio, deriva da un rimboschimento realizzato tra la fine degli anni '60 e l'inizio degli anni '70 e si sviluppa a un'altitudine di 840 m s.l.m. L'introduzione della specie in Italia risale al XIX secolo, con il primo impianto documentato nel 1858 a Montevarchi. Nel XX secolo, sotto la guida di Aldo Pavari, sono state identificate le aree più idonee alla sua coltivazione, favorendone la diffusione in diverse regioni, tra cui Toscana e Calabria (La Marca 2016).

La *Douglasia* è ampiamente riconosciuta per la sua elevata produttività, risultando superiore ad altre conifere come l'abete bianco (*Abies alba* Mill.), soprattutto negli impianti puri (Ciancio et al. 2008, La Marca 2016). Tuttavia, la sua gestione presenta alcune criticità: negli impianti misti, la *Douglasia* mostra una forte dominanza, limitando la consociazione con altre specie; inoltre, la sua tendenza all'autodiradamento richiede interventi selvicolturali tempestivi per ridurre perdite produttive. La densità d'impianto gioca un ruolo chiave nella qualità del legname: impianti densi possono ridurre la crescita diametrica per competizione, mentre distanze maggiori favoriscono alberi di maggior diametro, con possibili ripercussioni sulla qualità del legno e sulla gestione del sottobosco.

Metodologia di campionamento e scansione TLS

L'indagine ha previsto la realizzazione di rilievi dendrometrici tradizionali e rilievi con TLS in tre aree di saggio di 15 m di raggio. Seguendo un approccio tradizionale sono stati misurati il diametro a petto d'uomo (DBH) mediante cavalletto dendrometrico e l'altezza tramite ipsometro Vertex. La stima dell'età del popolamento è stata effettuata utilizzando la trivella di Pressler. Successivamente, sono stati definiti i piani di campionamento TLS dedicati. Le scansioni sono state realizzate tramite approccio multiplo per ridurre l'effetto di occlusione, particolarmente diffuso in popolamenti con densità elevata. I piani di campionamento multi-scansione possono seguire schemi geometrici (Calders et al. 2015) oppure angolazioni specifiche, come il metodo suggerito da Bazezew et al. (2018) che utilizza angoli di 120° rispetto al centro dell'area. Nei contesti più complessi, vengono utilizzati schemi non geometrici basati sull'utilizzo di target ad alta riflettività per identificare e sincronizzare le aree comuni tra le nuvole di punti. Inoltre, i TLS di ultima generazione permettono una registrazione automatica *on board* (Cheng et al. 2018, Calders et al. 2020). Sulla base delle caratteristiche del sito, è stato adottato uno schema di campionamento non geometrico, tenendo conto di fattori come la visibilità, l'accidentalità del terreno e i coni d'ombra creati da ogni singola scansione. Lo schema di posizionamento del TLS e dei target è stato valutato caso per caso, con distanze e posizioni variabili attorno al punto centrale di ciascuna area di saggio (vedi Appendice 1 nel Materiale supplementare).

Pre-elaborazione dei dati

Il *pre-processing* delle nuvole di punti è stato eseguito singolarmente per ciascuna area di studio utilizzando il software proprietario Leica Geosystems Cyclone REGISTER 360. Le nuvole di punti acquisite da ciascuna area di studio vengono elaborate come segue. (i) Allineamento: consiste nella corretta intersezione delle nuvole di punti



Fig. 2 - Area di saggio digitale, in vista laterale, rappresentata utilizzando le informazioni spettrali in RGB.

provenienti da diverse scansioni che rappresentano la stessa scena da prospettive differenti. Durante questa fase, le singole scansioni vengono sovrapposte e allineate in modo che i punti comuni combacino con la massima precisione, mentre le zone non sovrapposte aiutano a colmare eventuali coni d'ombra effetto dell'occlusione. (ii) Merge (unione delle nuvole di punti): in questa fase, le nuvole di punti precedentemente allineate vengono combinate in un'unica rappresentazione tridimensionale, vengono eliminate le ridondanze (punti duplicati presenti nelle aree comuni delle scansioni) e le sovrapposizioni (punti che si trovano molto vicini tra loro o che rappresentano lo stesso elemento da angolazioni diverse). Questo consente di ottenere una nuvola di punti unificata, che rappresenta l'intero oggetto o area di interesse in modo continuo e senza interruzioni. (iii) Registrazione: la qualità dell'allineamento è valutata tramite una serie di criteri (Appendice 1) tra i quali la percentuale di sovrapposizione tra le nuvole di punti, l'errore di allineamento (espresso in metri) e la distanza media tra le nuvole (*cloud-to-cloud distance*). Solo quando questi parametri rientrano nei limiti di accuratezza prestabiliti si procede con la registrazione definitiva. In questa fase, il sistema di coordinate locali di ciascuna scansione viene trasformato in un sistema di riferimento globale unificato. (iv) Clipping: consiste nel ritaglio della nuvola di punti generata dalla fase precedente, al fine di ottenere una nuvola di punti corrispondente esclusivamente all'area oggetto di studio. (v) Morphological filtering: è stato applicato l'algoritmo "Cloth Simulation Filter" (CSF - Zhang et al. 2016) per la classificazione e la separazione dei punti suolo dagli oggetti sovrastanti, come vegetazione o altre strutture. Questa fase permette di isolare la superficie del terreno per ulteriori analisi. (vi) Estrazione del Digital Elevation Model - DEM: la ricostruzione del suolo è avvenuta attraverso l'interpolazione dei punti suolo. (vii) Normalizzazione: la nuvola di punti è stata normalizzata al fine di rimuovere l'influenza

della pendenza sui valori della coordinata z di ciascun punto (Fig. 2).

