

Numero Speciale: Progetto ALForLab (PON03PE_00024_1 - PON R&C- PAC 2007-2013)

“Laboratorio Pubblico-privato per l’applicazione di tecnologie innovative ad elevata sostenibilità ambientale nella filiera foresta-legno-energia”

Guest Editors: Alessandro Paletto (CREA, Trento), Giorgio Matteucci & Mauro Maesano (CNR-ISAFOM)

Modelli di stima del volume e delle fitomasse del soprassuolo arboreo delle principali formazioni forestali della Calabria mediante dati LiDAR

**Gianfranco Scrinzi⁽¹⁾, Antonio Floris*⁽¹⁾, Fabrizio Clementel⁽¹⁾, Vincenzo Bernardini⁽³⁾,
Francesco Chianucci⁽²⁾, Silvia Greco⁽³⁾, Tamara Michelini⁽¹⁾, Andrea Penasa⁽¹⁾, Nicola Puletti⁽²⁾,
Maria Rizzo⁽¹⁾, Rosario Turco⁽³⁾, Piermaria Corona⁽²⁾**

(1) CREA MPF, p.za Nicolini 6, I-38100 Trento (Italy); (2) CREA SEL, v.le Santa Margherita 80, I-52100 Arezzo (Italy); (3) CREA SAM, c.da Li Rocchi Vermicelli 83, I-87036 Rende (CS - Italy) - *Corresponding Author: Antonio Floris (antonio.floris@crea.gov.it).

Abstract: Models of stand volume and biomass estimation based on LiDAR data for the main forest types in Calabria (southern Italy). The ALForLab project is part of the Cluster MEA (Materials Energy Environment) addressed to the Calabria Region. Estimating the main dendrometric variables of Calabrian forests using models based on publicly available remote sensed data is one of the main purposes of the project. This paper describes the procedures used to develop several thematic maps (raster and vector) of timber volume and phytomass to be used in planning and management activities at both regional and forest property scale, as well as for felling plans, logging projects etc. We used public LiDAR data at medium-low resolution (1.6 pts m⁻²), acquired on about 90% of Calabrian territory in the frame of a national remote sensing programme of the Italian Ministry of the Environment. Field data from the second National Forest Inventory (INFC 2005) on 311 sample points were used for model calibration, as well as new field data acquired specifically for ALForLab project on 143 angle count samples. A series of regression models to predict volume and its corresponding aboveground biomass (dry and fresh weight) were developed and digital maps at different spatial resolutions were produced, as well as their estimate uncertainties. These models and their mapping products are also an important part of the new-establishing forest Decision Support System CFOR. The adopted models, though based on the same mathematical equation, have specific coefficients for different species and groups of species, according to a forest type classification system compatible with the fourth level of Corine Land Cover. In this way it is possible to apply the models without accessing more detailed forest type maps. All estimation methods and procedures are consistent with national forest inventory models, and with the other new tools proposed by ALForLab project to estimate timber volume, such as the regional tariffs and the field sampling inventory procedures. R² adjusted values (for models at the highest typological detail) are between 60% and 85%, whereas uncertainties of timber volume estimate (ESS%) range from 25% (for main forest species) up to 50% (for less spread forest types). All processing steps to produce digital maps were performed on open-source environment (R and QGIS).

Keywords: ALS, LiDAR, Timber Volume, Forest Biomass, Estimation Models, CHM, ALForLab

Received: Feb 09, 2017; Accepted: Apr 19, 2017; Published online: May 15, 2017

Citation: Scrinzi G, Floris A, Clementel F, Bernardini V, Chianucci F, Greco S, Michelini T, Penasa A, Puletti N, Rizzo M, Turco R, Corona P, 2017. Modelli di stima del volume e delle fitomasse del soprassuolo arboreo delle principali formazioni forestali della Calabria mediante dati LiDAR. *Forest@* 14: 175-187 [online 2017-05-15] URL: <http://www.sisef.it/forest@/contents/?id=efor2399-014>

Introduzione

Le applicazioni della tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*, denominata anche *Airborne Laser Scanner* o ALS) nelle attività forestali sono giunte a un avanzato stadio di maturazione per ciò che riguarda la sperimentazione e la messa a punto di procedure di utilizzo pratico nel settore forestale. Il trasferimento di tali procedure alla pratica operativa è avvenuto rapidamente in Nord America e Nord Europa (Naesset et al. 2004, Hyyppä et al. 2008, Wulder et al. 2008, Nord-Larsen & Schumacher 2012, Stephens et al. 2012, Wulder et al. 2012), mentre procede più lentamente nel nostro Paese (Montaghi et al. 2013), soprattutto a causa della relativa scarsità di riprese LiDAR su estensioni sufficientemente ampie, legata al costo di acquisizione, in particolare per rilievi ad alta densità di punti (Pirotti 2011). Laddove esistenti, tali riprese non sono inoltre quasi mai specificatamente orientate al monitoraggio del patrimonio forestale (Corona et al. 2012).

La disponibilità su scala nazionale dei dati LiDAR acquisiti nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento (MATTM/PST-A 2015), pur se rilevati a risoluzioni di scansione non elevate in campagne finalizzate alla realizzazione di modelli digitali del terreno ad alta risoluzione, ha comunque consentito negli ultimi anni la messa a punto di metodi in grado di utilizzare proficuamente questa tipologia di dati (Clementel et al. 2012, Scrinzi et al. 2013). Da essi è infatti possibile estrarre informazioni a livello di popolamento forestale che possono essere impiegate per ridurre in maniera consistente il numero di rilievi a terra negli inventari (Barilotti et al. 2009).

Obiettivi

Uno degli obiettivi del progetto AlForLab è stato quindi l'impiego di tali dati LiDAR di pubblica disponibilità per la caratterizzazione dendrometrica dei boschi della Calabria, in particolare per la stima "automatica" del volume e delle fitomasse per unità di superficie (AlForLab 2015) basata esclusivamente sulla disponibilità di dati LiDAR.

In particolare due sono state le finalità principali di questa attività di ricerca: (a) la messa a punto di un sistema di modelli di stima del volume e della biomassa legnosa, applicabili alle principali formazioni forestali della Calabria, utilizzando come variabili predittive alcune "metriche" elaborate da dati LiDAR; (b) l'implementazione di tali modelli in procedure informatiche facilmente utilizzabili dai tecnici forestali e dalle amministrazioni preposte alla pianificazione e gestione del patrimonio forestale regiona-

le. Tali obiettivi sono stati costantemente coordinati con le altre attività AlForLab oggetto di altri contributi del presente numero speciale, in particolare quelle finalizzate alla realizzazione delle tariffe regionali calabresi di cubatura dei soggetti arborei (Scrinzi et al. 2017), alla messa a punto di modelli di stima campionaria al suolo del volume legnoso tramite rilievi relascopici e anche alla realizzazione del sistema di supporto alle decisioni per la gestione forestale CFOR (Puletti et al. 2017).

Materiali e metodi

Area di studio

Nel progetto AlForLab (2015) sono stati individuati quattro grandi scenari territoriali di studio, ciascuno designato come area forestale di manifestazione caratteristica di una delle quattro principali tipologie forestali regionali: le Faggete nell'area del Pollino, i cedui di Castagno nella Catena Costiera, le Pinete di Pino laricio nella Sila e le Abetine nelle Serre, per un totale di circa 140 000 ha.

In queste aree si è concentrato il rilievo di dati al suolo integrativi per la costruzione dei modelli. I dati di base derivano invece da una distribuzione estesa a tutta la regione essendo quelli derivanti dai rilievi al suolo della terza fase INFC 2005 (CFS/CREA 2005), che hanno consentito di costruire i modelli anche per altre tipologie forestali, come ad esempio i querceti decidui, aventi una certa importanza nella regione, ma poco presenti nei quattro scenari-studio (Fig. 1). L'area di studio è pertanto spazialmente corrispondente a tutte le aree al suolo, per la fase di addestramento dei modelli, e a tutta la copertura regionale disponibile, pari a circa il 90% del territorio, per l'applicazione dei modelli e la produzione delle carte tematiche (Fig. S1 – Materiale supplementare).

