



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO

DIBAF

Dipartimento per la Innovazione nei sistemi
Biologici, Agroalimentari e Forestali

DIPARTIMENTO DIBAF

Corso di Dottorato di Ricerca in

ECOLOGIA FORESTALE - XXVI Ciclo

**ANALISI E STIMA DEI COMBUSTIBILI FORESTALI CON IL SUPPORTO
DI DATI TELERILEVATI DI TIPO LIDAR LOW DENSITY**

AGR/05

Tesi di dottorato di:

Dott. Alessandro Quatrini

Coordinatore del corso

Prof. Paolo De Angelis

Tutore

Prof. Piermaria Corona

Co-tutore

Dott.ssa Anna Barbati

24 giugno 2014

Sommario

1. Introduzione	2
2. Obiettivo della tesi	8
3. Materiali e metodi	9
3.1 Approccio metodologico.....	9
3.2 Area di studio	9
3.2.1 <i>Inquadramento generale</i>	9
3.2.2 <i>Inquadramento fisionomico dei popolamenti forestali</i>	10
3.3 Elaborazioni di base dei dati LIDAR.....	15
3.4 Rilievi dendrometrici in unità campione.....	17
3.5 Classificatore logico dei dati LIDAR secondo il sistema Prometheus	19
3.6 Validazione della mappatura dei modelli di combustibile Prometheus.....	23
3.6.1 <i>Validazione in base alle unità campione</i>	23
3.6.2 <i>Validazione in base a mappe tematiche</i>	23
3.7 Spazializzazione di attributi strutturali	26
4. Risultati	29
4.1 Mappatura dei modelli di combustibile di tipo Mediterraneo secondo il sistema Prometheus.....	29
4.1.1 <i>Cartografie e statistiche dei modelli di combustibile</i>	29
4.1.2 <i>Accuratezza della classificazione dei modelli di combustibile forestali (FT5,FT6,FT7)</i>	29
4.1.3 <i>Validazione della cartografia dei modelli di combustibile in base a mappe tematiche</i>	43
4.2 Stima su base spaziale di attributi strutturali	48
5. Discussione	52
5.1 Mappatura dei modelli di combustibile Prometheus attraverso dati LiDAR a bassa densità di punti	52
5.2 Obiettivo 2.....	61
6. Considerazioni conclusive	62
7. Ringraziamenti	62
8. Bibliografia	65

1. Introduzione

Il territorio italiano è caratterizzato da numerosi ambienti naturali con caratteristiche fisiche anche molto differenti tra loro. La grande variabilità delle comunità vegetali nella penisola italiana è la risultante di processi ecologici che si sviluppano in differenti condizioni climatiche, geomorfologiche e pedologiche (Blasi et al., 2004). Nelle aree italiane caratterizzate da bioclima mediterraneo, un ruolo ecologico importante è svolto dal fuoco, fattore discriminante nella evoluzione degli stadi successionali della vegetazione (Garcia et al. 2011). Gli incendi rappresentano degli eventi perturbativi con conseguenze per ogni comunità vegetale. L'intensità e la velocità di propagazione di un incendio è funzione delle caratteristiche fisico-chimiche del combustibile forestale (Bovio et al., 2014). I combustibili forestali possono essere definiti come materia organica (biomassa e necromassa) disponibile in foresta per l'innesco del fuoco e la successiva combustione (Keane et al., 2001). Da sottolineare però che la componente realmente infiammabile è definita come combustibile disponibile, in relazione al proprio grado di umidità e dimensione (Blasi et al., 2004). Un possibile metodo sintetico per la caratterizzazione del combustibile è la classificazione in funzione della sua distribuzione verticale, elemento da cui dipende lo sviluppo del fronte di fiamma durante un incendio (Bovio et al., 2014, Tabella 1).

Tabella 1. Principali parametri per la caratterizzazione dei combustibili forestali (modificato da Bovio et al., 2014).

Parametro	Descrizione
carico	peso secco del combustibile per unità di superficie (t s.s. ha ⁻¹)
continuità	struttura e distribuzione orizzontale e verticale dei combustibili; influenza la velocità di propagazione di un incendio: più i combustibili sono distribuiti in maniera uniforme e continua, tanto più il fronte di fiamma si propaga rapidamente.
compattezza	percentuale di volume di materiale combustibile non vuota; è in grado di influenzare i tempi di innesco del fuoco e successiva combustione regolando la disponibilità di ossigeno e il trasferimento di energia radiante tra le particelle del combustibile; è anche in grado di condizionare il contenuto di umidità.

Un'accurata conoscenza della distribuzione spaziale o orizzontale del combustibile presente in foresta è alla base delle attività e dei programmi di prevenzione e difesa dagli incendi boschivi e sicuramente rappresenta una componente essenziale per valutare il rischio di incendio (Chuvieco et al., 2004). A tal fine, la realizzazione di cartografie del combustibile è necessaria per avere un quadro aggiornato sulle quantità di combustibile vegetale presente in foresta al fine di programmare interventi selvicolturali preventivi in modo da ridurre il carico di combustibile e ridurre la possibilità di innesco di incendi (Pausas and Vallejo, 1999; Arroyo et al., 2008). Le caratteristiche

fisico-chimiche dei combustibili sono spesso complesse da derivare. Proprio per questo le classificazioni di combustibile correntemente impiegate sono molteplici e differenti tra loro negli Stati Uniti, in Australia, in Canada e in Europa. Un approccio comunemente adottato per la realizzazione di mappe di combustibile è la classificazione delle coperture vegetali secondo modelli di combustibile (*fuel types*, “FT”), mediante i quali le caratteristiche dei combustibili vegetali maggiormente influenti sulla propagazione del fronte di fiamma sono standardizzate in insiemi ritenuti omogenei, per ciascuno dei quali è indicativamente definito il campo di variazione del carico e dei principali parametri fisico-chimici dei combustibili che prevalentemente li compongono (Anderson, 1982; Blasi et al., 2004).

Negli Stati Uniti il *Northern Forest Fire Laboratory* (NFFL) ha identificato tredici modelli di combustibile, noti anche come standard *Fire Behaviour* (Albini, 1976; Burgan e Rothermel, 1984), ideati per descrivere a grande scala le caratteristiche del combustibile di superficie; in Canada è impiegato il sistema *Canadian Forest Fire Behaviour Prediction System* (FBP, Lawson et al., 1985), in Australia il *McArthur Forest Fire Ranger Rating System* e il *McArthur Grassland Fire Danger Rating System* (McArthur 1966, 1967), mentre in Europa in ambiente mediterraneo è stato implementato il sistema di classificazione del combustibile denominato Prometheus (Riaño et al., 2002; Chuvieco et al., 2003; Arroyo et al., 2006, 2008), che semplifica il sistema NFFL e prevede sette modelli di combustibile; il criterio principale di classificazione è l'altezza e il grado di copertura degli elementi di propagazione del fuoco, nell'ambito di ciascuno degli strati erbaceo, arbustivo e arboreo (Figura 1).

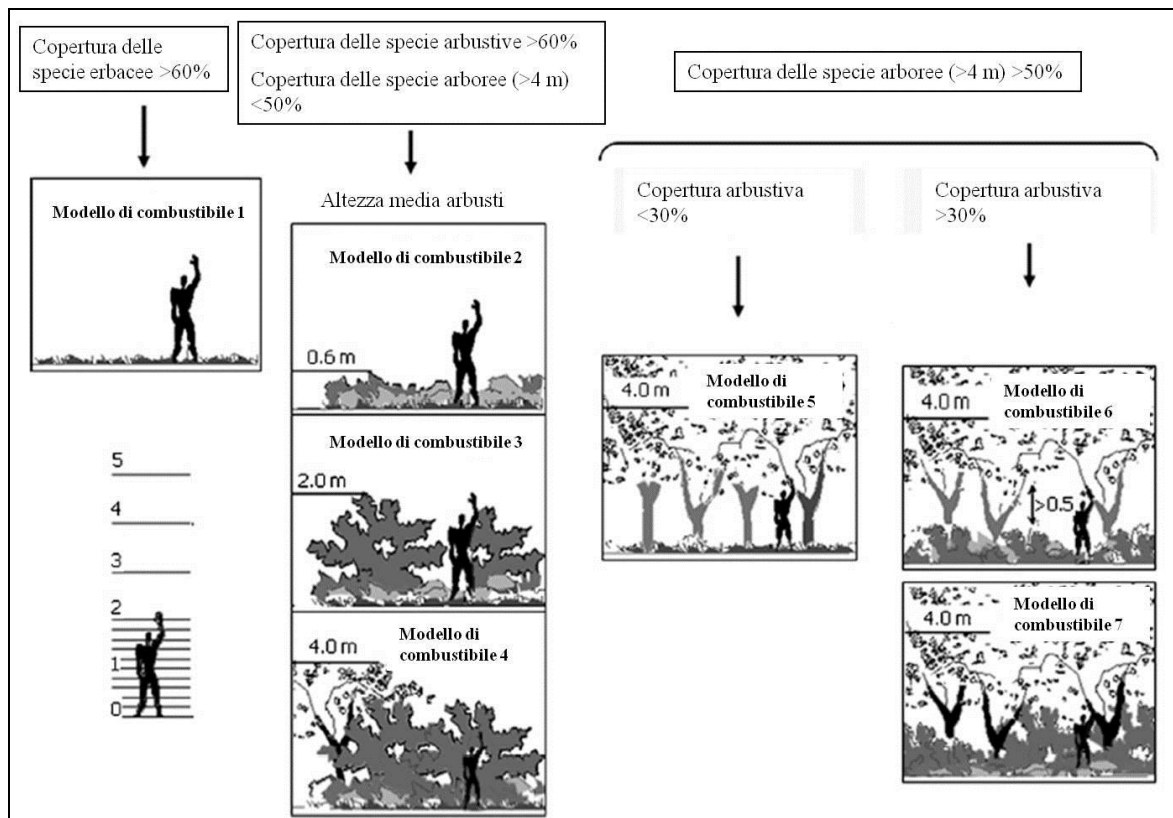


Figura 1. Schema di classificazione per identificare i modelli di combustibile Prometheus (Chuvieco et al., 2003)

Tradizionalmente, la mappatura dei combustibili forestali è realizzata attraverso rilievi a terra, economicamente onerosi dato l'impiego di risorse umane e i tempi di realizzazione relativamente lunghi. Tali operazioni sono indispensabili non solo per assegnare direttamente un appropriato modello di combustibile a ciascuna copertura forestale, ma anche al fine di calibrare e validare la cartografia di modelli di combustibile prodotta attraverso il telerilevamento. Più in generale attraverso tecniche di telerilevamento è potenzialmente possibile derivare di stime spazializzate di parametri strutturali (Tabella 2) impiegati come variabili di input per strumenti avanzati di simulazione del comportamento del fuoco quali i software open-source FARSITE (Finney, 1998), BehavePlus (Heinsch e Andrews, 2010) e FlamMap (Finney, 2006).