Analisi dendrometrica

La nuvola di punti al di sopra del suolo, estratta utilizzando il *Morphological Filtering*, rappresenta la componente vegetativa ed è stata elaborata manualmente per l'individuazione ed isolamento delle singole piante e per l'eliminazione degli individui morti. Ciascuna pianta isolata è stata numerata con un identificativo univoco di riconoscimento (ID) e segmentata manualmente. Le variabili dendrometriche sono state calcolate a livello di singolo albero e successivamente aggregate a scala di popolamento.

Per la valutazione dell'approccio più idoneo all'analisi dendrometrica a partire dalle nuvole di punti, sono state confrontate due metodologie di processamento. Il primo approccio, basato sulla misura manuale, con il software open-source "CloudCompare", stima le variabili dendrometriche richiedendo l'intervento di un operatore per il settaggio dei parametri geometrici, introducendo un margine di soggettività nell'elaborazione. Il secondo approccio, basato sul pacchetto "ITSMe" implementato in Rstudio, automatizza il processo di estrazione delle variabili dendrometriche eliminando l'influenza dell'errore casuale e garantendo la ripetibilità dell'analisi. Il confronto è stato effettuato su un campione rappresentativo pari al 30% delle piante per ciascuna classe diametrica. Sulla base di questi criteri, la scelta è ricaduta sull'approccio automatico che si è dimostrato altamente affidabile nella determinazione delle variabili dendrometriche, consentendo misurazioni rapide ed efficienti come evidenziato in precedenti studi (Weiß 2009, Skowronski et al. 2014, Calders et al. 2015, Chianucci et al. 2020, Puletti et al. 2023 - Fig. 3). Pertanto, il diametro a petto d'uomo (DBH) è stato stimato mediante l'algoritmo *circle fitting* (Calders et al. 2015, Liu et al. 2018), mentre l'altezza totale (H) è stata calcolata come la differenza tra la coordinata z del punto più alto e quella del punto più basso della nuvola di punti associata al singolo albero.

Successivamente, dall'aggregazione dei dati sono state derivate le stime a scala di popolamento per la densità, l'area basimetrica, il diametro medio, l'altezza media e l'altezza dominante. Le variabili dendrometriche misurate con TLS sono state quindi confrontate con le stesse rilevate mediante approccio tradizionale.

Tavola di cubatura e assortimenti

La selezione degli alberi modello per la realizzazione della tavola di cubatura è stata effettuata tra tutte le piante rilevate nelle tre aree di saggio per garantire la massima

rappresentatività del popolamento. In particolare, gli individui sono stati selezionati in funzione della distribuzione per classi diametriche, rilevando una quota pari al 30% per ciascuna classe, aventi un'adeguata visibilità della nuvola di punti e un diametro minimo di 10 cm in punta (Puletti et al. 2023). Inoltre, sono stati eliminati i primi 20 cm di fusto per simulare il taglio ed evitare l'eccessiva rastremazione al colletto.

Per la valutazione degli alberi modello, è stata condotta un'analisi preliminare per individuare ed escludere eventuali outliers mediante il metodo IQR (*Interquartile Range*). Gli outliers sono stati definiti come gli elementi al di fuori dei limiti riportati in eqn. 1:

$$\text{Outlier}(V) = \{V_i | V_i < Q1 - 1.5 \cdot IQR \text{ o } V_i > Q3 + 1.5 \cdot IQR\} \quad (1)$$

Per verificare la presenza di eteroschedasticità nel modello di regressione Diametro-Volume, è stato applicato il test di Breusch-Pagan, utilizzando il pacchetto "lmtest" ampiamente adottato per l'analisi della relazione tra la massa arborea e le variabili dimensionali (Ciancio et al. 1989, Tabacchi & Tosi 1993, Mancino & Verrastro 2002).

Sulla base dei risultati ottenuti, la stima non distruttiva del volume dei singoli alberi modello è stata condotta mediante l'applicazione della formula dei trapezi (La Marca 2017a). L'analisi è stata supportata dall'impiego del pacchetto R "ITSMe", che ha consentito la segmentazione digitale dei fusti cormometrici con intervalli regolari di 2 metri, registrando per ciascun segmento il diametro alle estremità. I dati raccolti sono stati successivamente elaborati per costruire un modello di regressione tra il diametro a petto d'uomo (DBH) e il volume degli alberi.

Dalla determinazione del volume medio per classi diametriche è stata derivata la curva stereometrica, che descrive la distribuzione volumetrica in funzione del diametro. L'equazione risultante rappresenta l'equazione di previsione del volume per il popolamento oggetto di studio e viene utilizzata nella costruzione della tavola di cubatura a una sola entrata e nella determinazione della provvigione del popolamento da dati TLS.

Parallelamente, la provvigione di riferimento è stata calcolata mediante l'equazione di previsione del volume del fusto specifica per i popolamenti di douglasia a scala nazionale (Tabacchi et al. 2011).