Dati LiDAR

I prodotti LiDAR rilevati nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento ambientale - PST e messi a disposizione del progetto AlForLab dal Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare (MATTM) sono stati forniti in formato *raster*, come DTM (modello digitale del terreno) e DSM (modello digitale della superficie), ripartiti su ritagli (*tile*) aventi ciascuno estensione di $0^{\circ}.01 \times 0^{\circ}.01$ (latitudine \times longitudine), non proiettati (in coordinate geografiche). I voli di ripresa sono stati effettuati in un arco temporale che è andato dal 2008 al 2014, pur se concentrati soprattutto nel 2011 (circa 81% del totale). La risoluzione geometrica del *pixel*, espressa in

unità angolari, era di $0^{\circ}.0001$ e corrispondeva a “circa” 1 m. La risoluzione nativa della nuvola di impulsi LiDAR era stata in media di 1.6 pp m^{-2} , registrando fino a 4 echi di ritorno dal singolo impulso in uscita dal sensore. Per poter procedere alle successive elaborazioni è stato necessario riproiettare i *tile* su sistema di riferimento UTM-WGS84 33N (coordinate metriche) e ricampionarli a una risoluzione esatta del *pixel* di $1 \times 1 \text{ m}$. Questa fase, dapprima realizzata con concatenazione semi-automatica di funzionalità in ambito QGIS, è stata successivamente ingegnerizzata e ottimizzata in ambiente R (per renderla usufruibile anche all’utenza), avendo cura di gestire, essenzialmente per sostituzione tramite interpolazione spaziale, i “no-data” già presenti nel *dataset* e quelli che si venivano a creare nelle zone di confine tra diversi *tile* a seguito del ricampionamento. Eventuali zone ampie di “no-data”, per le quali l’interpolazione spaziale avrebbe potuto dare luogo a valori non verosimili, sono state lasciate con i valori “no-data” immutati. Le principali caratteristiche tecniche dei voli e dei dati LiDAR sono riportate in Tab. 1.

Il Modello Digitale delle Chiome (CHM) necessario alle successive elaborazioni è stato calcolato come differenza algebrica tra DSM e DTM, ponendo a valore zero tutti i *pixel* aventi altezza inferiore a due metri, valore-soglia usuale per escludere la vegetazione non arborea (Naesset 2002). Porzioni del CHM attribuibili a elementi non arborei, quali pale eoliche, viadotti, costruzioni rurali e altre, sono state escluse dall’analisi, mentre valori eccessivamente elevati del CHM in corrispondenza dello strato arboreo, ritenuti *outlier*, sono stati modificati tramite interpolazione spaziale con i dati vicini (parametro mediana). Approfondimenti su metodi e procedure adottati per la produzione automatizzata di CHM il più possibile privi di dati aberranti sono riportati in Floris et al. (2017). Un esempio di CHM è riportato in Fig. S2 (Materiale supplementare).

Rilievi dendrometrici sul terreno

Per mettere a punto i modelli oggetto di questo studio sono stati utilizzati sia dati al suolo INFC (anno di riferimento 2006, 311 osservazioni), sia dati al suolo rilevati appositamente nel progetto AIForLab (anno 2015, 143 osservazioni). Tutte le aree sono state accuratamente georeferenziate tramite posizionamento GPS con ricevitori di classe GIS (Trimble modelli PRO-XR, GeoXT 6000 e Juno SD), come media stazionaria di 100-170 posizioni e correzione differenziale in *post-processing*.

Per ciascuna delle aree di saggio al suolo è stato

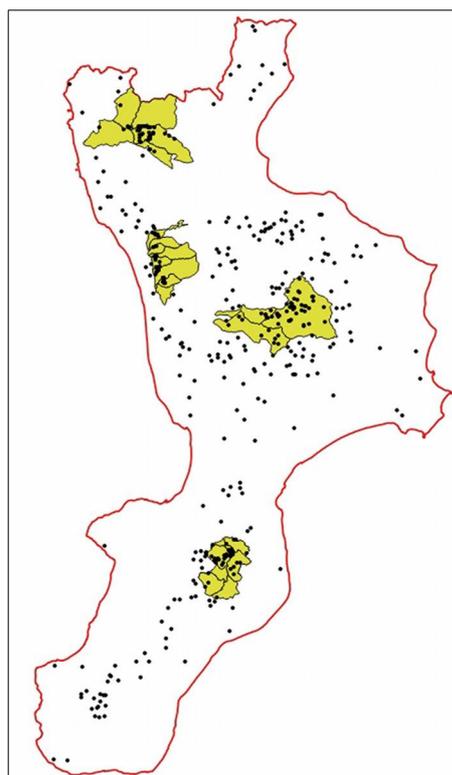


Fig. 1 - I quattro scenari studio del progetto AIForLab (in verde chiaro) e i punti di campionamento al suolo (terza fase INFC-2005 più punti AIForLab) impiegati per la costruzione dei modelli LiDAR (in nero).

calcolato il volume riferito all’ettaro dei soggetti arborei con diametro $\geq 4.5 \text{ cm}$. Nelle aree INFC, soggette a cavallettamento totale e a rilievo ipsometrico secondo le modalità riportate da Di Cosmo et al. (2011), si è pervenuti a tale volume applicando individualmente a ciascun albero i modelli a doppia en-

Tab. 1 - Metadati dei rilievi ALS LiDAR (PST-MATTM)

Caratteristica	Valore
Sensore <i>laser scanner</i>	ALTM System Optech
Angolo di scansione	25°
Altezza di volo	1500-1800 m agl
Frequenza degli impulsi	100 kHz
Densità punti al suolo	1.6 pp m^{-2}
Impronta al suolo	25-30 cm
Accuratezza altimetrica (1σ)	15-30 cm
Numero di ritorni	4
Epoca dei voli	2008-2014 (con prevalenza 2011)

trata INFC (Tabacchi et al. 2011), assegnando a ciascun albero misurato per il diametro l'altezza della curva guida tariffaria corrispondente all'indicatore di tariffa TaCAL (Scrinzi et al. 2017), calcolato sugli alberi modello dell'altezza rilevati nella specifica area di saggio nella campagna INFC (in media 8 soggetti per unità campionaria). Pertanto i valori di altezza ottenuti possono essere leggermente diversi da quelli utilizzati per le stime INFC. Si ricorda che il volume cui si fa riferimento nei modelli INFC e nel sistema tariffario TaCAL è quello del fusto e dei rami, in entrambi i casi fino alla sezione diametrica minima di 5 cm. Il coefficiente di espansione dei dati unitari all'ettaro è dato dal rapporto $1/a$, con a pari alla superficie in ha dell'area di saggio (raggio 4 m per gli alberi con $d \geq 4.5$ cm, raggio 13 m per gli alberi con $d \geq 9.5$ cm).

Nelle unità campionarie integrative AlForLab, che erano di tipo relascopico con misurazione del diametro di tutti gli alberi inclusi (alberi "IN") e con rilievo dell'altezza di 8 alberi, è stato calcolato individualmente il volume di tutti gli alberi IN di ciascuna prova di numerazione angolare (PNA), previa assegnazione a ciascun albero dell'altezza della curva guida tariffaria TaCAL corrispondente all'indicatore di tariffa individuato sugli alberi modello misurati in altezza, con procedura analoga a quella adottata per le aree INFC. I dati di volume riferiti all'ettaro sono stati ottenuti mediante "ricostruzione del popolamento virtuale" secondo il metodo di Bitterlich (1984). L'idoneità delle prove di numerazione angolare per la calibrazione di modelli che usino dati tele-rilevati, soprattutto quando la variabile in stima sia il volume, è stata dimostrata in diversi studi (Hollaus et al. 2007, 2009, Maltamo et al. 2007, Jochem et al. 2011, Tonolli et al. 2011, Scrinzi et al. 2015, Tomppo et al. 2016).