Tabella 2. Parametri utilizzati per la caratterizzazione del combustibile forestale nei software *Farsite* e *Behave* per la previsione del comportamento del fuoco (Bovio et al., 2014; modificato da Finney, 2004)

Parametro	Unità di misura	Descrizione
altezza dello strato arboreo	m	parametro che influenza il fattore di riduzione della velocità del vento e la traiettoria dei materiali combusti nell'incendio di chioma trasportati dal vento
altezza di inserzione della chioma	m	parametro usato, insieme all'intensità del fuoco radente e al contenuto di umidità delle foglie, per la determinazione del valore di soglia per il passaggio al fuoco di chioma
copertura dello strato arboreo	%	parametro impiegato per determinare un valore medio di ombreggiamento dei combustibili di superficie ai fini del calcolo del contenuto di umidità; questo parametro aiuta anche determinare il fattore di riduzione della velocità del vento
massa volumica della chioma	kg m ⁻³	rapporto tra biomassa fogliare e volume di involucro della chioma: parametro usato per la determinazione del valore di soglia per il passaggio al fuoco di chioma
modello di combustibile		classificazione che sintetizza la descrizione del combustibile di superficie; include la parametrizzazione del rapporto superficie/volume, del carico e della struttura (altezza e grado di copertura) del combustibile vivo e morto

Le tecniche di telerilevamento utilizzabili in tal senso possono essere basate sull'utilizzo di sensori sia passivi sia attivi. Nell'ambito dell'utilizzo di immagini satellitari a risoluzione spaziale submetrica per la classificazione della copertura forestale, i metodi definibili pixel-oriented, che classificano separatamente ogni pixel nell'immagine hanno molti limiti (Chirici e Corona, 2006; Corona et al., 2008). In alternativa, negli ultimi anni sono state sviluppate tecniche definite object-oriented che tendono a classificare gruppi di pixels a partire da un processo precedente di segmentazione delle immagini. I vantaggi di una classificazione object-oriented è riconducibile ad un maggiore contenuto informativo associabile ai poligoni derivati dalla segmentazione e una classificazione più vicina alle rappresentazioni cartografiche derivanti da interpretazione manuale delle immagini (Bovio et al., 2014). In ambiente mediterraneo, attraverso l'utilizzo di immagini ottiche ad alta risoluzione e tecniche di classificazione object-oriented, è stato possibile ottenere un'accuratezza del 75% nella classificazione dei tipi di combustibile secondo il modello Prometheus (Giakoumakis et al., 2002; Gitas et al., 2006).

Il LiDAR (Light Detection and Ranging) rappresenta una tecnologia di telerilevamento attivo utilizzata per la stima di variabili ambientali quantitative. Il sensore deriva distanze spaziali per

impulso elettromagnetico emesso a partire dalla misura del tempo trascorso tra l'emissione e la ricezione del segnale retrodiffuso. L'impulso elettromagnetico impiegato per indagini in campo forestale è caratterizzato da lunghezza d'onda (λ) di circa 700 nm, perché la vegetazione tende a riflettere maggiormente le onde elettromagnetiche con λ caratteristiche dell'infrarosso. In campo forestale è diffuso l'impiego della scansione laser da piattaforma aerea (ALS, Airborne Laser Scanning): tale tecnica permette di eseguire rilievi altimetrici di elevata precisione e di rappresentare la struttura orizzontale e verticale del bosco con un elevato grado di accuratezza (Ahokas et al., 2003). I sistemi ALS utilizzati in campo forestale sono di tipo discrete return o full waveform e si differenziano in base alle modalità di registrazione del segnale di ritorno dal sensore per ogni impulso elettromagnetico emesso. I sistemi a ritorni discreti (discrete return) si basano sulla rilevazione del numero di ritorni o echi registrati per impulso laser emesso; esistono sistemi a bassa densità i ritorni (low density LiDAR data) in cui per impulso emesso viene acquisito soltanto il primo e l'ultimo eco e sistemi ad elevata densità di ritorni (high density LiDAR data) in cui possono essere registrati anche più di due ritorni per impulso elettromagnetico emesso. I sistemi full waveform si basano invece sull'acquisizione della intensità del ritorno inteso come onda elettromagnetica. In genere i sistemi a ritorni discreti hanno risoluzione spaziale di un metro quadrato (1-15 ritorni per m^{-2} , small footprint) mentre quelli full waveform hanno risoluzione geometriche di 50-80 m^2 (large footprint) (Bovio et al., 2014). In campo forestale, applicazioni di ricerca sono supportate spesso da dati LiDAR a bassa densità di punti (1,5-2 ritorni m^{-2}) facilmente reperibili e a basso costo perché derivate da voli effettuati anche per altri scopi applicativi (e. g. idrologia). Le applicazioni della tecnologia LiDAR nel settore forestale sono legate alla caratterizzazione quali-quantitativa della struttura dei soprassuoli e la stima quantitativa di masse e biomasse arboree e/o la loro spazializzazione (Chuvieco et al., 2003; Montaghi et al., 2013). In particolare variabili derivate da LiDAR vengono correlate con quelle misurate a terra in aree campione (es. volume legnoso) e di seguito spazializzate per l'intera area di indagine coperta da dati LiDAR (approccio area-based). La capacità di derivare variabili dendrometriche come il CHM (Canopy Height Model), il volume e la biomassa legnosa è attestata da molti lavori (Magnussen et al., 1999; Corona e Fattorini 2008; Clementel et al., 2010). L'altezza di inserzione della chioma degli alberi è un elemento fondamentale per l'analisi del passaggio del fuoco radente a quello di chioma. La misura di questa variabile per mezzo di riprese LiDAR ad elevata densità di ritorni appare significativamente più attendibile per soprassuoli di conifere piuttosto che di latifoglie (Hyyppä et al., 2001). Riprese LiDAR discrete return con più ritorni per impulso forniscono anche la misura di variabili dendrometriche da cui derivare attraverso equazioni allometriche la massa volumica della chioma (Riaño et al., 2004). A tal proposito si sottolinea la maggiore potenzialità di

applicazione del sistema LiDAR discrete return di tipo multi-ritorno rispetto al tipo a due ritorni in quanto il primo fornisce un quadro più completo del profilo verticale della vegetazione e pertanto anche dello strato arboreo, rilevando l'intera distribuzione verticale del combustibile sotto copertura. In particolare Garcia et al. (2011) hanno derivato con overall accuracy del 88,24% mappe di combustibile secondo logica Prometheus integrando dati LiDAR congiuntamente ad immagini telerilevate di tipo ottico. Simili valori di accuratezza complessiva nella caratterizzazione dei modelli di combustibile sono stati raggiunti da Hermosilla et al. (2013), ma in questo caso i ritorni LiDAR in numero di circa 15 per m⁻² sono stati classificati per intervallo di altezza. Alcuni lavori, a partire da dati ALS ed immagini telerilevate multispettrali mettono a confronto strategie alternative per la classificazione dei modelli di combustibile in foresta. Tali metodi di classificazione utilizzano algoritmi non parametrici che fanno riferimento ad approcci denominati CART (Breiman et al., 1984), Random Forest (Breiman, 2001) e Stochastic Gradient Boosting (SGB; Friedman, 2002). Ad eccezione del metodo di classificazione SGB (overall accuracy 84%) l'accuratezza degli altri modelli per la classificazione dei tipi di combustibile forestale è stata valutata scarsa (Chirici et al., 2013). Rispetto agli elevati costi che si dovrebbero sostenere per implementare una campagna di rilievi a terra al fine di derivare mappe di combustibile, la tecnologia LiDAR offre la possibilità di realizzare mappe di combustibile su grandi superfici con impegni economici relativamente contenuti. Lo svantaggio principale di tale tecnologia è riferibile alla complessità di elaborazione e al raffronto economico con i dati telerilevati di tipo ottico (Arroyo et al., 2008).

.

2. Obiettivo della tesi

Obiettivo generale della tesi è la valutazione della possibilità di impiego di metriche LiDAR misurate o derivate da dati di tipo *discrete return* a bassa densità di punti acquisiti da piattaforma aerea, in funzione dei seguenti obiettivi:

1 - Mappatura dei modelli combustibile di tipo Mediterraneo secondo il sistema Prometheus.

2 - Stima su base spaziale di attributi strutturali utilizzabili come variabili di input per strumenti matematici che modellizzano il comportamento del fuoco in foresta.

In particolare altezza delle chiome dello strato arboreo, volume, biomassa epigea.

Da sottolineare che sebbene la tecnologia LiDAR sia stata impiegata di frequente per la stima delle proprietà del combustibile sotto copertura, pochi sono i lavori che hanno studiato le sue applicazioni e potenzialità di indagine nella mappatura dei tipi di combustibile (Garcia et al., 2011). In questo studio, a differenza di altri lavori sul tema (e.g. Hermosilla et al., 2013; Mutlu et al., 2008; Seielstad e Queen, 2003) si è volutamente scelto di sperimentare l'utilizzo di dati LiDAR a bassa densità di punti (low density) e senza ausilio del telerilevamento ottico per la mappatura dei modelli di combustibile Prometheus. Questo tipo di dato LiDAR rappresenta un dato considerato a basso costo e potenzialmente acquisibile a scala nazionale. In tal senso, l'interesse della sperimentazione sta nel valutare se e con quali livelli di accuratezza sia possibile produrre da dati LiDAR *discrete return* e low density cartografie dei modelli di combustibile caratteristici dell'ambiente mediterraneo e stime spazializzate del carico di combustibile complessivamente ad essi associato, quantificato attraverso parametri quali volume legnoso e biomassa epigea.