Infine, per la stima degli assortimenti ritraibili, il campione di piante modello è stato oggetto di valutazione allo scopo di evidenziare la distinzione tra il volume cormometrico e il volume del tronco da lavoro commercializzabile. Gli assortimenti ritraibili sono stati distinti secondo le classi assortimentali riportate da Todaro et al. (2013): (i) "Ton-

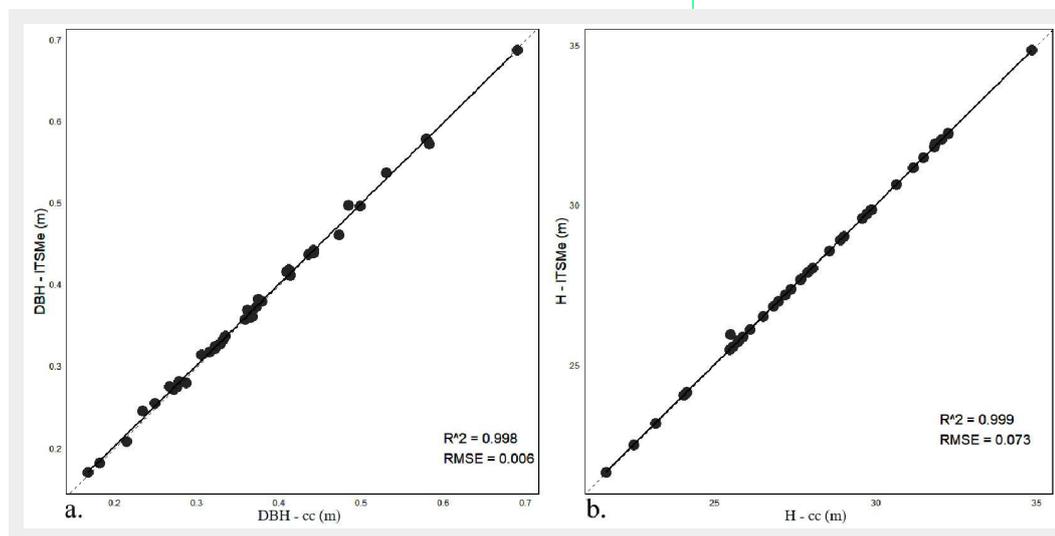


Fig. 3 - Confronto tra i risultati delle stime di diametro (a) e altezza (b) ottenuti tramite approccio manuale (DBH-cc e H-cc) e automatico (DBH-ITSMe e H-ITSMe).

Tab. 1 - Confronto tra le variabili strutturali espresse a scala di ADS (area di saggio) ed a scala di popolamento, ottenuti mediante rilievi tradizionali (Trad.) e procedure TLS.

Parametro	Tipo di Rilievo	Aree di saggio			Totale ad ettaro
		ADS 1	ADS 2	ADS 3	
Numero di Piante	Trad.	58	30	39	42
	TLS	58	30	39	42
Densità del soprassuolo	Trad.	821	425	552	599
	TLS	821	425	552	599
Area Basimetrica (m ²)	Trad.	6.21	4.29	2.95	63.5
	TLS	6.31	4.37	3	64.5
Diametro medio (cm)	Trad.	36.9	42.7	31.1	36.8
	TLS	37.2	43	31.3	37
Altezza media (m)	Trad.	29	30.7	26.7	28.8
	TLS	28.3	29.5	27	28.3
Altezza dominante (m)	Trad.	32.1	32.2	29.4	31.2
	TLS	31.3	31.9	28.5	30.6

do da sega”, aventi 4 m di lunghezza ed almeno 20 cm di diametro sopra corteccia in punta; (ii) “Altri assortimenti”, che includono tutte le sottomisure ed il cimale. Sono stati quindi stimati gli assortimenti ritraibili per singola pianta, e successivamente i dati sono stati aggregati per classi diametriche. al netto della corteccia e degli scarti di lavorazione, che rappresentano rispettivamente il 15% e il 2% (La Marca 2017a, La Marca 2017b).

L’ottimizzazione dei tempi rappresenta un aspetto importante nel determinare i costi delle attività di rilievo. La valutazione dei tempi di lavoro richiesti per l’applicazione della metodologia è determinante per valutarne l’applicabilità rispetto alle alternative disponibili. Diversi studi hanno analizzato gli aspetti tempistico-operativi di questi approcci (Bazew et al. 2018, Kalwar et al. 2020, Puletti et al. 2023). La metodologia basata sul rilievo TLS è stata quindi valutata in termini di tempo, suddiviso per le diverse attività sia passive che attive.

Risultati e discussione

L’implementazione della metodologia ha permesso, in una prima fase, il confronto tra l’approccio tradizionale e il TLS nella misura delle variabili dendrometriche. L’analisi è avvenuta a scala di singolo albero; successivamente, data l’omogeneità della particella oggetto di studio, i dati raccolti sono stati aggregati per aree di saggio per la rappresentazione delle variabili dendrometriche e infine riportate all’ettaro. Tale aggregazione ha permesso di ottenere risultati rappresentativi dell’intero popolamento.

La Tab. 1 riporta le principali variabili dendrometriche rilevate in ciascuna delle tre aree di saggio (ADS 1, ADS 2 e ADS 3), nonché riportate a scala di popolamento (“Totale ad ettaro”), utilizzando sia metodologie tradizionali sia rilievi TLS. I risultati evidenziano concordanza tra le stime ottenute con i due approcci, con differenze limitate ad alcune variabili. Il campione di piante rilevate in totale è composto da 134 individui, di cui 7 morti in piedi. Pertanto, il campione effettivo per le valutazioni dendrometriche è costituito da 127 piante.

Il TLS si è dimostrato in grado di identificare il 100% degli individui rilevati attraverso le tecniche tradizionali, confermando l’elevata accuratezza del metodo di campionamento. L’area basimetrica stimata mediante TLS risulta leggermente superiore rispetto a quella ottenuta con rilievo tradizionale (64.5 vs. 63.5 m² ha⁻¹), con una differenza di +1 m² ha⁻¹. Il diametro medio stimato appare superiore nei dati TLS (37 cm) rispetto al metodo tradizionale (36.8 cm), con uno scostamento di +0.2 cm. Per quanto riguarda le altezze, si osserva una lieve sottostima

dell’altezza media da parte del TLS (28.3 m) rispetto al rilievo tradizionale (28.8 m), con una differenza di -0.05 m, mentre l’altezza dominante risulta inferiore nei dati TLS (30.6 m) rispetto a quelli tradizionali (31.1 m). Tali risultati confermano l’affidabilità del TLS come strumento di indagine dendrometrica su scala di popolamento, con il potenziale di integrare e affinare le metodologie di rilievo tradizionali.