Le principali statistiche descrittive del volume a ettaro calcolato dai rilievi al suolo, riferite alle aree aventi copertura LiDAR, sono riportate in Tab. 2.

Estrazione delle metriche CHM per ciascuna unità campionaria

In corrispondenza delle coordinate di ogni unità campionaria al suolo (sia INFC che AlForLab), sul supporto LiDAR CHM è stata individuata un'area circolare corrispondente alla superficie dell'unità campionaria individuata al suolo. Nel caso delle aree di saggio INFC è stato individuato un cerchio con raggio fisso di 13 m, mentre, per le aree relascopiche AlForLab, che sono da ritenere "a raggio variabile", è stata dimensionata e individuata sul CHM un'area

circolare di esplorazione relascopica locale con raggio di volta in volta variabile calcolato con la procedura messa a punto da Matérn (1969) (vedi Scrinzi et al. 2015).

Una volta prodotti i CHM per i singoli *tile* interessati da punti di campionamento al suolo, sono state estratte con funzionalità GIS di *Map Algebra* (statistiche zonali), per l'estensione di ciascuna area di saggio (INFC) o PNA (AlForLab), le principali metriche presumibilmente correlate al volume legnoso: media, mediana, minimo, massimo, deviazione standard dei valori di altezza (in metri). Si sottolinea che tali calcoli delle metriche includono tutti i *pixel* del CHM locale estratto, compresi quelli che evidenziano altezza del CHM pari a zero (echi del suolo non coperto da strato arboreo o con altezza della vegetazione inferiore a 2 m). In tal modo, come da esperienze realizzate in altri studi, le metriche estratte interpretano implicitamente anche la densità locale, parametro che influisce, con le altezze dei soggetti presenti, a "spiegare" in termini previsionali il volume a ettaro riscontrato al suolo.

Analisi dei dati e studio dei modelli di stima del volume

Considerato che le epoche dei rilievi a terra erano sensibilmente diverse tra le due fonti di dati, ed entrambe diverse dal riferimento temporale delle acquisizioni LiDAR, si è attuata una sincronizzazione dei dati di volume rilevati al suolo rispetto all'anno di riferimento 2011, applicando ai due *dataset* (INFC e AlForLab) valori di incremento corrente di volume (positivo o negativo) ricavati, rispettivamente, dalle stime di incremento corrente INFC (per unità campionaria) per il primo gruppo (CFS/CREA 2005) e dagli incrementi rilevati in campo con metodo diretto (prelievo di carotine incrementali con succhiello di Pressler su 8 alberi modello per PNA) per il gruppo delle aree AlForLab.

A tale sincronizzazione è seguita una necessaria selezione riguardante: (a) punti INFC privi di copertura LiDAR PST-MATTM; (b) punti rivelatisi *outlier* (posizionamento GPS palesemente incongruente, interventi di taglio o schianti o cambi di uso del suolo intervenuti tra l'epoca del rilievo a terra e il volo LiDAR).

È stato di conseguenza possibile utilizzare 240 punti INFC. Dei punti AlForLab rilevati al suolo (PNA relascopiche) è stata fatta una analoga selezione, che ha portato a un set effettivamente utilizzabile di 137 punti sui 143 rilevati. Nel complesso il *dataset* di calibrazione è risultato quindi costituito da 377 os-

Tab. 2 - Statistiche distributive della variabile dipendente V ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) rilevata al suolo sulle 377 unità campionarie.

Dettaglio modelli	Tipo di formazione	Parametri distributivi di V ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)					
		casi	media	mediana	min	max	CV
elevato	Abetine di Abete bianco	39	586.81	549.75	238.19	1197.09	0.40
	Pinete di Pino laricio	89	536.66	473.95	24.35	1850.55	0.66
	Form. di conifere mediterranee	15	156.91	148.81	1.78	510.20	0.75
	Querceti sempreverdi	14	134.33	108.91	9.28	406.42	0.85
	Eucalitteti	10	75.76	78.05	10.84	132.47	0.64
	Faggete	84	459.46	450.58	133.62	972.60	0.44
	Castagneti	56	218.76	178.82	28.16	680.76	0.71
	Querceti caducifogli	43	160.82	103.14	9.02	653.77	0.90
	Form. ad altre latifoglie	27	141.07	100.02	2.25	491.19	0.95
	<i>totale</i>	377	363.95	297.77	1.78	1850.55	0.79
medio	Form. di conifere montane	95	584.90	507.35	77.57	1850.55	0.58
	Form. miste di conifere/latifoglie mont.	40	441.07	442.56	24.35	1179.95	0.52
	Form. di conifere mediterranee	13	155.16	117.81	1.78	510.20	0.82
	Form. di latifoglie non montane	88	136.64	96.63	2.25	653.77	0.96
	Form. di latifoglie montane	77	467.98	460.85	133.62	972.60	0.44
	Castagneti puri o misti a prev. di C.	56	218.76	178.82	28.16	680.76	0.71
	<i>totale</i>	369	367.30	303.76	1.78	1850.55	0.79
basso	Formazioni di conifere	108	533.17	483.25	1.78	1850.55	0.66
	Formazioni miste di conifere e latif.	49	403.49	390.45	24.35	1179.95	0.57
	Formazioni di latifoglie	220	272.07	215.48	2.25	972.60	0.81
	<i>totale</i>	377	363.95	297.77	1.78	1850.55	0.79

servazioni.

Un primo passo di analisi è consistito in una esplorazione delle relazioni tra le variabili esplicative potenziali di cui sopra e la variabile dipendente osservata, producendo gli *scatterplot* tra ciascuna delle metriche CHM prese in considerazione e il volume totale a ettaro (V). Al tempo stesso è stata eseguita una analisi preliminare di regressione lineare multipla su tutto il *dataset*, senza ripartizione delle osservazioni in base al tipo di formazione forestale, utilizzando come potenziali variabili esplicative tutte le metriche estratte in precedenza dal CHM. La metrica $Hmean$ (media delle altezze CHM nell'area di saggio o PNA) si è confermata essere la variabile di gran lunga più significativa per spiegare in termini previsionali il volume al suolo attraverso dati ALS LiDAR, come peraltro riscontrato in numerose esperienze precedenti (Floris et al. 2010, Clementel et al. 2012, Torresan et al. 2012) e dalla letteratura esistente (Ioki et al. 2010, Tonolli et al. 2011), soprattutto quando i dati CHM LiDAR derivino da scansioni ALS a bassa risoluzione.

Per tale motivo e tenuto conto che la numerosità non elevata del *dataset* suggeriva di contenere il nu-

mero di variabili predittive da includere nei modelli, tutte le successive analisi riguardano esclusivamente detta variabile $Hmean$, pur non escludendo che in futuri eventuali affinamenti dei modelli possa essere recuperato il contributo (seppur presumibilmente limitato) di altre variabili esplicative.

Si è quindi provveduto alla ripartizione dell'intero *dataset* di unità campionarie in *subset* riconducibili a formazioni di una determinata specie principale prevalente (livello dei modelli di massimo dettaglio), di gruppi di specie consimili anche in riferimento all'area altitudinale di vegetazione (livello di dettaglio intermedio), fino a giungere a una semplice ripartizione conifere/latifoglie/formazioni miste (livello dei modelli di dettaglio minimo). In Tab. 3 sono riportate le statistiche descrittive, riferite alla metrica $Hmean$, per i diversi *subset* prodotti.