3. Materiali e metodi

3.1 Approccio metodologico

Il percorso metodologico seguito è basato sulla sperimentazione di tecniche integrate di rilevamento campionario a terra e di telerilevamento ALS, finalizzate a produrre una rappresentazione spaziale adeguata di parametri di combustibile.

L'impianto metodologico, concepito nella prospettiva di derivare stime affidabili e periodicamente aggiornabili, dalla scala aziendale a quella di paesaggio, si basa su:

- (i) acquisizione ed elaborazione di dati ALS discrete return a bassa densità di punti (mediamente da 0,4 a 1,5 ritorni per m^{-2} ; vd. § 3.2);
- (ii) realizzazione di una rete di unità di campionamento (AdS) a terra e rilevamento fitometrico all'interno di ciascuna AdS (vd. § 3.3);
- (iii) elaborazione della nuvola di punti di dati ALS small footprint discrete return in relazione ai seguenti obiettivi:

Obiettivo 1. Mappatura dei modelli combustibile di tipo Mediterraneo secondo il sistema Prometheus.

Derivazione di metriche relative al grado di copertura e altezza dei combustibili vegetali (strato erbaceo, arbustivo e arboreo) funzionali alla mappatura dei modelli di combustibile e messa a punto di un classificatore logico per la delineazione dei modelli di combustibile da dati LIDAR secondo il sistema Prometheus (§ 3.4 - 3.5).

Obiettivo 2. stima su base spaziale di attributi strutturali utilizzabili come variabili di input per strumenti matematici che modellizzano il comportamento del fuoco in foresta e/o per la pianificazione spaziale di interventi di riduzione del carico di combustibile.

Regressione statistica tra gli attributi strutturali oggetto di interesse (altezza media del popolamento, volume della massa legnosa) e le metriche ALS rilevate in ciascuna unità di campionamento e successiva spazializzazione (vd. § 3.6).

3.2 Area di studio

3.2.1 Inquadramento generale

La sperimentazione è stata condotta in due aree di studio prevalentemente interessate da una copertura forestale localizzate in Sicilia e Toscana in ambienti di tipo mediterraneo:

Area di studio 1, localizzata in due comprensori forestali compresi all'interno rispettivamente della Riserva Naturale Orientata Bosco Favara e Granza e al Parco Naturale Regionale delle Madonie situati in Provincia di Palermo;

Area di studio 2, localizzata nel complesso forestale di Monte Morello in Provincia di Firenze.

Le riprese ALS in Sicilia sono state acquisite nella stagione estiva 2010 attraverso un sensore laser scanner Optech Pegasus system (angolo di ripresa di 20° e frequenza di 100 kHz), montato a bordo di un aereo Piper Navajo 1-BGFE, con densità media di circa 1,5 ritorni m⁻². Mentre in Toscana le riprese LiDAR sono state acquisite da un sensore ALTM Gemini nell'ottobre del 2008 con una densità media di punti di 0,4 m⁻².

Per le due aree di studio sono disponibili i seguenti dati ancillari utilizzabili come fonte di validazione per la mappatura su base fisionomica della vegetazione nel territorio indagato:

- area di studio 1, carta dei tipi forestali (Hofmann et al., 2011);
- area di studio 2, carta di uso del suolo realizzata ad hoc tramite fotointerpretazione di immagini ad alta risoluzione nell'ambito di uno studio condotto dal Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali (GESAAF) dell'Università di Firenze.

Entrambe le carte tematiche hanno una unità minima cartografabile (UMC) di 0,5 ettari.

La copertura LiDAR per l'area di studio 1 interessa una superficie leggermente più estesa rispetto a quella rappresentata dalla carta dei tipi forestali disponibile che si estende per circa 3.100 ettari (Figura 2). Anche per l'area di studio 2, la copertura LiDAR è più ampia rispetto alla carta di uso del suolo utilizzata come verità a terra. Dunque la copertura del dato ALS, corrispondente ai limiti della carta di uso del suolo disponibile per l'area di studio 2, è parziale e copre una superficie di circa 845 ettari. Tutti i dati LiDAR sono stati elaborati a partire dalla nuvola di punti grezza (formato .las).

3.2.2 Inquadramento fisionomico dei popolamenti forestali

Il comprensorio forestale dell'area di studio 1, sito all'interno della Riserva Naturale Orientata Bosco Favara e Granza, è caratterizzato da boschi cedui misti oltre turno a prevalenza di roverella (*Quercus pubescens* Willd.), sughera (*Quercus suber* L.) e leccio (*Quercus ilex* L.). L'altitudine prevalente è di 400-600 m s.l.m. I boschi si presentano con strutture abbastanza uniformi fra loro, rappresentabili in cedui quercini di età avanzata che ormai hanno una ridotta capacità pollonifera. Lo strato arbustivo è costituito da specie prevalentemente di ambiente mediterraneo (*Calycotome spinosa* Link, *Ligustrum vulgare* L., *Phillyrea latifolia* L.) spesso di altezza e densità elevata. Sono presenti anche formazioni erbacee gestite a pascolo, che in genere non superano altezze di 30-40 cm. Talvolta in tali soprassuoli si riscontra la presenza di radure e/o boschi di neoformazione costituiti da piccoli alberi di roverella con strato arbustivo a *Calycotome spinosa* e ginestreti.

Il secondo comprensorio forestale dell'area di studio 1 la cui copertura LiDAR è di circa 2.000 ettari è situato invece all'interno del Parco Naturale Regionale delle Madonie ad altitudini comprese

tra 1000 e 1800 m s.l.m. in ambienti forestali caratterizzati perlopiù da cedui e fustaie di faggio in cui sono presenti, soprattutto a quote più basse, nuclei sporadici di agrifoglio (*Ilex aquifolium* L.). Recentemente non sono stati effettuati tagli di utilizzazione boschiva. In entrambi i comprensori forestali sono presenti altri usi del suolo (cfr. Tabella 3), anche se più della metà del territorio di indagine è coperto da bosco.

Tabella 3. Area di studio 1: ripartizione delle superfici in ettari per classe inventariale della carta dei tipi forestali della Regione Sicilia disponibile (Hofmann et al., 2011)

Classe Inventariale	Sup. in ettari (ha)	Sup. percentuale (%)
boschi (copertura > 10%)	1628,8	52,5
boschi radi (copertura 5-10%)	129,3	4,2
arbusteti e macchie	476,9	15,4
aree temporaneamente prive di copertura forestale	54,7	1,8
praterie, pascoli, incolti	812,3	26,2
Totale	3102,1	100,0

Nell'ottobre 2011 sono stati effettuati rilievi dendrometrici in 23 aree di saggio distribuite tra varie principali tipologie forestali (Tabella 4) secondo il protocollo di cui al § 3.3. Sono stati inoltre rilevati i dati per implementare la classificazione Prometheus a terra (grado di copertura arborea e arbustiva, altezza di inserzione delle chiome arboree).

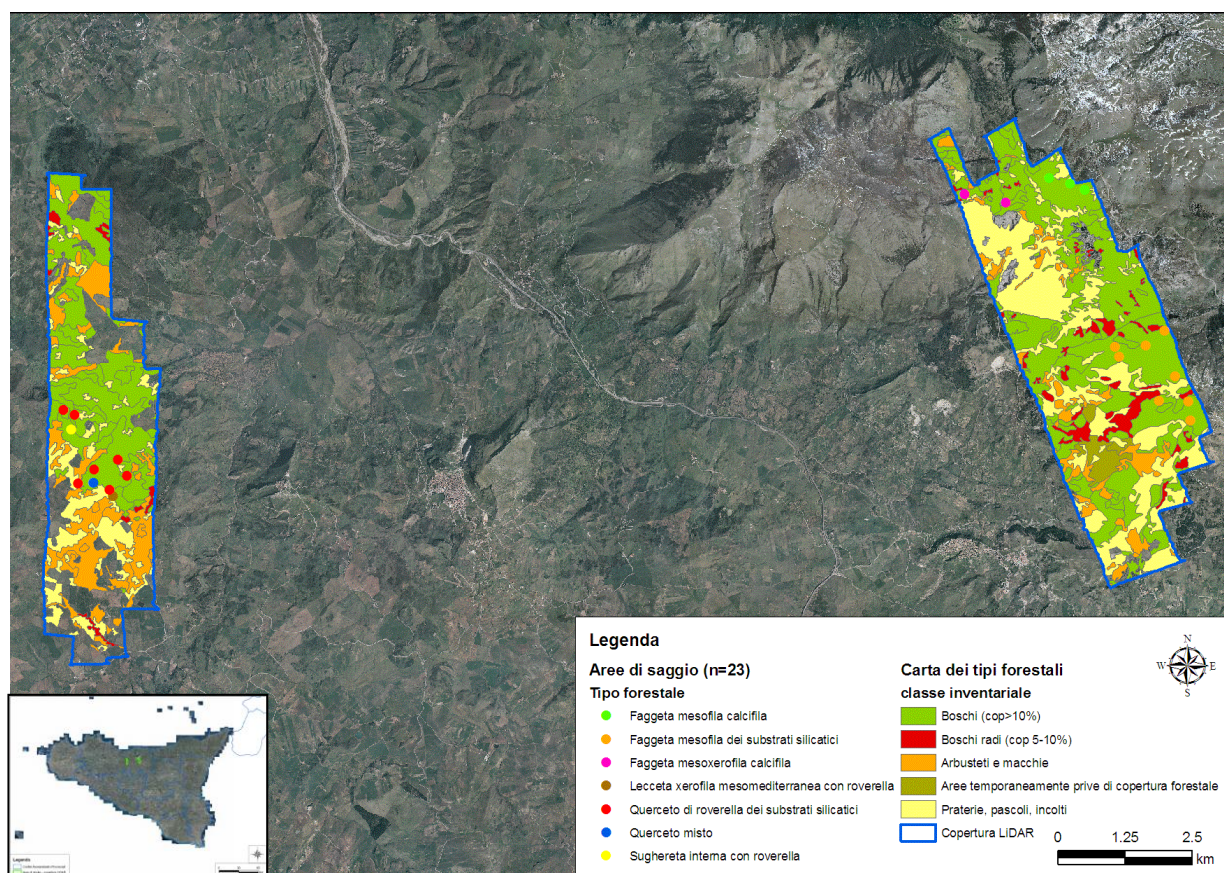


Figura 2. Area di studio n. 1 – Riserva Naturale Orientata Bosco Favara e Granza (sx), Parco Naturale Regionale delle Madonie (dx) (PA, Sicilia), estratto della carta dei tipi forestali della Regione Sicilia (Hofmann et al., 2011) e localizzazione delle aree di saggio (n=23).