Per la suddivisione del popolamento in classi diametriche, ai dati delle tre aree aggregate è stata applicata una distribuzione di frequenza suddivisa in intervalli di 5 cm (Fig. 4). La distribuzione delle classi diametriche segue un andamento a campana, con una maggiore concentrazione di frequenze nelle classi diametriche intermedie (25-30-35-40-45 cm). Le classi diametriche superiori (60 e 70 cm) risultano scarsamente rappresentate, indicando una limitata variabilità strutturale. Tale pattern è rappresentativo di un popolamento di origine artificiale, sostanzialmente coetaneo (età media di circa 50 anni) e alla gestione selvicolturale ritardata negli ultimi anni, in modo simile a quanto osservato in popolamenti di *Douglasia* analoghi (Iovino et al. 2017).

La Fig. 5 illustra la curva ipsometrica che descrive la relazione tra il diametro a petto d’uomo (DBH) e l’altezza del

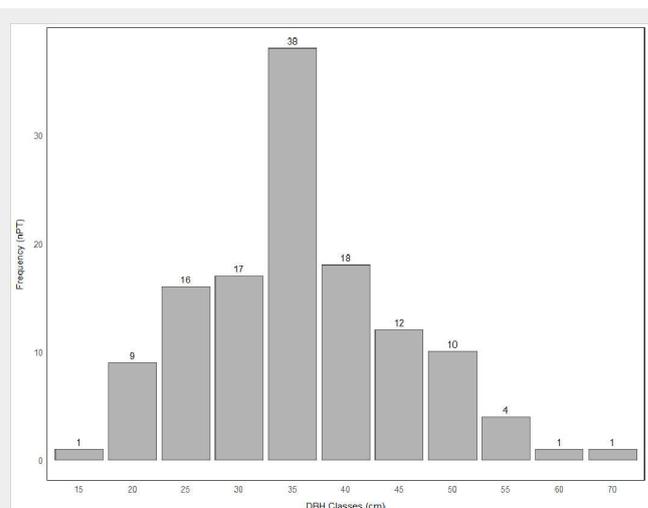


Fig. 4 - Distribuzione delle piante rilevate da TLS in classi diametriche di 5 cm. L’asse orizzontale mostra le classi di diametro (in cm), mentre l’asse verticale indica la frequenza con cui queste classi si presentano.

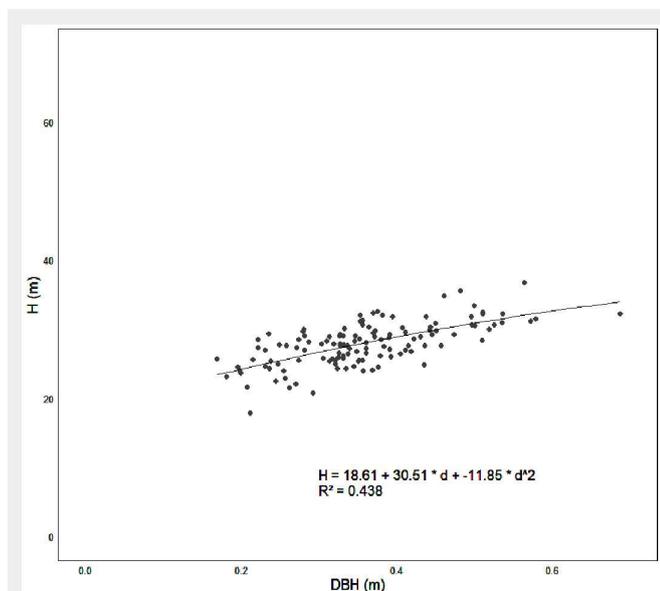


Fig. 5 - Curva ipsometrica derivante dalle aree di saggio digitalizzate TLS. Sulle ascisse sono riportati valori del diametro a petto d'uomo, mentre sull'asse delle ordinate le misure relative all'altezza per singola pianta.

popolamento (H). L'analisi statistica evidenzia una correlazione relativamente debole tra queste due variabili ($R^2 = 0.438$), con un incremento iniziale dell'altezza che tende a ridursi all'aumentare del diametro. Tale andamento suggerisce che la competizione interspecifica per le risorse, caratteristica dei popolamenti con elevata densità d'impianto, sia particolarmente marcata nelle prime fasi di sviluppo, mentre nei sistemi a minore densità tale dinamica si manifesta più tardivamente. Sebbene la densità elevata influenzi la competizione nelle prime fasi, non ha un impatto significativo sulla crescita in altezza quando le piante raggiungono la maturità, come evidenziato da Ciancio et al. (2008). Infatti, l'altezza dominante, che si stabilizza tra 30 e 33 metri a partire dai 40 anni, non mostra una correlazione forte con la densità d'impianto, confermando che la competizione influisce principalmente nelle fasi giovanili.

Gli alberi modello per la costruzione della tavola di cubatura e la valutazione assortimentale sono stati selezionati a partire da un campione rappresentativo pari al 30% degli individui per ciascuna classe diametrica. Nel contesto della selezione degli alberi modello, il dataset iniziale comprendeva 51 individui che rispondevano ai criteri di rappresentatività dendrometrico-strutturale. L'analisi statistica a carico di questi, ha evidenziato la presenza di 2 valori anomali al di fuori del range interquartile (Fig. 6). L'eliminazione di questi valori anomali non ha compromesso la rappresentatività del campione, ma ha invece migliorato la stabilità della relazione tra diametro e volume, assicurando che la stima del modello di regressione fosse priva

Tab. 2 - Statistica descrittiva delle variabili dimensionali relative alle piante selezionate per la costruzione della tavola di cubatura. (n): numero di osservazioni.