La stima delle fitomasse

Per la stima delle fitomasse epigee riferite all'ettaro si sarebbe potuto procedere con approccio analogo a quanto fatto per la costruzione dei modelli LiDAR di stima del volume, mettendo in relazione i valori di fitomassa (e non più di volume) a ettaro riscontrati

Tab. 3 - Statistiche distributive della variabile previsionale *Hmean* (m) determinata su ciascuna porzione CHM-LiDAR delle 377 unità campionarie.

Dettaglio modelli	Tipo di formazione	Parametri distributivi di <i>Hmean</i> (m)					
		casi	media	mediana	min	max	CV
elevato	Abetine di Abete bianco	39	20.38	21.38	8.86	27.39	0.23
	Pinete di Pino laricio	89	13.15	12.48	1.71	28.65	0.47
	Form. di conifere mediterranee	15	6.19	5.03	0.08	17.20	0.63
	Querceti sempreverdi	14	7.08	7.35	1.43	14.23	0.61
	Eucalitteti	10	3.37	2.98	0.40	6.39	0.63
	Faggete	84	18.77	19.49	6.48	29.05	0.30
	Castagneti	56	9.21	9.02	0.62	23.88	0.57
	Querceti caducifogli	43	8.51	6.62	1.07	22.27	0.69
	Form. ad altre latifoglie	27	9.43	7.87	0.59	23.98	0.69
<i>totale</i>	377	13.01	12.21	0.08	29.05	0.57	
medio	Form. di conifere montane	95	15.18	14.77	3.49	28.65	0.43
	Form. miste di conifere/latifoglie mont.	40	15.53	14.87	1.71	27.13	0.42
	Form. di conifere mediterranee	13	6.08	5.03	0.08	17.20	0.66
	Form. di latifoglie non montane	88	7.85	6.37	0.40	23.98	0.74
	Form. di latifoglie montane	77	19.21	20.11	6.48	29.05	0.29
	Castagneti puri o misti a prev. di C.	56	9.21	9.02	0.62	23.88	0.57
<i>totale</i>	369	13.08	12.33	0.08	29.05	0.56	
basso	Formazioni di conifere	108	14.08	13.70	0.08	28.65	0.49
	Formazioni miste di conifere e latif.	49	14.60	13.70	1.71	27.13	0.46
	Formazioni di latifoglie	220	12.12	11.24	0.40	29.05	0.63
	<i>totale</i>	377	13.01	12.21	0.08	29.05	0.78

nelle unità campionarie col medesimo *set* di metriche LiDAR locali del CHM. Infatti nota la specie e le dimensioni (d, h) dei soggetti presenti, al pari del volume individuale, specifiche equazioni INFC 2005 di Tabacchi et al. (2011) per le fitomasse avrebbero potuto fornire i dati individuali e per sommatoria i dati globali riferiti a ettaro, come nel caso del volume legnoso. In tal caso però, con perequazioni prive di vincoli espliciti di interdipendenza reciproca tra volume e (rispettive) fitomasse per unità di superficie, si sarebbe potuti giungere a determinare modelli potenzialmente incongruenti tra loro.

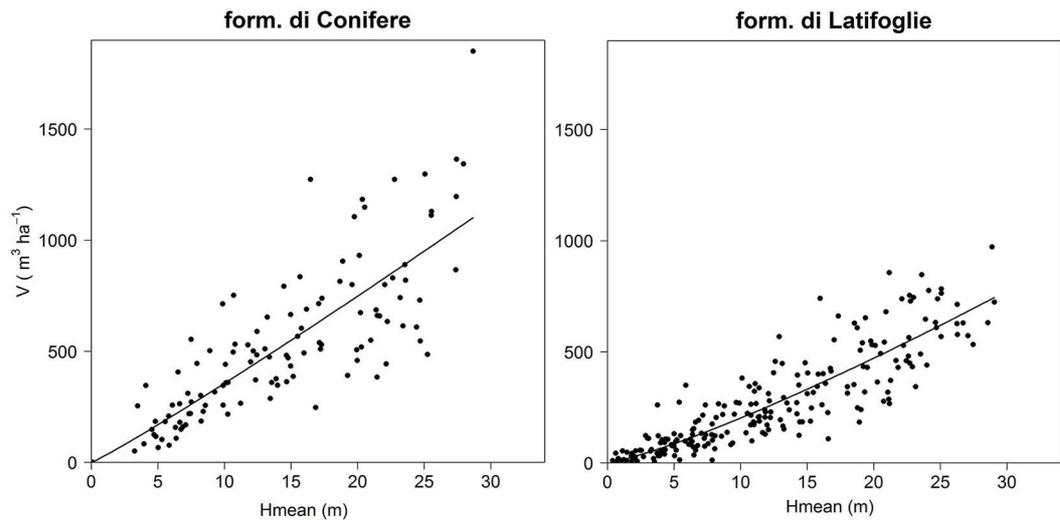
Gli Autori citati in precedenza riportano peraltro anche i coefficienti medi, diversi per ciascuna specie, di trasformazione del volume individuale nelle rispettive fitomasse anidre (legnosa e totale) e anche rispetto al peso fresco. Nel presente studio sono stati adottati tali coefficienti medi e il passaggio da volume a fitomasse è avvenuto calcolando un coefficiente di trasformazione ponderato per ciascun modello (gruppo specifico), sulla base delle composizioni medie in specie osservate nei punti di campionamento al suolo afferenti al modello/gruppo stesso. Si è ritenuto potesse essere utile fornire, oltre ai due coeffi-

cienti relativi alle componenti di peso secco, anche il coefficiente di trasformazione in peso fresco del volume legnoso, facendo ricorso anche in questo caso ai valori riportati in Tabacchi et al. (2011). Dal punto di vista operativo, per ottenere una descrizione digitale ("carta") della fitomassa presente in un determinato ambito, è sufficiente moltiplicare i valori della carta del volume a ettaro per il coefficiente idoneo riportato in Tab. S1 (Materiale supplementare).

La produzione di carte tematiche

Le funzioni di stima messe a punto, dirette per i volumi e basate su coefficienti medi per le fitomasse, sono state implementate in ambiente GIS *open source* (QGIS), per la produzione di carte tematiche del volume e delle fitomasse a ettaro. Tutte le elaborazioni necessarie a tal fine sono state automatizzate tramite *script* di R eseguibili in ambiente QGIS. Le informazioni indispensabili richieste all'utente per la produzione di una carta del volume (e delle fitomasse) sono l'area di interesse (in formato *shapefile*) e il livello di dettaglio (alto, medio, basso) per il quale si desidera avere le stime. Altre informazioni facoltative sono uno *shapefile* dei comparti assestamentali (parti-

Fig. 2 - Andamenti delle funzioni di regressione di V sulla variabile esplicativa LiDAR $Hmean$, per i modelli a dettaglio meno elevato: formazioni di Conifere e di Latifoglie.



celle, comprese, eventuali lotti di utilizzazione) che, se presente, consente l'evidenziamento delle stime anche a livello di comparto, con calcolo di valori medi e totali per ciascuno di essi, e uno *shapefile* delle formazioni forestali classificate secondo codifica AL-ForLab, in assenza del quale viene comunque impiegata la classificazione *Corine Land Cover* IV livello. Un esempio di interfaccia utente del modulo R che guida alla produzione delle carte del volume e delle

fitomasse è riportato in Fig. S3 (Materiale supplementare). Si sottolinea che tale possibilità è conseguibile in qualsiasi ambito territoriale boschivo della Calabria, purché dotato di copertura LiDAR MAT-TM-PST (oltre il 90% del territorio).

Risultati e discussione

Nello sviluppo dei modelli in studio la variabile in stima (dipendente) era ovviamente il volume a ettaro

Tab. 4 - Parametri dei modelli di stima del volume a ettaro attraverso dati da telerilevamento ALS LiDAR.