Tabella 4. Quadro riassuntivo delle caratteristiche delle aree di saggio (n=23) distribuite all'interno dell'area di studio n. 1 – Riserva Naturale Orientata Bosco Favara e Granza – Parco Naturale Regionale delle Madonie (PA).

Tipo Forestale	numero AdS
Querceto di roverella dei substrati silicatici	7
Querceto misto	1
Sughereta interna con roverella	1
Lecceta xerofila mesomediterranea con roverella	1
Faggeta mesoxerofila calcifila	2
Faggeta mesofila calcifila	3
Faggeta mesofila dei substrati silicatici	8
Totale	23

L'area di studio 2 è sita in località Monte Morello tra i Comuni di Calenzano, Vaglia e Sesto Fiorentino, in Provincia di Firenze ad altitudini comprese tra 300 e 500 m s.l.m. I soprassuoli sono caratterizzati in parte da fustaie a prevalenza di conifere come pino nero (*Pinus nigra* J.F. Arnold),

douglasia (*Pseudotsuga menziesii* Franco), cipresso comune (*Cupressus sempervirens* L.) e latifoglie anche miste tra loro e in parte da cedui a prevalenza di latifoglie come cerro (*Quercus cerris* L.) e roverella (*Quercus pubescens* Willd.). Il terreno è di natura calcarea. All'interno della superficie coperta da dati LiDAR sono presenti anche zone aperte, come seminativi, prato-pascoli, arbusteti e oliveti. Nel settembre 2013 nel complesso forestale di Monte Morello (area di studio 2) sono state realizzate 28 aree di saggio per il rilievo del combustibile e la classificazione secondo il sistema Prometheus, sempre seguendo il protocollo di cui al § 3.3.

Tabella 5. Area di studio 2: ripartizione delle superfici in ettari per classe di uso del suolo della carta realizzata ad hoc dal Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali (GESAAF) dell'Università di Firenze all'interno della copertura LiDAR.

Classe di uso del suolo - Prometheus	Sup. in ettari (ha)	Sup. percentuale (%)
bosco	573,6	67,9
arbusteti con altezza < 4m	10,3	1,2
arbusteti con altezza < 2m	1,8	0,2
arbusteti con altezza < 0,6 m	1,6	0,2
oliveti	225,7	26,7
prato/pascoli	8,6	1,0
urbano	23,8	2,8
Totale	845,2	100,0

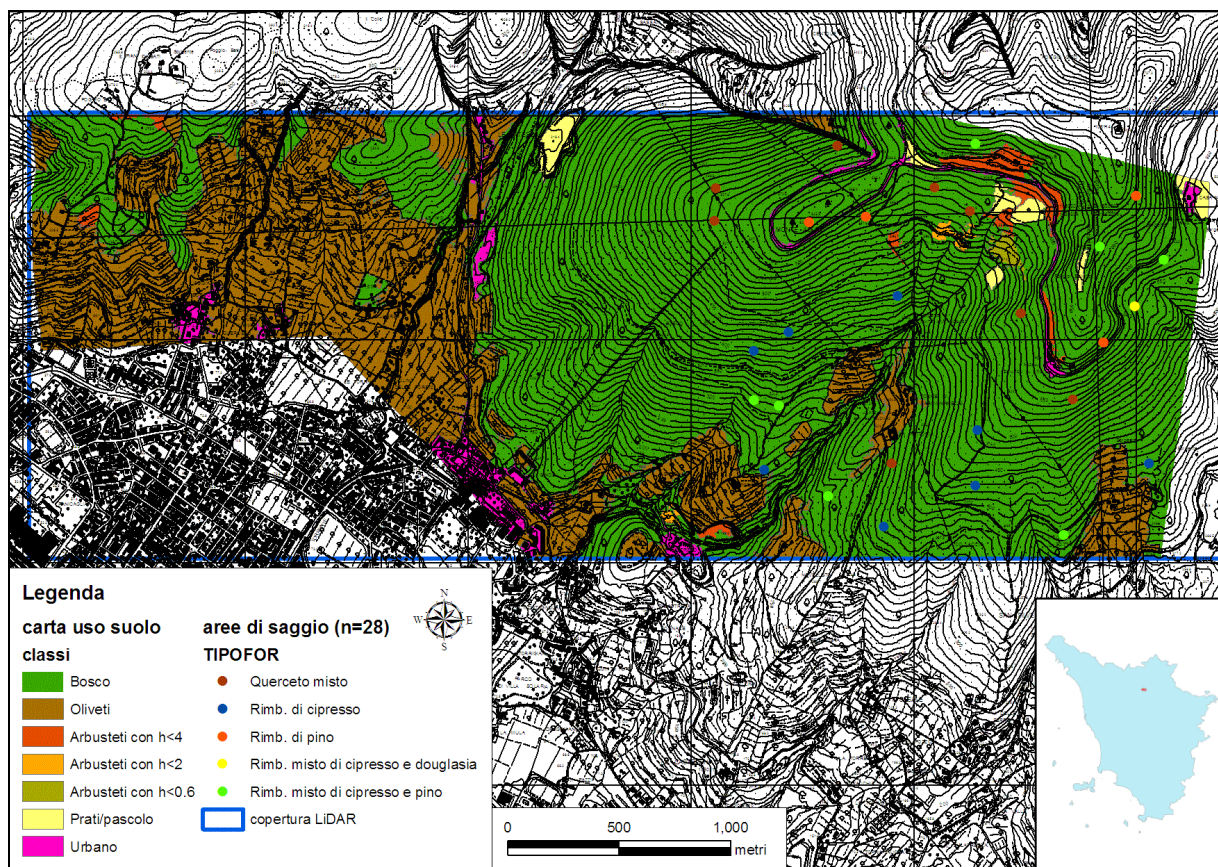


Figura 3. Area di studio n. 2 – Loc. Monte Morello (FI, Toscana), carta di uso del suolo e rappresentazione della distribuzione delle aree di saggio (n=28).

Tabella 6. Quadro riassuntivo delle caratteristiche delle aree di saggio distribuite all'interno dell'area di studio n. 2 – Monte Morello (FI).

Tipo forestale	numero di AdS
Querceto misto	8
Rimboschimento di pino	4
Rimboschimento di cipresso	8
Rimb. misto di cipresso e pino	7
Rimb. misto di cipresso e douglasia	1
Totale	28

3.3 Elaborazioni di base dei dati LIDAR

Il tipo di dato LiDAR discrete return utilizzato in questa sperimentazione, restituisce quasi sempre due ritorni per metro quadrato che rappresentano rispettivamente la parte esterna della vegetazione (first return) e il terreno (last return). Ad ogni ritorno, o eco, è associata una quota altimetrica in metri sul livello del mare.

La nuvola di punti LiDAR (dato grezzo) è stata pre-classificata in modo da rimuovere gli outliers (valori anomali) ovvero ritorni che hanno valori di quota altimetrica molto dissimili da quelli della maggior parte dei ritorni della nuvola di punti. Gli outliers sono dovuti a disturbi o errori di ripresa del sensore dovuti sia a fattori ambientali sia a fattori causati dal mal funzionamento dello strumento. Le operazioni di rimozione degli outliers sono state condotte con il software TerraScan (1998-2012 Arttu Soininen Terrasolid's software) .

I dati pre-classificati da TerraScan (esportati in formato .las) sono stati successivamente elaborati attraverso applicativi del pacchetto software ArcGis las tools al fine di completare la classificazione dei ritorni e definire all'interno della nuvola di punti quelli appartenenti alla vegetazione (codice codifica=1) e al terreno (codice codifica=2). Tale pacchetto software è stato creato da Martin Isenburg per la gestione ad hoc di files “.las” (Martin Isenburg, rapidlasso – fast tools to catch reality). Per l'analisi della nuvola nelle due aree di studio, vista la grande quantità di dati LiDAR immagazzinati in strisciate della lunghezza di 3-8 km e larghezza di 500 metri circa (milioni di ritorni da gestire), al fine di rendere più rapide le operazioni di classificazione si è deciso di processare i dati per pacchetti. La superficie di indagine è stata divisa in sottoinsiemi o “tiles” generalmente di forma quadrata e lato pari a 1 km. Ciascun sottoinsieme di dati è stato processato attraverso l'implementazione di differenti applicativi las tools, al fine di restituire come risultato finale, con risoluzione spaziale di 20 e 50 metri, tutte le metriche LiDAR descritte in Tabella 5. In tal senso sono state scelte durante la fase di classificazione due risoluzioni del pixel, 20 e 50 metri, per confrontare la potenzialità dell'estimatore a diverse scale. La risoluzione di 20 metri del pixel è stata selezionata perché lo stesso pixel fornisce informazioni sulle metriche LiDAR su una superficie di 400 metri², valore molto prossimo a quello delle aree campione (Superficie AdS=530 m²). La scelta sulla seconda risoluzione spaziale (50 m) è stata influenzata dal fatto che la superficie occupata da un pixel (2.500 m²) è prossima e comunque inferiore al valore di superficie minima cartografabile nelle mappe tematiche utilizzate come informazioni ancillari nella ricerca (Carta dei tipi forestali, carta d'uso del suolo). Per automatizzare la procedura è stato realizzato uno script (linguaggio di programmazione Python) che mettesse insieme le funzioni dei vari applicativi. I ritorni, sono stati quindi classificati come ground (codice eco=2) tramite l'applicativo las ground mantenendo però ancora il loro valore altimetrico. Il risultato di questa operazione è il DTM