Variabile	n	Media	Min	Max	Dev. Std.
DBH (cm)	49	33.97	18.34	50.00	7.48
H (m)	49	27.85	17.90	35.56	3.39
Volume (m ³)	49	1.33	0.21	3.06	0.72

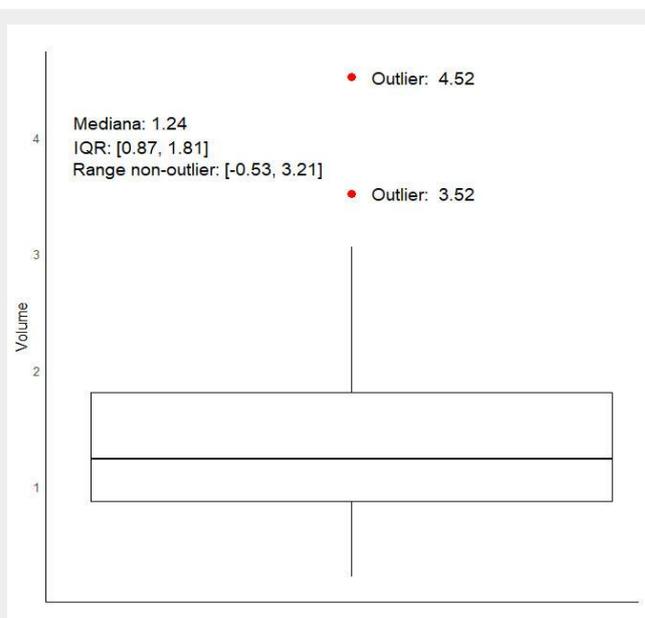


Fig. 6 - Boxplot con evidenziati in rosso i dati anomali della distribuzione della variabile "Volume" (outliers e valori estremi).

di influenze distorsive dovute a valori estremi.

Le successive analisi per verificare la presenza di eteroschedasticità mediante il test di Breusch-Pagan, applicato sui restanti 49 alberi modello, ha restituito un valore della statistica BP pari a 0.071181, con 1 grado di libertà e un *p-value* di 0.7896. Poiché il *p-value* è ampiamente superiore alle soglie di significatività comunemente adottate (0.05 o 0.01), non si riscontra evidenza di eteroschedasticità. Questo risultato indica che la varianza degli errori è omogenea, suggerendo che il modello di regressione utilizzato per stimare il volume degli alberi non è influenzato da variazioni sistematiche della dispersione dei dati.

Alla luce di questi risultati, si è proceduto al calcolo delle statistiche descrittive per le variabili diametro (DBH), altezza (H) e volume (V) degli alberi modello (Tab. 2). Il volume medio è risultato pari a circa 1.33 m³, con una deviazione standard di 0.72 m³. Analogamente, il diametro medio è di 34 cm, con una deviazione standard di 7.48 cm.

Nella Fig. 7 è riportata la curva stereometrica ottenuta mediante regressione polinomiale di secondo grado, derivata dalla relazione tra diametro e volume. L'equazione ri-

Tab. 3 - Tavola di cubatura a una entrata per il popolamento di douglasia studiato, ricavata dall'equazione di previsione a scala locale (eqn. 2); viene riportata l'altezza di riferimento ottenuta dalla curva ipsometrica (Fig. 5).

Tavola di cubatura		
Classi diametriche (cm)	Volume (m ³)	Altezza (m)
20	0.27	24.2
25	0.58	25.5
30	0.95	26.7
35	1.38	27.8
40	1.87	28.9
45	2.43	29.9
50	3.04	30.9
55	3.71	31.8
60	4.44	32.7

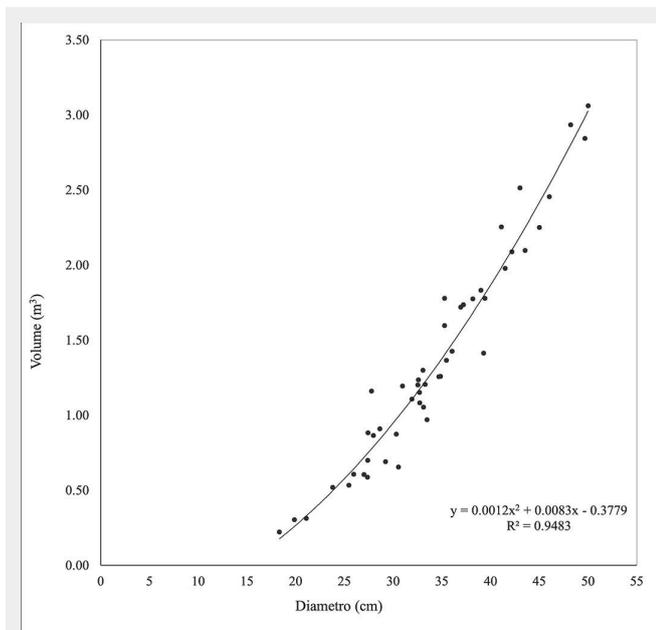


Fig. 7 - Curva stereometrica del popolamento ottenuta tramite interpolazione di tipo polinomiale di secondo grado. Diametro del fusto a 1.3 m sulle ascisse, volume cormometrico sulle ordinate.