Dettaglio modelli	Tipo di formazione	modello: $V \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{)} = a \cdot Hmean^b$			
		casì	a	b	adjR ²
elevato	Abetine di Abete bianco	39	3.5246	1.6818	0.584
	Pinete di Pino laricio	89	17.1049	1.3164	0.782
	Form. di conifere mediterranee	15	19.0156	1.1347	0.819
	Querceti sempreverdi	14	12.9313	1.1819	0.683
	Eucalitteti	10	21.0355	1.0000	0.848
	Faggete	84	17.9052	1.1045	0.531
	Castagneti	56	14.9746	1.1813	0.684
	Querceti caducifogli	43	12.6225	1.1697	0.780
	Form. ad altre latifoglie	27	8.1856	1.2354	0.707
	<i>totale</i>	377			
medio	Form. di conifere montane	95	25.8903	1.1377	0.632
	Form. miste di conifere/latifoglie montane	40	24.5641	1.0506	0.677
	Form. di conifere mediterranee	13	17.6125	1.1824	0.921
	Form. di latifoglie non montane	88	12.1060	1.1521	0.732
	Form. di latifoglie montane	77	15.9776	1.1400	0.525
	Castagneti puri o misti a prevalenza di Castagno	56	14.9746	1.1813	0.684
<i>totale</i>	369				
basso	Formazioni di conifere	108	23.3101	1.1713	0.693
	Formazioni miste di conifere e latifoglie	49	23.1523	1.0624	0.692
	Formazioni di latifoglie	220	12.1274	1.2221	0.768
	<i>totale</i>	377			

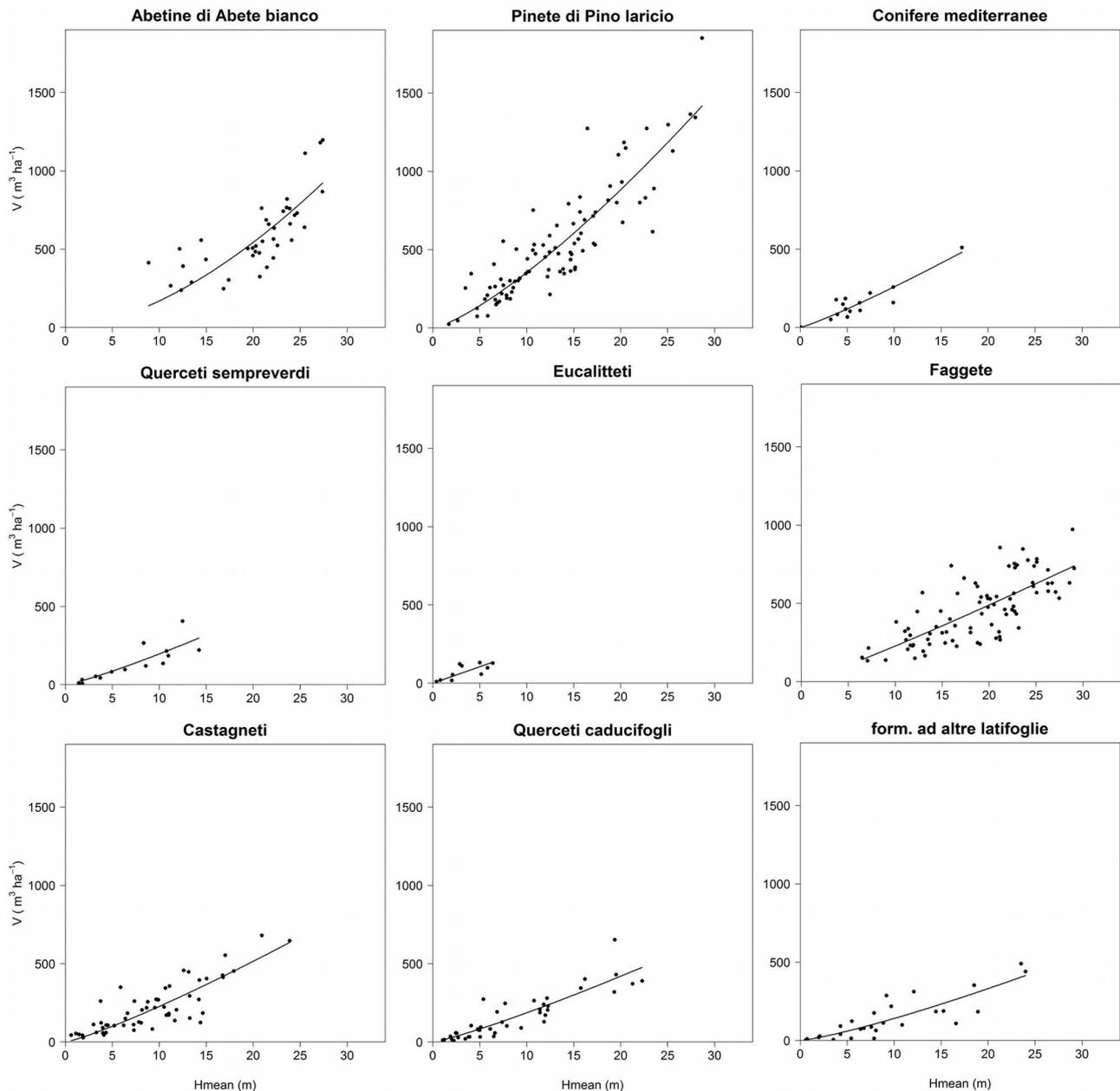


Fig. 3 - Andamenti delle funzioni di regressione di V sulla variabile esplicativa LiDAR $Hmean$, per i modelli di stima LiDAR del volume a ettaro a dettaglio elevato.

($V, m^3 ha^{-1}$) riscontrato al suolo nelle unità campionarie. Osservando gli andamenti di V in funzione di $Hmean$ (Fig. 2), tenuto conto di numerose precedenti esperienze di modellizzazione di questa relazione, si è scelto di adottare una struttura funzionale dei modelli del tipo (eqn. 1):

$$V = a \cdot Hmean^b$$

dove i coefficienti a e b sono diversi per ciascun tipo di formazione forestale considerata.

Questa scelta presenta il vantaggio di adottare un'unica struttura funzionale comune a tutti i modelli di stima, con una funzione dotata di elasticità (assume andamento rettilineo per $b=1$) e con positive ripercussioni anche sulla facilità di implementazione in procedure di calcolo automatico e produzione di *layer* cartografici in continuo.

Una preliminare analisi statistica, effettuata imponendo alla struttura funzionale di cui sopra anche la presenza di un parametro di intercetta, ha messo in evidenza (per tutti i tipi di composizione) che tale

Tab. 5 - Incertezze di stima del volume a ettaro dei modelli (sui campioni interi e dopo cross-validazione di tipo *leave-one-out*), riferite a superfici pari a quelle delle unità campionarie al suolo di calibrazione dei modelli. (*): come da Tab. 2.