(Digital Terrain Model) o modello digitale del terreno. In seguito con las height è stato estratto il DSM (Digital Surface Model) o modello digitale della superficie della vegetazione (codice echo=1). Con l'applicativo las height è stato possibile operare la differenza di quota tra il DSM e il DTM e derivare il modello digitale delle altezze medie della vegetazione per differenti intervalli (vd. parametri Tabella 7) di altezza dal terreno. Infine programmi come las canopy e las grid sono stati implementati al modello digitale della vegetazione per ricavare le metriche necessarie all'ottenimento degli obiettivi di cui al capitolo 2. In particolare, la copertura relativa (%) e l'altezza della vegetazione sono di fondamentale importanza per implementare la logica Prometheus e quindi la derivazione della mappatura dei tipi di combustibile, nonché per la derivazione di volume e biomassa dei popolamenti forestali. Tutte le metriche per singolo pixel sono state calcolate per ogni tiles, le quali mosaicate in ambiente GIS hanno permesso di rappresentare per l'intera area di studio ciascuna metrica in una immagine raster.

Tabella 7. Parametri derivati da LiDAR utilizzati per ottenere obiettivo 1 e 2.

Metrica	Unità di misura
numero di ritorni totali	Conteggio
numero di ritorni suolo	Conteggio
numero di ritorni al di sopra del suolo	Conteggio
numero di ritorni al di sopra del suolo compresi tra 0-0,3 m	Conteggio
numero di ritorni al di sopra del suolo compresi tra 0,3-0,6 m	Conteggio
numero di ritorni al di sopra del suolo compresi tra 0,6-2 m	Conteggio
numero di ritorni al di sopra del suolo compresi tra 2-4 m	Conteggio
numero di ritorni al di sopra del suolo oltre 4 m	Conteggio
altezza media dei ritorni oltre i 4 m	m
altezza media dei ritorni tra 0,3 e 4 m	m

3.4 Rilievi dendrometrici in unità campione

La selezione delle aree di campionamento è stata eseguita in maniera casuale in modo da restituire un oggettivo campione rappresentativo delle formazioni forestali presenti (Corona, 2007). In ogni area di saggio sono stati acquisiti dati sulla misura del diametro e dell'altezza degli alberi e della loro inserzione chioma, ed inoltre dati sul grado di copertura e sull'altezza media di strato. I rilievi di campagna sono stati condotti in analogia al protocollo di terza fase dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio (INFC, Tabacchi et al., 2006) nella prospettiva di derivare stime quantitative dei combustibili forestali in modo standardizzato rispetto alla consolidata rete nazionale INFC. I dati di campo sono stati elaborati secondo i metodi dendrometrici tradizionali, pertanto per area di saggio è stata calcolata l'altezza media, il volume e la biomassa legnosa ad ettaro presente applicando le tavole di cubatura e i coefficienti di espansione INFC (Tabacchi et al. 2011). In questa prospettiva, l'unità di campionamento di riferimento (Figura 4, Tabella 8) è rappresentata da un'area di saggio di forma circolare di raggio pari a 13 m (AdS 13) in cui sono state cavallettate tutte le piante oltre 10 cm di diametro a petto d'uomo. All'interno della stessa area di saggio è stata materializzata una seconda area di 4 metri di raggio (AdS 4) concentrica alla prima in cui sono stati cavallettati anche i fusti con diametro compreso tra 3 e 10 cm. L'unità di campionamento comprende inoltre quattro areole quadrate di superficie pari a 1 m^2 poste a 10 metri dal centro dell'area orientate lungo le quattro direzioni cardinali (Nord, Sud, Est, Ovest).

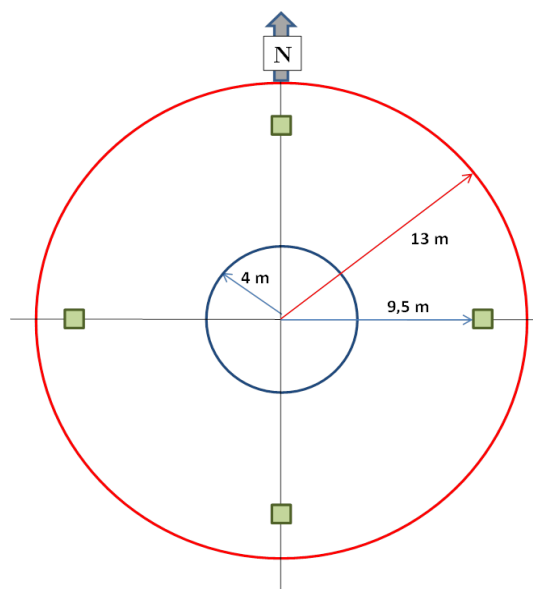


Figura 4. Schema di campionamento Aree di saggio per la Sicilia e la Toscana (quest'ultima mancante del prelievo del combustibile di superficie)

Il centro dell'area di campionamento è stato ricercato a terra attraverso la posizione media di almeno 300 letture in registrazione del GPS impiegato durante i rilievi (Trimble Pro-XH). Il centro dell'area è stato poi materializzato con l'infissione di una placca di metallo ed inoltre sono stati

marcati al pedale di rosso i quattro alberi più vicini al centro dell'area, da cui sono stati misurati distanze e azimut degli stessi alberi per un possibile ricerca futura del centro dell'area di saggio. Con l'ipsometro vertex è stato misurato un campione di altezze rappresentativo per la costruzione della curva ipsometrica per ogni area di saggio. Nelle quattro areole di campionamento è stimata a vista l'altezza media e il grado di copertura per lo strato arboreo di piccole dimensioni (diametro a petto d'uomo inferiore a 2,5 cm), per lo strato arbustivo e per lo strato erbaceo. Per ogni area di saggio sono stati quindi ricavati il volume, l'altezza media del popolamento forestale, il grado di copertura (%) e l'altezza media dello strato arbustivo ed erbaceo presente.

Tabella 8. Attributi rilevati nelle unità di campionamento a terra per la caratterizzazione del combustibile forestale (D 1,30 m = diametro a petto d'uomo del fusto arboreo; H = altezza del fusto arboreo).

<i>Sottounità di campionamento</i>	<i>Elemento inventariato</i>	<i>Soglie dimensionali</i>	<i>Attributi</i>	<i>Principali grandezze stimate</i>
area con raggio pari a 13 m	alberi in piedi	$D_{1,30} \geq 9,5 \text{ cm}$ $H \geq 130 \text{ cm}$	specie, $D_{1,30}$, altezza dendrometrica, azimut, distanza dal centro dell'area	volume, dendromassa epigea
area con raggio pari a 4 m	alberi in piedi	$D_{1,30} \geq 2,5 \text{ cm}$ $H \geq 130 \text{ cm}$	specie, $D_{1,30}$, altezza dendrometrica, azimut, distanza dal centro dell'area	volume, dendromassa epigea
areola	rinnovazione arborea	$D_{1,30} \leq 2,5 \text{ cm}$	grado di copertura, altezza media	
areola	arbusti		grado di copertura, altezza media	
areola	specie erbacee		grado di copertura, altezza media	

3.5 Classificatore logico dei dati LIDAR secondo il sistema Prometheus

Nell'ambito della presente ricerca è stato sviluppato un metodo per la classificazione e mappatura dei modelli di combustibile in ambiente mediterraneo. Lo studio ha sviluppato un modello di classificazione basato sull'elaborazione di dati LiDAR a bassa densità di punti per la mappatura delle classi Prometheus. Il modello di classificazione Prometheus è il più diffuso in Europa e, come detto in precedenza, risulta essere un adattamento della classificazione NFFL alle caratteristiche dell'ambiente mediterraneo in quanto riesce sinteticamente a descrivere quantitativamente il carico di combustibile presente all'interno degli ecosistemi (Riaño et al., 2002).

Le informazioni necessarie per implementare il modello sono la percentuale di copertura e l'altezza media degli strati erbaceo, arbustivo e arboreo. Attraverso questi parametri quantitativi, Prometheus riesce a discriminare i popolamenti vegetali in sette classi o tipi di combustibile chiamati Fuel Types. In particolare ai fini dell'identificazione del modello di combustibile sono state calcolate le percentuali di ritorni non suolo appartenenti agli strati erbaceo, arbustivo, arboreo. La percentuale di copertura della vegetazione di un determinato strato, espressa come valore di digital number (DN) per pixel dell'immagine, è calcolata sul rapporto tra il numero di ritorni (vd. Tabelle 7, 9) compresi tra un intervallo di altezza maggiore di zero e il numero totale di ritorni superiori a 0,01 metri da terra.

Le immagini raster che derivano dall'implementazione del pacchetto software las tools sono analizzati in ambiente GIS secondo logica Prometheus, in modo da derivare mappe di combustibile. In particolare vengono analizzati singolarmente e/o subiscono operazioni algebriche tra loro (e.g. prodotto, somma, differenza, divisione) e spesso attraverso la realizzazione di "maschere" il valore dei pixels viene ricalcolato ad hoc. Il fine ultimo di ogni operazione algebrica tra raster è quello di ottenere un'immagine per fase di classificazione (Figura 6).