sultante rappresenta l'equazione di previsione del volume, specifica per il popolamento oggetto di studio (eqn. 2), viene utilizzata nella costruzione della tavola di cubatura a una sola entrata (Tab. 3) e nella determinazione della provvigione del popolamento da dati TLS (eqn. 2):

$$V = 0.0012 \cdot d^2 + 0.0083 \cdot d - 0.3779 \quad (2)$$

I valori di provvigione ottenuti mediante l'equazione di previsione specifica del popolamento (eqn. 2) tramite approccio non distruttivo basato su dati TLS sono stati confrontati con i risultati ottenuti mediante l'applicazione dell'equazione di previsione del volume dei fusti a scala nazionale (Tabacchi et al. 2011), evidenziando un'elevata correlazione (Fig. 8), con un R^2 pari a 0.9735. Tali risultati confermano la solidità del modello non distruttivo basato su TLS nella stima della provvigione. Un aspetto particolarmente significativo riguarda l'assenza nella tavola nazionale della classe diametrica più piccola, in cui gli alberi con un diametro di 20 cm sono associati a un'altezza di circa 13 metri. Tuttavia, le misurazioni condotte a livello locale mostrano che alberi della stessa classe diametrica raggiungono un'altezza media di 24 metri. Tale differenza evidenzia una delle principali limitazioni delle tavole di cubatura nazionali, che, pur offrendo stime affidabili ad ampia scala, non sempre riescono a cogliere con precisione le peculiarità ecologiche-strutturali del popolamento legata alle specifiche condizioni stazionali del sito.

La Fig. 9 riporta la stima del volume degli assortimenti ritraibili in funzione delle classi diametriche. Il valore complessivo derivato dal rapporto tra volume cormometrico totale e volume assortimentale è pari al 76%, valore riscontrato in popolamenti simili (Todaro et al. 2013). Il grafico mostra come il volume principale (Vass) aumenti progressivamente con l'incremento della classe diametrica, arrivando a rappresentare il 95.49% del volume totale nella classe di 50 cm. Allo stesso tempo, il volume dei cimali (Vcim) e gli altri assortimenti diminuiscono percentualmente, evidenziando una concentrazione crescente di volume del tonname. Nella classe di 25 cm, il volume totale è di 0.65 m³, con il 45.49% rappresentato dal volume princi-

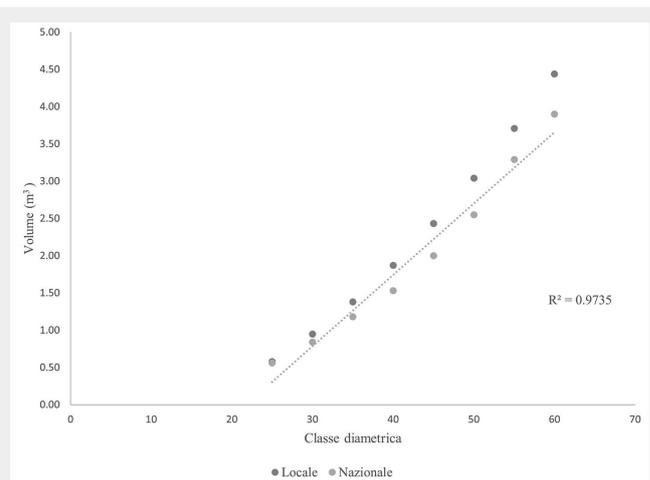


Fig. 8 - Grafico di correlazione tra il volume ricavato da equazione di previsione del volume dei fusti a scala nazionale (Tabacchi et al. 2011) e a scala locale per classi diametriche.

pale, mentre nelle classi diametriche superiori il volume principale domina sempre di più, riducendo la percentuale degli altri assortimenti. Questo comporta una maggiore concentrazione del volume utile nel tonname man mano che le dimensioni degli alberi aumentano.

Data la natura pratico-applicativa dell'esperienza, la metodologia basata sul rilievo TLS è stata valutata in termini di tempo (vedi Appendice 2 nel Materiale supplementare) impiegato (attività passive e attive) per singola area di saggio, relativi ai rilievi in campo (circa 40 minuti) ed al *pre-processing* (3.3 ore).

I tempi di lavoro in campo sono influenzati dalle caratteristiche stazionali e dalla disponibilità di personale. Nei ri-

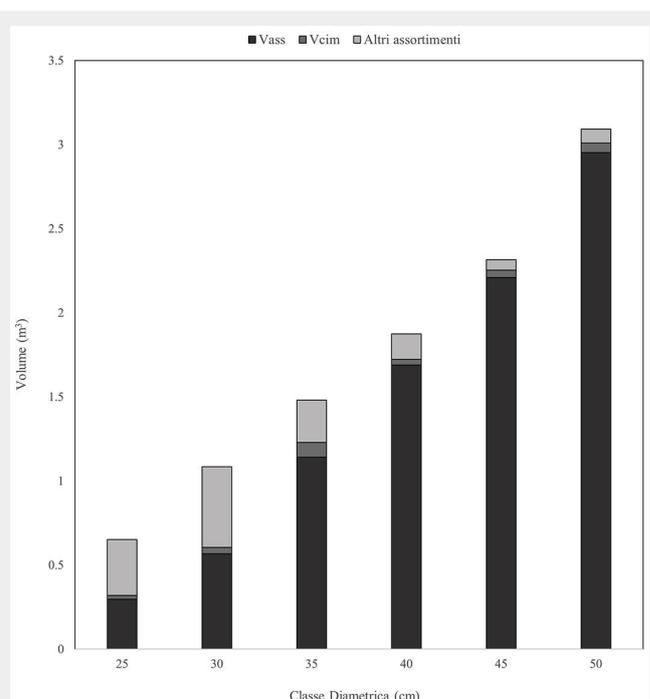


Fig. 9 - Confronto fra le medie di volume degli assortimenti ritraibili (Tondame da sega - Vass), volume degli altri assortimenti (sottomisure/sovramisure - Altri_Ass) e volume dei cimali (VCim) per classe diametrica. I volumi (in metri cubi) sono sull'asse verticale, sull'asse orizzontale le classi diametriche (in cm).

lievi tradizionali, tali fattori incidono direttamente sui tempi di misurazione delle singole piante, mentre nel caso del *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) il loro impatto si limita alla fase di definizione dello schema di campionamento.