Dettaglio modelli	Tipo di formazione	Casi	media $V^{(*)}$ ($m^3 ha^{-1}$)	modelli su intero campione		leave one out cross-validation models	
				RMSE ($m^3 ha^{-1}$)	ESS (%)	RMS Test Error ($m^3 ha^{-1}$)	ESS (%)
elevato	Abetine di Abete bianco	39	586.8	148.23	25.26	161.09	27.45
	Pinete di Pino laricio	89	536.6	162.99	30.37	169.12	31.51
	Form. di conifere mediterranee	15	156.9	46.82	29.84	70.50	44.93
	Querceti sempreverdi	14	134.3	59.32	44.16	79.73	59.36
	Eucalitteti	10	75.8	34.66	45.76	35.99	47.51
	Faggete	84	459.5	135.92	29.58	138.97	30.25
	Castagneti	56	218.8	86.17	39.39	89.80	41.05
	Querceti caducifogli	43	160.8	66.24	41.19	72.60	45.14
	Form. ad altre latifoglie	27	141.1	70.06	49.66	77.80	55.15
<i>totale</i>		377	363.9	-	-	-	-
medio	Form. di conifere montane	95	584.9	203.40	34.77	209.76	35.86
	Form. miste di conifere/latifoglie montane	40	441.1	128.01	29.02	138.04	31.30
	Form. di conifere mediterranee	13	155.16	33.03	21.29	36.70	23.65
	Form. latifoglie non montane	88	136.6	67.00	49.03	69.62	50.95
	Form. latifoglie montane	77	468.0	139.25	29.76	142.67	30.49
	Castagneti o puri e misti a prev. di Castagno	56	218.8	86.17	39.39	89.80	41.05
<i>totale</i>		369	367.3	-	-	-	-
basso	Form. di conifere	108	533.2	192.21	36.05	197.82	37.10
	Form. miste di conifere/latifoglie	49	403.5	124.41	30.83	132.65	32.88
	Form. di latifoglie	220	272.1	106.10	39.00	107.36	39.46
	<i>totale</i>		377	363.9	-	-	-

parametro non è significativamente diverso da zero (se la metrica locale CHM H_{mean} è pari a zero, il volume a ettaro stimato è a sua volta pari a zero), confermando definitivamente la possibilità di adottare una configurazione del modello come indicato nella eqn. 1.

L'elenco dei tipi di formazione e i relativi coefficienti dei modelli messi a punto sono riportati in Tab. 4. Per i modelli a dettaglio elevato, i grafici con le funzioni di perequazione sono riportati in Fig. 3.

Si osservi che i modelli, in particolare quelli a livello di dettaglio elevato, sono costruiti su numerosità di osservazioni a terra in alcuni casi esigue (ad es., Eucalitti e altri gruppi), ragione per cui le stime prodotte avranno in alcuni casi margini di incertezza

ampi; al tempo stesso una certa prudenza andrà posta nel determinare l'intervallo di validità dei modelli stessi, che non dovrà in linea di principio estendersi troppo dall'estremo superiore dei valori di H_{mean} realmente osservati e desumibili dalla Tab. 3 e dalla Fig. 3.

Le incertezze di stima dei modelli realizzati, espresse dai parametri *root mean square error* (RMSE) ed errore standard di stima (ESS%), sono riportate in Tab. 5. I valori di ESS% sono abbastanza in linea con quelli ottenuti in altri studi nei quali siano state adottate analoghe modalità di stima (Hollaus et al. 2007, 2009, Tonolli et al. 2011, Scrinzi et al. 2015). Si noti il fisiologico aumento di dette incertezze nel passare dai modelli completi di tutte le osservazioni usati in