La vegetazione erbacea è rappresentata da tutti i ritorni compresi tra 0 a 0,3 metri di altezza dal terreno, mentre la vegetazione arbustiva è rappresentata dall'intervallo di altezza dei ritorni compresi tra 0,3 e 4 metri. Tutti i ritorni superiori a 4 metri da terra rappresentano lo strato arboreo. La prima fase è la divisione tra i fuel types bosco, da quelli non bosco definita in base alla percentuale di copertura arborea riscontrata a livello di pixel. Il percorso di elaborazione dei dati LiDAR segue i criteri Prometheus e conduce a classificare un popolamento vegetale all'interno di un modello di combustibile sulla base delle metriche descritte nel diagramma ad albero in Figura 5.

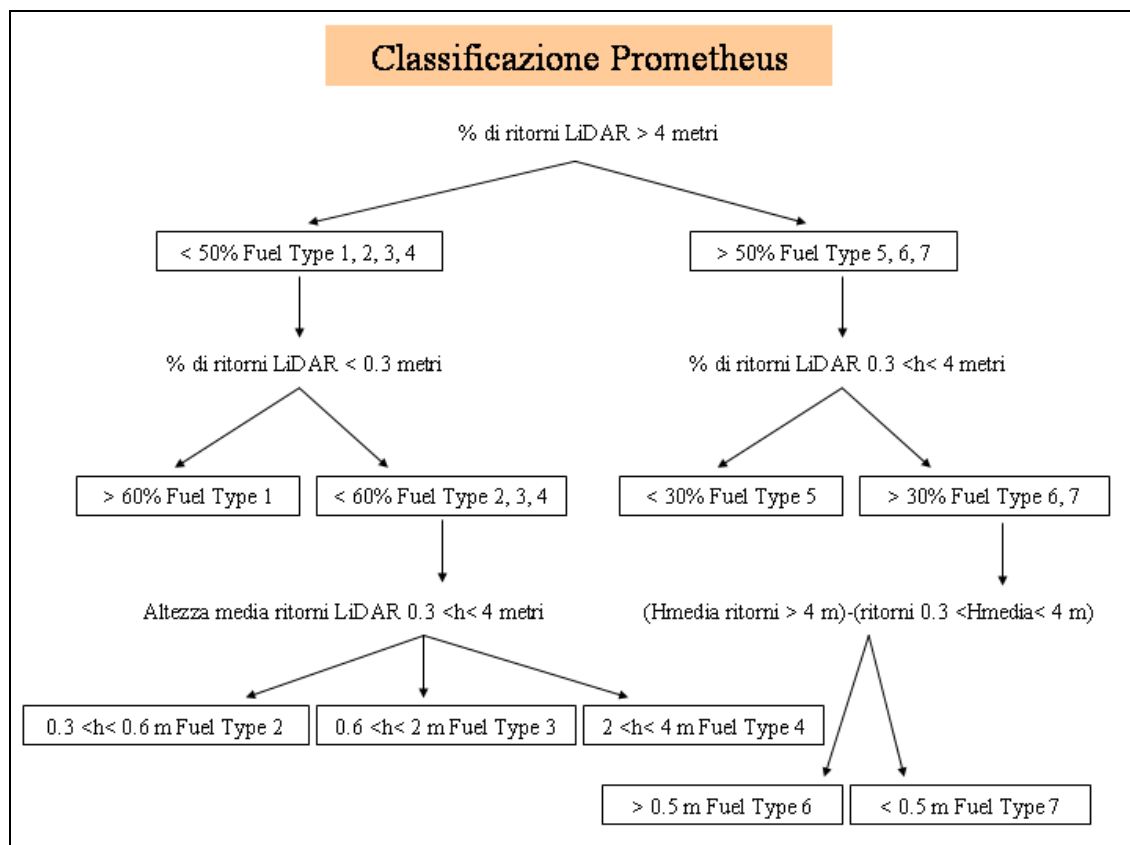


Figura 5. Diagramma ad albero logica di classificazione metodo Prometheus

Tutti i pixels aventi una percentuale di ritorni con altezza maggiore di 4 metri superiore al 50% rispetto al numero di ritorni della vegetazione (non ground) rientrano nei modelli FT5-7; mentre tutti i pixels con valori inferiori al 50% rientrano tra i modelli FT1-4. Per quanto concerne i pixels classificati come bosco nella seconda fase si prende in considerazione la copertura dello strato arbustivo intesa come percentuale di ritorni compresa tra 0,3 e 4 metri: nel caso del fuel type 5 è inferiore al 30% mentre per i fuel types 6 e 7 è maggiore del 30%. Per tali aree, aventi copertura arbustiva maggiore del 30% la logica Prometheus classifica come fuel type 6 tutti i pixels aventi una differenza tra altezza media superiore a 4 metri e altezza media compresa tra 0,3 e 4 metri maggiore di 0,5 metri, per differenze inferiori a 0,5 metri i pixels sono classificati come fuel type 7. Il tipo di combustibile 5 rappresenta aree boscate con carico di combustibile sotto copertura ridotto, mentre il tipo 6 identifica boschi in cui il carico di combustibile sotto copertura è superiore al fuel type 5 ma sempre non in continuità verticale con lo strato arboreo. Il tipo FT7 invece rappresenta formazioni forestali ad elevato carico di combustibile sotto copertura in cui c'è continuità tra strato arbustivo e strato arboreo, poiché la distanza media tra strato arbustivo e l'altezza di inserzione della chioma degli alberi è inferiore a 0,5 metri.

Per quanto riguarda i pixels "non bosco", secondo Prometheus tutti quelli con percentuale di ritorni compresi tra 0 e 0,3 metri di altezza dal terreno maggiore del 60% sono classificati come fuel type

1, ovvero come tipo di combustibile di prateria in cui sono rappresentati anche i pascoli caratterizzati prevalentemente da vegetazione erbacea che le coltivazioni agricole a seminativo. Tutti i pixels aventi percentuale di ritorni ricadenti tra 0 e 0,3 metri inferiore al 60%, rappresentano aree aperte caratterizzate principalmente da vegetazione arbustiva, talvolta mista a quella arborea. In particolare, il parametro discriminante per la classificazione dei pixels in tipo di combustibile FT2-4 è l'altezza media dello strato arbustivo. Se i ritorni compresi tra 0,3 e 4 metri identificano un'altezza media inferiore a 0,6 il pixel è classificato come fuel type 2, se è compresa tra 0,6 e 2 metri si ha il fuel type 3 e invece se l'altezza media dei ritorni è superiore a 2 metri i pixels sono classificati come fuel type 4. Mentre i modelli di combustibile FT2 e FT3 rappresentano arbusteti bassi e densi, il fuel type 4 è caratterizzato da un tessuto arbustivo consociato ad alberi o piccoli alberelli che in taluni casi possono essere intesi come boscaglie o boschi di neoformazione.

Tabella 9. Valori dei parametri quantitativi discriminanti i modelli di combustibile Prometheus

Copertura	Modello di combustibile (Fuel Type)
specie erbacee > 60%	1 (altezza media strato erbaceo 0-0,3 m)
specie arbustive > 60% specie arboree (> 4m) < 50%	2 (altezza media arbusti 0-0,6 m)
	3(altezza media arbusti 0,6-2 m)
	4(altezza media arbusti 2-4 m)
specie arboree (> 4m) >50%	
copertura arbustiva < 30%	5 (differenza tra altezza media di inserzione della chioma e altezza media strato arbustivo > 0,5)
copertura arbustiva > 30%	6 (differenza tra altezza media di inserzione della chioma e altezza media strato arbustivo > 0,5)
	7 (differenza tra altezza media di inserzione della chioma e altezza media strato arbustivo < 0,5)

Quanto detto in precedenza rappresenta l'iter della classificazione del modello Prometheus rappresentato in Figura 5. Il risultato finale ottenuto dalla logica di classificazione è un'immagine raster di tutti i pixels classificati secondo i modelli di combustibile Prometheus alle due risoluzioni spaziali scelte, 20 e 50 metri. L'unità minima cartografabile (UMC) per la mappa dei tipi di combustibili è stata definita in 0,5 ettari, confrontabile con la carta dei tipi forestali della Regione Sicilia e con la carta di uso del suolo di Monte Morello in quanto aventi la stessa risoluzione del poligono più piccolo.

Pertanto si è proceduto dapprima con la conversione delle due carte in formato raster con pixels di 20 e 50 metri a quello vettoriale; successivamente all'implementazione in ambiente GIS della funzione Dissolve adjacent polygon per automatizzare la procedura di creazione di poligoni di estensione minima pari all'UMC: tutti i poligoni con superficie inferiore a 5000 m² sono stati associati a quelli adiacenti ad essi di superficie maggiore (Figura 6).