Le durate riportate sono necessarie per generare modelli tridimensionali dettagliati in grado di restituire fedelmente la struttura del popolamento. Per le fasi di processing le tempistiche vengono invece valutate a scala di singolo albero e fase per fase (valutazione strutturale del popolamento, costruzione della tavola di cubatura).

Sebbene le operazioni di *pre-processing*, segmentazione e analisi comportino un significativo impegno computazionale, l'uso di *software open-source* (RStudio e CloudCompare) e *software proprietari* (Leica Geosystems Cyclone REGISTER 360) consente di gestire efficacemente i dati, assicurando elevata precisione e validazione accurata delle misure. Inoltre, questa metodologia è pienamente replicabile con *software open-source*, riducendo i costi, ma con una leggera compromissione della velocità operativa, pur risultando più accessibile.

Conclusioni

Nel presente studio viene applicata una metodologia di analisi basata su rilievi TLS per la stima degli attributi strutturali e del volume legnoso in un popolamento di origine artificiale di *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

L'integrazione del TLS con metodologie tradizionali per la costruzione di una tavola di cubatura sito-specifica mediante un approccio non distruttivo riduce le limitazioni delle tavole convenzionali e permette di evitare l'abbattimento degli alberi modello senza comprometterne l'affidabilità del risultato. L'elevata risoluzione del rilievo TLS permette di ridurre l'incertezza associata all'applicazione di modelli generalizzati e di evidenziare il potenziale applicativo nella costruzione di tavole di cubatura sito-specifiche in grado di fornire stime volumetriche rappresentative del popolamento. La possibilità di aggiornare le tavole a scala locale riducendo i costi legati all'abbattimento di alberi modello, rappresenta un avanzamento significativo nell'ottimizzazione delle pratiche selvicolturali, contribuendo a una gestione più sostenibile ed efficace delle risorse forestali.

L'analisi tridimensionale dei dati consente inoltre una prima classificazione degli assortimenti legnosi negli alberi in piedi, integrando le tradizionali stime volumetriche con valutazioni qualitative del legname. Questo livello di dettaglio migliora la pianificazione delle utilizzazioni e la valorizzazione del materiale legnoso, in un'ottica di ottimizzazione economica e sostenibilità. Inoltre, i dati derivanti dai rilievi TLS possono rappresentare un *input* ad alta risoluzione per l'implementazione di modelli di processo per la stima della produttività forestale, contribuendo ad una maggiore comprensione delle dinamiche ecologiche e delle risposte ecosistemiche ai processi di cambiamento climatico.

L'applicazione del presente caso di studio ha evidenziato il valore dell'integrazione di tecnologie TLS nelle pratiche forestali, suggerendo la necessità di ulteriori applicazioni in contesti differenti per affinare metodologie e approcci automatici di *processing*. L'evoluzione tecnologica e la crescente accessibilità dei sensori TLS offrono un'opportunità concreta per accelerare il processo di digitalizzazione nel settore forestale, migliorando la capacità di monitoraggio e modellizzazione su larga scala.

Ringraziamenti

Il presente studio rientra nell'ambito delle iniziative di pianificazione forestale promosse dalla Regione Basilicata, in collaborazione con il Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria (CREA-PB). L'obiettivo di questa collaborazione è lo sviluppo e

l'implementazione di strumenti innovativi per la valutazione della produttività forestale e delle caratteristiche ecologiche delle specie arboree, al fine di migliorare la gestione e la sostenibilità delle risorse forestali regionali