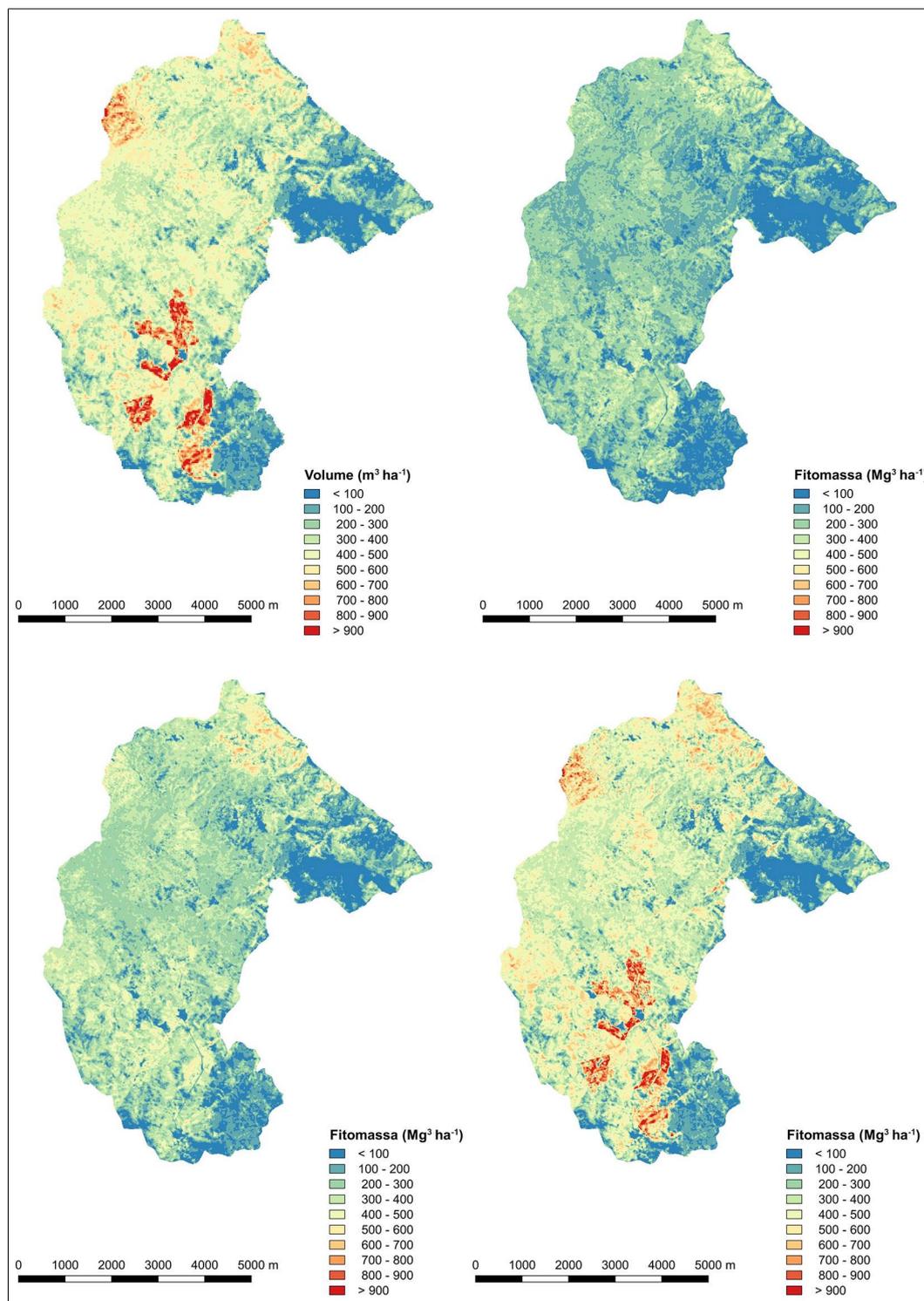


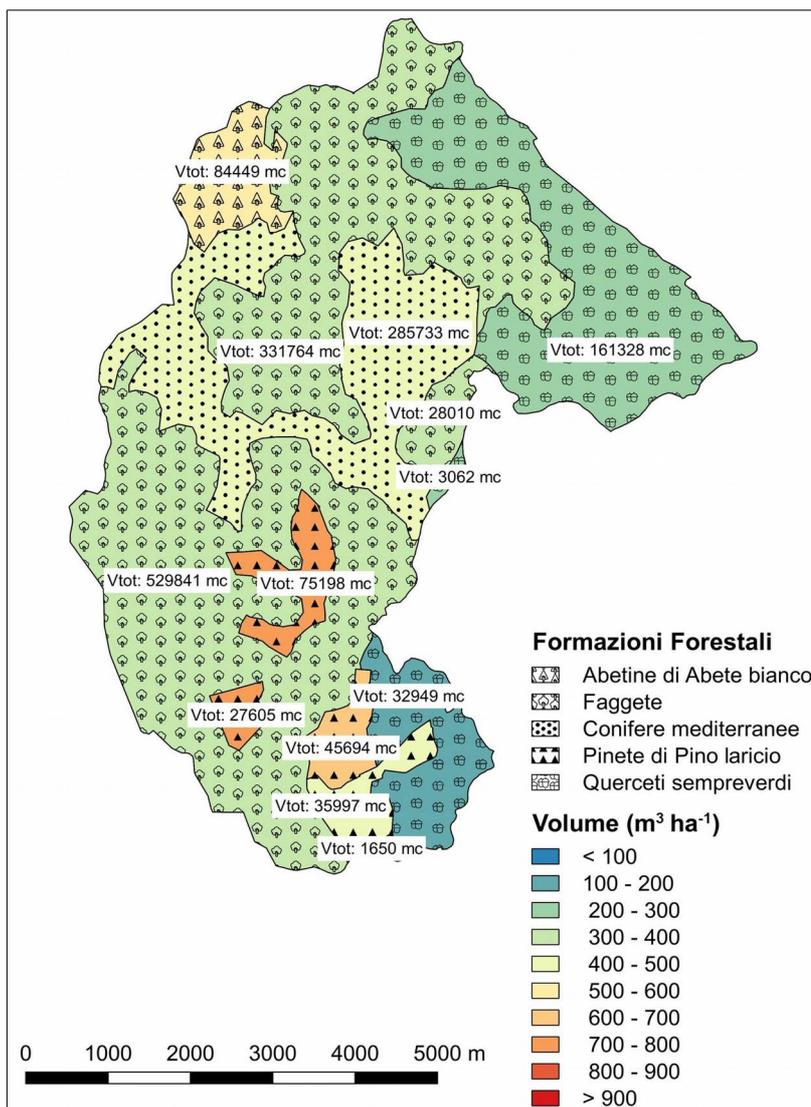
Fig. 4 - Piani informativi raster GIS del volume a ettaro e delle fitomasse a ettaro nel comune di Stilo (Serre calabresi): volume a ettaro (in alto a sinistra), fitomassa anidra di fusto e rami grossi (in alto a destra), fitomassa anidra epigea totale (in basso a sinistra), fitomassa fresca di fusto e rami grossi (in basso a destra). Risoluzione 30 m.

addestramento a quelli della cross-validazione. Tale aumento di errore è più marcato per le specie con pochi dati di calibrazione al suolo (Eucalitteti, Querceti sempreverdi), nei quali una singola osservazione può incidere maggiormente sulla predizione, mentre è minore e spesso trascurabile nei modelli delle specie più rappresentate da osservazioni al suolo: nelle Faggete, ad esempio, ESS% passa da 29.58% a

30.25%, restando di fatto invariato ai fini applicativi.

Una considerazione va fatta al riguardo di tali valori di incertezza: essi sono riferiti a stime su superfici analoghe a quelle usate nella costruzione dei modelli, cioè le aree di saggio al suolo, che nel caso in studio hanno estensione di alcune centinaia di metri quadrati. I principi di propagazione degli errori di stima per aggregazione (Freese 1984), confermati da

Fig. 5 - Piano informativo vettoriale GIS del volume a ettaro per le diverse formazioni forestali (comune di Stilo). Il valore all'interno di ogni poligono è il volume legnoso totale stimato per il comparto (m^3).



alcuni studi recenti in analogo ambito (Scrini et al. 2015), mostrano che, per modelli non distorti da errori sistematici, all'aumento delle dimensioni dell'area stimata corrisponde una rapida diminuzione dell'incertezza di stima che già alle superfici tipiche delle unità gestionali sub-particellari ad elevato dettaglio spaziale (1-4 ha) si attesta su valori ampiamente compatibili con l'uso pratico delle stime stesse (4-8%).

Per quanto attiene alla realizzazione delle carte tematiche, è opportuno che il livello di dettaglio al quale vengono prodotte sia congruente con la risoluzione e l'accuratezza della compartimentazione tipologica: l'applicazione di modelli di singola specie a una classificazione delle specie poco precisa potrebbe dar luogo a stime distorte. Di conseguenza, in assenza di una carta dettagliata e accurata delle formazioni forestali (congruente con i tipi di modelli impiegati) è preferibile scegliere un grado medio o bas-

so di dettaglio. Un esempio di carte in continuo (*raster*) del volume e della fitomassa legnosa, riferite a una proprietà comunale dell'estensione di circa 4300 ha, è riportato in Fig. 4, mentre in Fig. 5 è presentata una cartografia della stessa area ma con i valori medi a ettaro e totali aggregati sui poligoni delle diverse formazioni forestali.

Conclusioni

I modelli di stima presentati in questo studio rappresentano un primo esempio di utilizzo di dati pubblicamente disponibili (INFC-CFS, PST-MATTM) per la realizzazione di prodotti di stima automatica su base LiDAR della consistenza georeferenziata delle risorse forestali a supporto delle attività forestali, validi su ampia scala (inventario forestale regionale), ma configurabili, senza sostanziale variazione della precisione, a dettaglio territoriale più elevato, ad esempio nel caso di inventari forestali di compenso-

rio o Parco, di piano di assestamento forestale a scala aziendale o sovraziendale.

Una naturale evoluzione dello studio consiste nell'implementare le procedure automatizzate di produzione di piani tematici GIS dei volumi e delle fitomasse, già messe a disposizione in questo caso come *script* di R (Box S1 in Materiale supplementare), in codice nativo incorporato in QGIS, facilitandone l'uso e ampliando in questo modo la platea di utenti potenziali. Tale attività è già in corso e costituirà una componente del citato sistema di supporto alle decisioni CFOR.

Ringraziamenti

Questo studio è stato realizzato nell'ambito del Progetto "ALForLab" (PON03PE_00024_1) cofinanziato dal Programma Operativo Nazionale Ricerca e Competitività (PON R&C) 2007-2013, attraverso il Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) e risorse nazionali (Fondo di Rotazione (FDR) - Piano di Azione e Coesione (PAC) MIUR).

Gli autori sono particolarmente grati al Corpo Forestale dello Stato per aver messo a disposizione dello studio i dati nativi dei rilievi inventariali INFC 2005 della Calabria, ed al Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, per aver messo a disposizione dello studio i dati LiDAR rilevati nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale.

Bibliografia

ALForLab (2015). Sito ufficiale del progetto. Web site. [online] URL: <http://www.alforlab.it/>

Barilotti A, Pirotti F, Lingua E (2009). Dati lidar da aeromobile. Stime di variabili forestali. *Sherwood Foreste ed Alberi Oggi* 156: 17-23.

Bitterlich W (1984). The relascope idea. Relative measurements in Forestry. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal (Slough), UK, pp. 242. [ISBN 0-85198-539-4]

Clementel F, Colle G, Farruggia C, Floris A, Scrinzi G, Torresan C (2012). Estimating forest timber volume by means of "low cost" LiDAR data. *Italian Journal of Remote Sensing* - 2012 44 (1): 125-140. - doi: [10.5721/ItJRS201244110](https://doi.org/10.5721/ItJRS201244110)

Corona P, Cartisano R, Salvati R, Chirici G, Floris A, Di Martino P, Marchetti M, Scrinzi G, Clementel F, Travaglini D, Torresan C (2012). Airborne Laser Scanning to support forest resource management under Alpine, temperate and Mediterranean environments in Italy. *European Journal of Remote Sensing* 45: 27-37. - doi: [10.5721/EuJRS20124503](https://doi.org/10.5721/EuJRS20124503)

CFS/CREA (2005). *Inventario Nazionale delle Foreste e dei*

serbatoi forestali di Carbonio - INFC. Corpo Forestale dello Stato, CREA Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale, Trento. [online] URL: <http://www.inventarioforestale.org>

Di Cosmo L, Tosi V, Paletto A, Floris A (2011). I caratteri quantitativi - la terza fase. In: "L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC 2005. Secondo inventario forestale nazionale italiano. Metodi e risultati" (Gasparini P, Tabacchi G eds). Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali; Corpo Forestale dello Stato. Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Edagricole, Milano, pp. 54-59.

Floris A, Clementel F, Farruggia C, Scrinzi G (2010). Stima su base LiDAR delle provvigioni legnose forestali: uno studio per la Foresta di Paneveggio. *Rivista Italiana di Telerilevamento* 42 (3): 15-32.