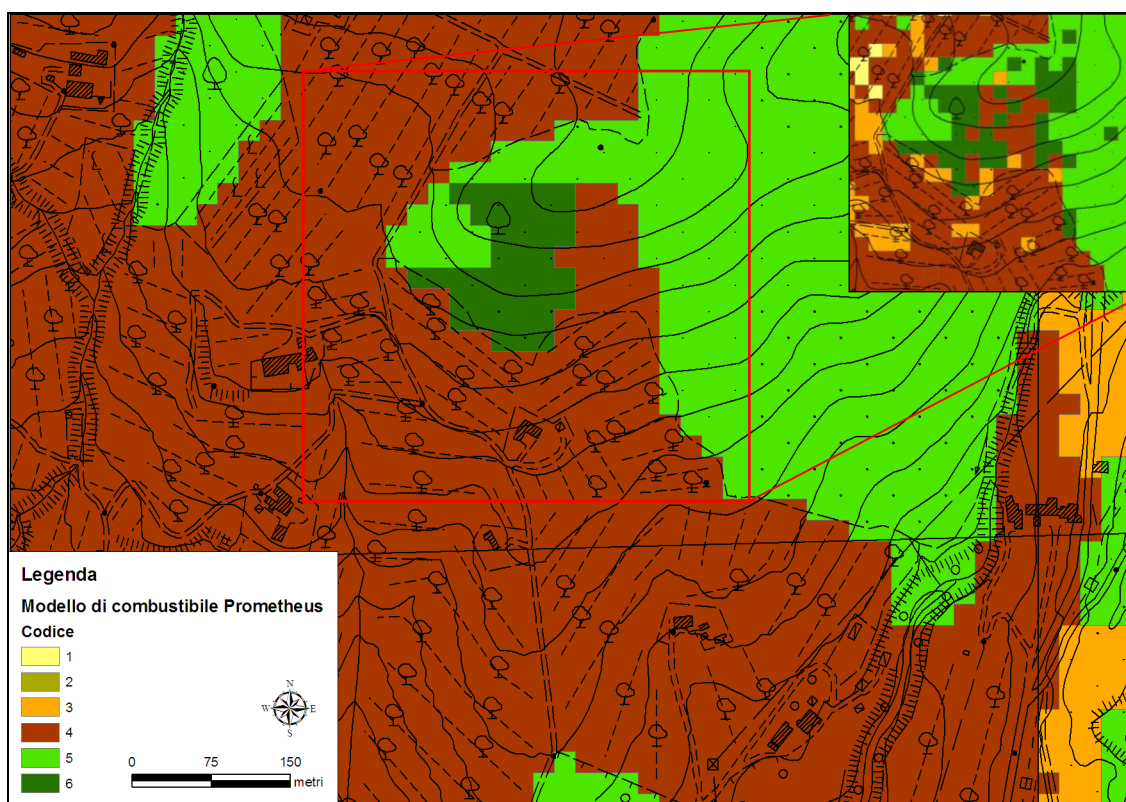


Figura 6. Area di studio 2, confronto della cartografia vettoriale dei modelli di combustibile (superficie minima cartografabile 0,5 ettari) con mappa raster (riquadro in alto a destra dell'immagine) a risoluzione spaziale di 20 metri.

3.6 Validazione della mappatura dei modelli di combustibile Prometheus

3.6.1 *Validazione in base alle unità campione*

Come per qualunque altro classificatore di dati telerilevati, la metodologia LiDAR impiegata per la derivazione di mappe di combustibile ha bisogno di una fase di validazione attraverso verità a terra (Chirici e Corona, 2006; Arroyo et al., 2006; Garcia et al., 2011). La possibilità di verificare l'accuratezza della cartografia tematica è essenziale per valutare le prestazioni del classificatore e le potenziali applicazioni in altri contesti operativi. Nel caso dei fuel types forestali (FT5-7) la classificazione Prometheus della mappa raster e vettoriale è stata validata con la classificazione Prometheus assegnata alle unità campione (AdS).

La verità a terra è funzionale a valutare in che misura dati LiDAR discrete return a bassa densità possano essere usati per discriminare, attraverso il classificatore logico di cui al § 3.4, l'eventuale presenza di uno strato arbustivo, più o meno denso, sotto la copertura dello strato arboreo e dunque, per distinguere il FT5 dai FT6 e FT7. Durante la fase di rilievo a terra di cui al § 3.3, per la determinazione del modello di combustibile a terra sono stati analizzati, secondo logica Prometheus (Figura 5), i dati di copertura relativa (%) e altezza media del bosco (m) e del combustibile sotto chioma (cm) e l'altezza (m) di inserzione delle chiome degli alberi. Pertanto, dapprima è stato analizzato il valore di copertura in termini percentuali della canopy, stimato a vista in campo e successivamente verificato in ambiente GIS su immagini Google earth. Di seguito sono stati mediati i valori di copertura relativa (%) della componente arbustiva all'interno dei 4 subplots delle aree di saggio, discriminando quindi il fuel type 5 dal gruppo di tipi con carico di combustibile più elevato (FT6, FT7). Infine per ogni AdS è stata calcolata la differenza tra, la media delle altezze di inserzione delle chiome degli alberi e l'altezza media dello strato arbustivo, quest'ultima calcolata come media delle altezze del tessuto arbustivo nei 4 subplots nell'area di saggio. Se tale differenza risulta inferiore a 0,5 si identifica il modello di combustibile 7, altrimenti il modello 6.

3.6.2 *Validazione in base a mappe tematiche*

La valutazione dell'accuratezza del modello Prometheus da LiDAR ha l'obiettivo, non solo di verificare le potenzialità dello strumento di telerilevamento nel cartografare i modelli di combustibile all'interno del bosco, ma anche in formazioni forestali e agricole più aperte (e.g. arbusteti, prato-pascoli, boschi radi, oliveti) riferibili a altri modelli di combustibile Prometheus. Per entrambe le aree test (Sicilia e Toscana) sono state realizzate mappe di modelli di combustibile derivate da differente risoluzione geometrica. Nell'area test della Sicilia, la mappa dei modelli di

combustibile Prometheus è stata validata con la carta dei tipi forestali della Regione Sicilia (Hofmann et al., 2011). Ad ogni classe inventariale è stato attribuito un tipo di combustibile Prometheus, in funzione delle caratteristiche strutturali (altezza media del combustibile) e di fisionomia delle classi (Tabella 10). Da un’attenta verifica per fotointerpretazione ogni classe inventariale della carta dei tipi forestali è stata ricondotta ad uno o più fuel types, in quanto non è stato sempre possibile stabilire un rapporto 1:1 tra classi inventariali e fuel types talvolta inserendo nello stesso modello di combustibile più classi (Tabella 10). In particolare la classe inventariali “321- Praterie, pascoli e incolti” è riferibile a vegetazione erbaceo e arbustiva di altezza inferiore a 0,6 m (FT1-FT2) e la classe “31a – boschi” può essere attribuita a tre classi Prometheus (FT5, FT6 e FT7).

Tabella 10. Classi inventariali presenti nell’area test della Sicilia e il rispettivo modello di combustibile Prometheus.

Classe inventariale	Modello di combustibile Prometheus (FT)	Fisionomia
321 - praterie, pascoli, incolti	FT1, FT2	Vegetazione erbacea e arbustiva bassa con altezza media del combustibile non superiore a 0,6 metri da terra
32x - arbusteti e macchie	FT3	Formazioni forestali di tipo arbusteto, con altezza media del combustibile compresa mediamente tra 0,6 e 2 metri da terra
31c - aree temporaneamente prive di copertura forestale	FT3	Formazioni forestali di tipo arbusteto, con altezza media del combustibile compresa mediamente tra 0,6 e 2 metri da terra
31b - boschi radi (copertura 5-10%)	FT4	Formazioni forestali di tipo arbusteto, boscaglia con altezza media del combustibile compresa mediamente tra 2 e 4 metri da terra
31a - boschi (copertura >10%)	FT5, FT6, FT7	Formazioni forestali di tipo bosco con altezza media del combustibile > di 4 metri da terra

Nell’area test della Toscana a Monte Morello, la mappa dei tipi di combustibile Prometheus, derivata LIDAR è stata invece validata sulla base della carta di uso del suolo realizzata ad hoc per fotointerpretazione. Nella realizzazione della carta di uso del suolo si è tenuto conto del fuel type, determinando la classe di uso del suolo associata al modello di combustibile rappresentato (cfr.

Tabella 11). La classe degli oliveti, peraltro molto rappresentata in termini di superficie (225,7 ettari), è stata assimilata al modello di combustibile FT4, poiché generalmente la copertura arborea è al di sotto di 4 metri. Inoltre nelle aree agricole la copertura di tali impianti non supera mai il 50%, pertanto questa classe d'uso del suolo, anche se appartenente alle superfici agricole è stata inserita come rappresentante a terra della struttura del modello di combustibile 4.

Tabella 11. Classi di uso del suolo presenti nell'area test di Monte Morello (FI) e rispettivo modello di combustibile Prometheus.

Classe di uso del suolo	Modello di combustibile Prometheus (FT)	Fisionomia
Prati/pascolo	FT1	Vegetazione erbacea con altezza media del combustibile non superiore a 0,3 metri da terra
Arbusteti con altezza inferiore a 0,6 m	FT2	Formazioni forestali di tipo arbusteto, con altezza media del combustibile compresa mediamente tra 0,3 e 0,6 metri da terra
Arbusteti con altezza inferiore a 2 m	FT3	Formazioni forestali di tipo arbusteto, con altezza media del combustibile compresa mediamente tra 0,6 e 2 metri da terra
Arbusteti con altezza inferiore a 4 m	FT4	Formazioni forestali di tipo arbusteto, boscaglia con altezza media del combustibile compresa mediamente tra 2 e 4 metri da terra
Oliveti	FT4	Formazioni agricole con altezza media del combustibile compresa mediamente tra 2 e 4 metri da terra
Bosco	FT5, FT6, FT7	Formazioni forestali di tipo bosco con altezza media del combustibile oltre i 4 metri da terra

Per quanto riguarda i modelli di combustibile forestali invece, non è stato possibile fare distinzioni durante le operazioni di mappatura su base ortofoto, rilasciando quindi a tutti i modelli la classificazione bosco; pertanto, come nel caso dell'area di studio 1, la classe bosco presenta una relazione 1:3 con i modelli di combustibile Prometheus.

3.7 Spazializzazione di attributi strutturali

Le tecniche di spazializzazione sono basate sulla assimilazione del territorio indagato a una matrice di celle elementari (pixels). La variabile oggetto di interesse Y è quantificata a terra nelle unità campione; gli n pixels corrispondenti a queste unità costituiscono il cosiddetto reference set; per tutti gli N pixels della matrice sono inoltre noti i valori di variabili ancillari (ausiliarie); queste possono essere rappresentate da metriche ALS o dai valori del CHM (o anche dai DN di singole bande spettrali di immagini telerilevate di tipo ottico o da indici ottenuti dalla loro combinazione). Gli algoritmi di spazializzazione, operando secondo approcci correlativi di tipo parametrico o non parametrico, consentono di predire, in base ai valori delle variabili telerilevate sull'intera superficie, il valore dell'attributo oggetto di interesse nei pixel in corrispondenza dei quali non si hanno unità campione a terra. Queste tecniche sono state ampiamente testate e sono oggi disponibili strumenti software di semplice applicazione che ne permettono l'implementazione operativa anche da parte di tecnici forestali preparati (Chirici et al., 2012).