Bibliografia

- Aalto I, Aalto J, Hancock S, Valkonen S, Maeda EE (2023). Quantifying the impact of management on the three-dimensional structure of boreal forests. *Forest Ecology and Management* 535: 120885. - doi: [10.1016/j.foreco.2023.120885](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120885)
- Bazewicz MN, Hussin YA, Kloosterman EH (2018). Integrating Airborne LiDAR and Terrestrial Laser Scanner Forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 73: 638-652. - doi: [10.1016/j.jag.2018.07.026](https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.026)
- Calders K, Newnham G, Burt A, Murphy S, Raunonen P, Herold M, Culvenor D, Avitabile V, Disney M, Armston J, Kaasalainen M (2015). Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology and Evolution* 6 (2): 198-208. - doi: [10.1111/2041-210X.12301](https://doi.org/10.1111/2041-210X.12301)
- Calders K, Adams J, Armston J, Bartholomeus H, Bauwens S, Bentley LP, Chave J, Danson FM, Demol M, Disney M, Gaulton R (2020). Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon. *Remote Sensing of Environment* 251: 112102. - doi: [10.1016/j.rse.2020.112102](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102)
- Cheng L, Chen S, Liu X, Xu H, Wu Y, Li M, Chen Y (2018). Registration of laser scanning point clouds: A review. *Sensors* 18 (5): 1641. - doi: [10.3390/s18051641](https://doi.org/10.3390/s18051641)
- Chianucci F, Puletti N, Grotti M, Ferrara C, Giorcelli A, Coaloa D, Tattoni C (2020). Nondestructive tree stem and crown volume allometry in hybrid poplar plantations derived from terrestrial laser scanning. *Forest Science* 66 (6): 737-746. - doi: [10.1093/forsci/fxaa021](https://doi.org/10.1093/forsci/fxaa021)
- Ciancio O, De Angelis P, Valentini R (1989). Tavole di cubatura a una e due entrate per le pinete di pino marittimo di Monte Rufeno nell'alto Lazio. *Annali dell'Istituto Sperimentale per la Selvicoltura* 20: 479-500.
- Ciancio O, Garfi V, Marziliano PA, Menguzzato G, Pelle L (2008). Effetti della densità d'impianto in popolamenti di douglasia. *L'Italia Forestale e Montana* 63 (6): 519-534. - doi: [10.4129/IFM.2008.6.05](https://doi.org/10.4129/IFM.2008.6.05)
- Corona P, Marchi E, Chirici G (2022). Prospettive e potenzialità della digitalizzazione del settore forestale in Italia. *Pubblicazione Rete Rurale Nazionale 2014-2020, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Roma*.
- Eker R (2023). Comparative use of PPK-integrated close-range terrestrial photogrammetry and a handheld mobile laser scanner in the measurement of forest road surface deformation. *Measurement* 206: 112322. - doi: [10.1016/j.measurement.2022.112322](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112322)
- Iovino F, Nicolaci A, Menguzzato G, Marziliano P, Bernardini V, Castaldi C, Quatrini V, Cutini A (2017). Approcci selvicolturali innovativi a sostegno della gestione forestale sostenibile in Calabria. *Forest@* 14: 285-313. - doi: [10.3832/efor2544-014](https://doi.org/10.3832/efor2544-014)
- Kalwar OPP, Hussin YA, Weir MJC, De Bie CAJM, Karna Y (2020). Deriving forest plot inventory parameters using terrestrial laser scanning in the tropical rainforest of Malaysia. *International Journal of Remote Sensing* 42 (3): 884-901. - doi: [10.1080/01431161.2020.1817606](https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1817606)
- La Marca O (2016). Realtà e prospettive nella selvicoltura di impianto in Italia: il caso della douglasia (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*). *Georgofili - Quaderni* 1: 13-42.
- La Marca O (2017a). *Elementi di dendrometria*. Patron editore, Bologna.
- La Marca O (2017b). Tavole di produzione e di cubatura per la douglasia, Due nuovi strumenti per soprassuoli maturi. *Sherwood* 226 (11). [online] URL: <http://www.progettodonato.it/pubblicazioni-2/legname.html?download=4:tavole-di-produzione-e-di-cubatura-per-la-douglasia-sherwood-226>
- Labenski P, Ewald M, Schmidlein S, Heinsch FA, Fassnacht FE

- (2023). Quantifying surface fuels for fire modelling in temperate forests using airborne lidar and Sentinel-2: potential and limitations. *Remote Sensing of Environment* 295: 113711. - doi: [10.1016/j.rse.2023.113711](https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113711)
- Liu G, Wang J, Dong P, Chen Y, Liu Z (2018). Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) data at plot level. *Forests* 9 (7): 398. - doi: [10.3390/f9070398](https://doi.org/10.3390/f9070398)
- Luck L, Kaestli M, Hutley LB, Calders K, Levick SR (2023). Reduced model complexity for efficient characterisation of savanna woodland structure using terrestrial laser scanning, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 118: 103255 - doi: [10.1016/j.jag.2023.103255](https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103255)
- Mancino G, Verrastro F (2002). Modelli di stima del volume per i polloni di faggio dell'Appennino Lucano settentrionale. *L'Italia Forestale e Montana* 57 (2): 163-176.
- Puletti N, Guasti M, Innocenti S, Scotti R (2023). Tavole di cubatura e laser scanner terrestre: l'innovazione tecnologica al servizio della dendrometria. *Forest@* 20(1): 61-66. - doi: [10.3832/efor4401-020](https://doi.org/10.3832/efor4401-020)
- Skowronski NS, Clark KL, Gallagher M, Birdsey RA, Hom JL (2014). Airborne laser scanner-assisted estimation of above-ground biomass changes in a temperate oak-pine forest. *Remote Sensing of Environment* 151: 166-174. - doi: [10.1016/j.rse.2013.12.015](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.015)
- Tabacchi G, Tosi V (1993). Modelli di previsione delle masse legnose del pino silvestre nell'Italia settentrionale. *Comunicazioni di Ricerca ISAF* 1 (92): 1-30.
- Tabacchi G, Di Cosmo L, Gasparini P, Morelli S (2011). Stima del volume e della fitomassa delle principali specie forestali italiane. *Equazioni di previsione, tavole del volume e tavole della fitomassa arborea epigea. Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Trento*, pp. 412. [online] URL: http://www.inventarioforestale.org/wp-content/uploads/2022/10/tavole_cubatura.pdf
- Todaro L, Quartulli S, Robusto A, Moretti N (2013). Effetti del diradamento sulla stabilità del soprassuolo e sugli assortimenti legnosi ritraibili in un popolamento di douglasia. *L'Italia Forestale e Montana* 57 (5): 451-466.
- Wang M, Sun R, Xiao Z (2018). Estimation of forest canopy height and aboveground biomass from spaceborne LIDAR and Landsat imageries in Maryland. *Remote Sensing* 10 (2): 344. - doi: [10.3390/rs10020344](https://doi.org/10.3390/rs10020344)
- Wei J (2009). Application and statistical analysis of terrestrial laser scanning and forest growth simulations to determine selected characteristics of Douglas-Fir stands. *Folia Forestalia Polonica - Series A: Forestry* 51 (2): 123-137.
- Zhang W, Qi J, Wan P, Wang H, Xie D, Wang X, Yan G (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing* 8 (6): 501. - doi: [10.3390/rs8060501](https://doi.org/10.3390/rs8060501)

Materiale Supplementare

Appendice 1 – Report di registrazione.

Appendice 2 – Tempistica operativa.

Link: Macellaro_4790@suppl001.pdf