Floris A, Penasa A, Michelini T, Puletti N (2017). Individuazione e correzione di *outlier* nei dati *raster* LiDAR provenienti dal Geoportale Nazionale e produzione di un CHM idoneo alla stima delle provvigioni legnose della Calabria. *Forest@ 14*: 188-201. - doi: [10.3832/efor2328-014](https://doi.org/10.3832/efor2328-014)

Freese F (1984). *Statistics for land managers*. Paeony Press, Scotland, UK, pp. 176. [ISBN 0-946941-00-9]

Hyyppä J, Hyyppä H, Leckie D, Gougeon F, Yu X, Maltamo M (2008). Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1339-1366. - doi: [10.1080/01431160701736489](https://doi.org/10.1080/01431160701736489)

Hollaus M, Wagner W, Maier B, Schadauer K (2007). Airborne laser scanning of forest stem volume in a mountainous environment. *Sensors* 2007 7 (8): 1559-1577. - doi: [10.3390/s7081559](https://doi.org/10.3390/s7081559)

Hollaus M, Wagner W, Schadauer K, Maier B, Gabler K (2009). Growing stock estimation for alpine forests in Austria: a robust lidar-based approach. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 1387-1400. - doi: [10.1139/X09-042](https://doi.org/10.1139/X09-042)

Ioki K, Imanishi J, Sasaki T, Morimoto Y, Kitada K (2010). Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. *Landscape and Ecological Engineering* 6: 29-36. - doi: [10.1007/s11355-009-0077-4](https://doi.org/10.1007/s11355-009-0077-4)

Jochem A, Hollaus M, Rutzinger M, Höfle B (2011). Estimation of aboveground biomass in alpine forests: a semi-empirical approach considering canopy transparency derived from airborne LiDAR data. *Sensors* 11 (1): 278-295. - doi: [10.3390/s110100278](https://doi.org/10.3390/s110100278)

Maltamo M, Korhonen KT, Packalén P, Mehtätalo L, Suunto A (2007). Testing the usability of truncated angle count sample plots as ground truth in airborne laser scanning based forest inventories. *Forestry* 80 (1) 73-81. - doi:

- 10.1093/forestry/cpl045
- Matérn B (1969). Wie Groß ist die "Relaskop-Fläche"? Allgemeine Forstzeitung, 79. Jahrgang - Folge 2.
- MATTM/PST-A (2015). Sito ufficiale del Geoportale nazionale. Web site. [online] URL: <http://www.pcn.minambiente.it/GN/progetti/piano-straordinario-di-telerilevamento/>
- Montaghi A, Corona P, Dalponte M, Gianelle D, Chirici G, Olsson H (2013). Airborne laser scanning of forest resources: an overview of research in Italy as a commentary case study. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 23: 288-300.
- Naesset E (2002). Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. Remote Sensing of Environment 80 (2002) 88- 99.
- Naesset E, Gobakken T, Holmgren J, Hyypä H, Hyypä J, Maltamo M (2004). Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. Scandinavian Journal of Forest Research 19: 482-499.
- Nord-Larsen T, Schumacher J (2012). Estimation of forest resources from a country wide laser scanning survey and national forest inventory data. Remote Sensing of Environment 119: 148-157. - doi: [10.1016/j.rse.2011.12.022](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.022)
- Pirotti F (2011). Analysis of full-waveform LiDAR data for forestry applications: a review of investigations and methods. iForest 4: 100-106. - doi: [10.3832/ifor0562-004](https://doi.org/10.3832/ifor0562-004)
- Puletti N, Floris A, Scrinzi G, Chianucci F, Colle G, Michellini T, Pedot N, Penasa A, Scalercio S, Corona P (2017). CFOR: un sistema di supporto alle decisioni per le foreste in Calabria. Forest@ 14: 135-140. - doi: [10.3832/efor2363-014](https://doi.org/10.3832/efor2363-014)
- Scrinzi G, Clementel F, Colle G, Corona P, Floris A, Maistrelli F, Chirici G, Mura M, Oradini A, Bertani R, Barbati A, Quatrini A, Marchetti M (2013). Impiego di dati LiDAR di pubblica disponibilità per il monitoraggio forestale a grande e piccola scala: il progetto ITALID. In: "Atti del IX Congresso Nazionale SISEF". Bolzano (Italy) 16-19 Set 2013. [online] URL: <http://www.sisef.it/sisef/congresso-ix/>
- Scrinzi G, Clementel F, Floris A, Gasparini P (2017). TACAL: un sistema di tariffe del volume legnoso e delle fitomasse delle specie forestali della Calabria. Forest@ 14: 60-74. - doi: [10.3832/efor2278-013](https://doi.org/10.3832/efor2278-013)
- Scrinzi G, Clementel F, Floris A (2015). Angle count sampling reliability as ground truth for area-based LiDAR applications in forest inventories. Canadian Journal of Forest Research 45 (4): 506-514. - doi: [10.1139/cjfr-2014-0408](https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0408)
- Stephens PR, Kimberley MO, Beets PN, Paul TSH, Searles N, Bell A, Brack C, Broadley J (2012). Airborne scanning LiDAR in a double sampling forest carbon inventory. Remote Sensing of Environment 117: 348-357. - doi: [10.1016/j.rse.2011.10.009](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.009)
- Tabacchi G, Di Cosmo L, Gasparini P (2011). Aboveground tree volume and phytomass prediction equations for forest species in Italy. European Journal of Forest Research 130 (6): 911-934. - doi: [10.1007/s10342-011-0481-9](https://doi.org/10.1007/s10342-011-0481-9)
- Tomppo E, Kuusinen N, Mäkisara K, Katila M, McRoberts RE (2016). Effects of field plot configurations on the uncertainties of ALS-assisted forest resource estimates. Scandinavian Journal of Forest Research 1-13. - doi: [10.1080/02827581.2016.1259425](https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1259425)
- Tonolli S, Dalponte M, Vescovo L, Rodeghiero M, Bruzzone L, Gianelle D (2011). Mapping and modeling forest tree volume using forest inventory and airborne laser scanning. European Journal of Forest Research 130 (4): 569-577. - doi: [10.1007/s10342-010-0445-5](https://doi.org/10.1007/s10342-010-0445-5)
- Torresan C, Clementel F, Floris A, Scrinzi G (2012). LiDAR e stima del volume legnoso. Un confronto con il cavallettamento totale a livello particellare. Sherwood Foreste ed Alberi Oggi 181: 25-29.
- Wulder MA, Bater CW, Coops NC, Hilker T, White JC (2008). The role of LiDAR in sustainable forest management. The Forestry Chronicle 84 (6): 807-826.
- Wulder MA, White JC, Nelson RF, Orka HO, Coops NC, Hilker T, Bater CW, Gobakken T (2012). Lidar sampling for large-area forest characterization: a review. Remote Sensing of Environment 121: 196-209. - doi: [10.1016/j.rse.2012.02.001](https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.001)

Materiale Supplementare

Tab. S1 - Coefficienti moltiplicatori di trasformazione del volume a ettaro in fitomassa a ettaro, calcolati sulle composizioni medie ponderate dei gruppi modellistici AlForLab.

Fig. S1 - Copertura voli LiDAR della Regione Calabria (Piano Straordinario di Telerilevamento ambientale – MATTM 2014).

Fig. S2 - Ortofotocarta (a sinistra) e CHM LiDAR (a destra) del comune di Stilo (Serre calabresi).

Fig. S3 - Interfaccia utente del modulo di QGIS (implementato come script R) per la stima del volume e delle fitomasse e la produzione dei relativi piani informativi digitali.

Box S1 - Script di R per la produzione di piani tematici GIS dei volumi e delle fitomasse.

Link: Scrinzi_2399@suppl001.pdf