Nel caso di dati ALS, l'approccio di spazializzazione più utilizzato è quello parametrico della regressione generalizzata: la stima del valore di Y per ciascun pixel avviene tramite la regressione istituita tra Y e le variabili ancillari, rappresentate dalle metriche ALS, utilizzando come riferimento i valori del reference set (Corona, 2010). Il modello è in genere lineare multiplo del tipo $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_q X_q$, dove $X_1 \dots X_q$ sono le metriche ALS; l'identificazione delle metriche da includere nel modello di regressione per la stima dell'attributo di interesse è in genere operata mediante tecniche stepwise (Montaghi et al., 2013).

L'obiettivo 2 del presente lavoro è stato raggiunto attraverso alcune delle tecniche di spazializzazione descritte precedentemente. Gli strati informativi come la mappa delle altezze, di volume e biomassa forestale, sono stati ricavati sia direttamente dall'implementazione dei software per la gestione di dati LiDAR (las tools, Figure 7, 8), sia indirettamente attraverso l'implementazione di metodi di spazializzazione parametrici sulla correlazione tra altezza derivata da LiDAR e volume e/o biomassa derivata sulla base di dati in campo (Clementel et al., 2010). All'interno delle aree di saggio, l'altezza media derivata da LiDAR sulla base di immagini a 20 e 50 metri di risoluzione geometrica è stata correlata con quella misurata a terra. In tal senso, anche il volume e la biomassa forestale è stata correlata con l'altezza della canopy derivata da LiDAR.

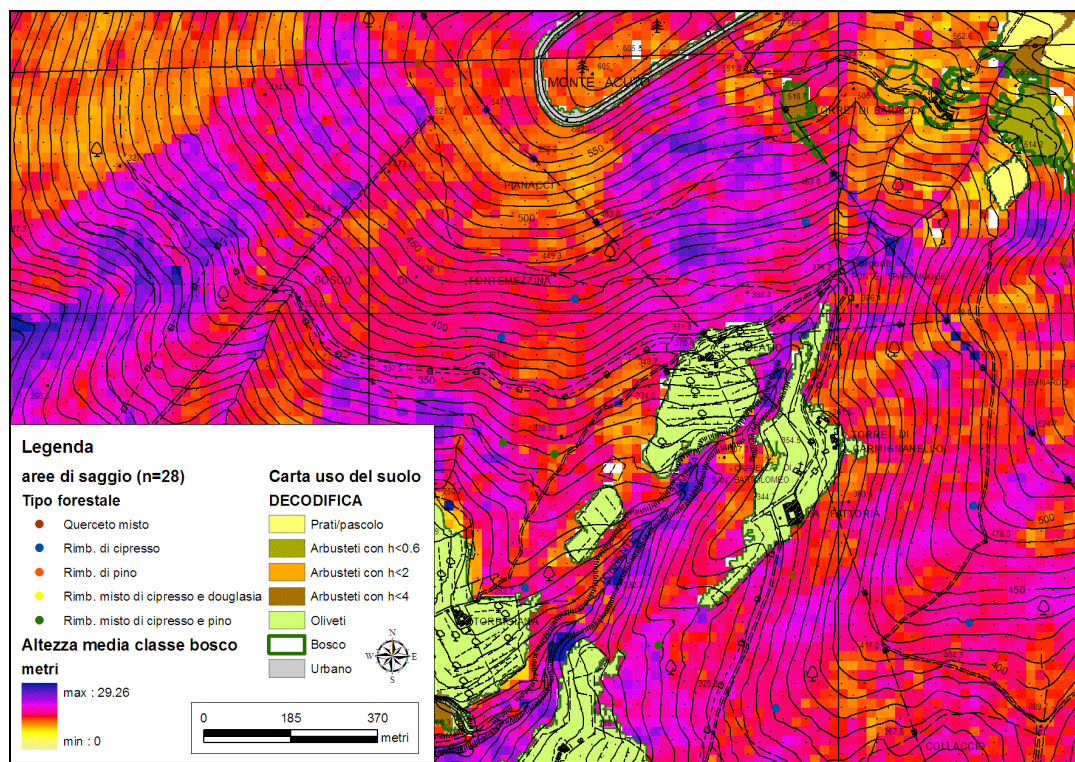


Figura 7. Area di studio 2 Toscana, esempio di derivazione diretta da LiDAR di altezza media (m) del bosco.

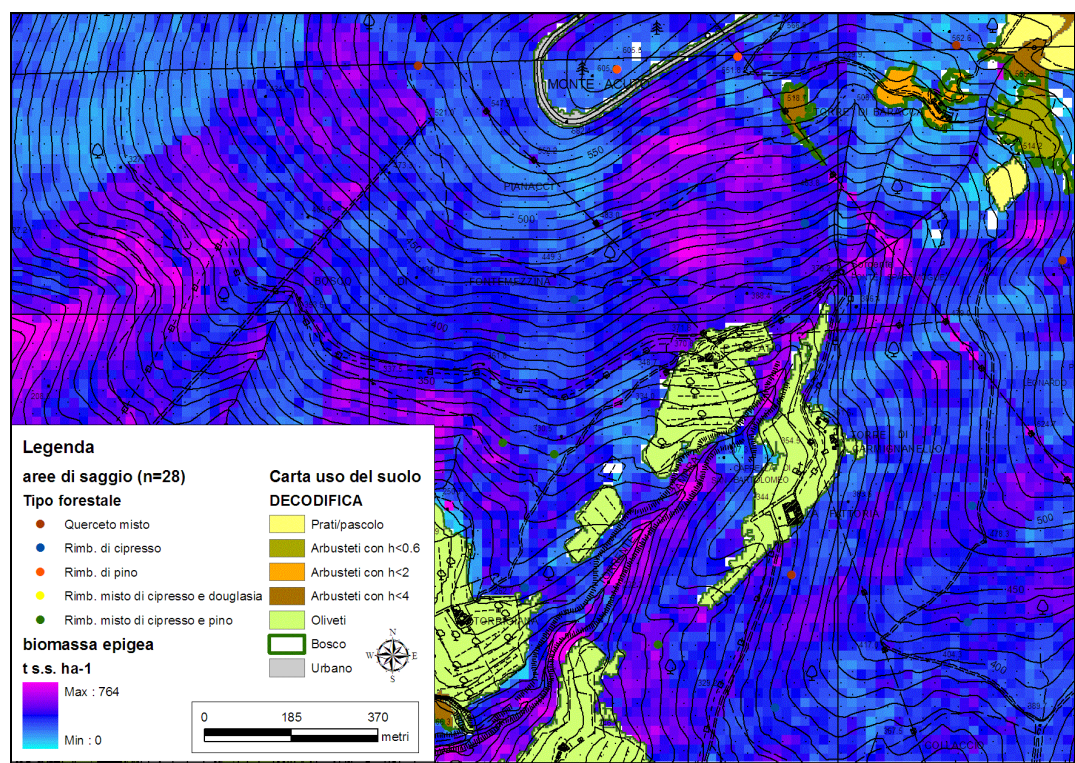


Figura 8. Area di studio 2 Toscana, esempio di spazializzazione LiDAR della biomassa epigea (t s.s. ha-1) del bosco.

Per sviluppare mappe di volume e biomassa sull'intera superficie dell'area di studio coperta da bosco, l'altezza LiDAR della vegetazione superiore a 4 metri (soglia Prometheus per il bosco) è

stata inserita come variabile dipendente nella funzione analitica di regressione lineare. Infine, la funzione matematica di regressione è stata implementata in ambiente GIS per la derivazione di immagini raster, che restituiscono la distribuzione pixel per pixel del valore di volume legnoso ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) e di biomassa forestale (t s.s. ha^{-1} , Figura 8).

4. Risultati

I risultati prodotti evidenziano nell'ambito di questa sperimentazione la capacità del LiDAR di classificare modelli di combustibile a partire soltanto da dati di tipo quantitativo, rappresentati dai ritorni degli impulsi emessi dal sensore, montato su piattaforma aerea, che raggiungono il terreno e la vegetazione. Sono stati prodotti strati informativi utilizzabili come geodataset di input nei moderni software che simulano il comportamento del fuoco in foresta (e.g. FARSITE, Fuel Paradox). In particolare per le due aree di studio sono state derivate da LiDAR, in riferimento agli obiettivi della sperimentazione i seguenti geodatasets:

Obiettivo 1 - Mappatura dei modelli combustibile di tipo Mediterraneo secondo il sistema Prometheus: mappe di combustibile raster e vettoriali basate sul modello di classificazione Prometheus derivate da elaborazioni a 20 e 50 metri di risoluzione geometrica della nuvola di punti grezza.

Obiettivo 2 - Stima su base spaziale di attributi strutturali utilizzabili come variabili di input per strumenti matematici che modellizzano il comportamento del fuoco in foresta e/o per la pianificazione spaziale di interventi di riduzione del carico di combustibile: mappe di altezza della vegetazione, volume e biomassa forestale derivate da elaborazioni a 20 m metri di risoluzione geometrica della nuvola di punti grezza.

I paragrafi che seguono illustrano nel dettaglio i risultati conseguiti.

4.1 Mappatura dei modelli di combustibile di tipo Mediterraneo secondo il sistema Prometheus

4.1.1 Cartografie e statistiche dei modelli di combustibile

Per l'area di studio 1 si evidenzia che il modello di combustibile più rappresentato sia per mappe dei modelli di combustibile derivate da risoluzione spaziale di 20 (Figura 10, 12) sia di 50 metri (Figura 18, 20) è la tipologia di arbusteto riferibile al fuel type 3.

La superficie percentuale interessata dal modello di combustibile FT3 varia tra 34,6 e 43,9%. I modelli di combustibile forestali nel loro insieme (FT5, FT6) rappresentano la seconda tipologia di combustibile più diffusa, con valori di estensioni variabili tra 26,9% e 28,2% rispetto al totale della superficie mappata. In questo caso però i risultati raggiunti, data la scarsa penetrazione del segnale LiDAR sotto copertura, denotano una bassa accuratezza nella identificazione di formazioni forestali caratterizzate da elevato carico di combustibile (FT6; vd. Tabelle 12, 13, 14).

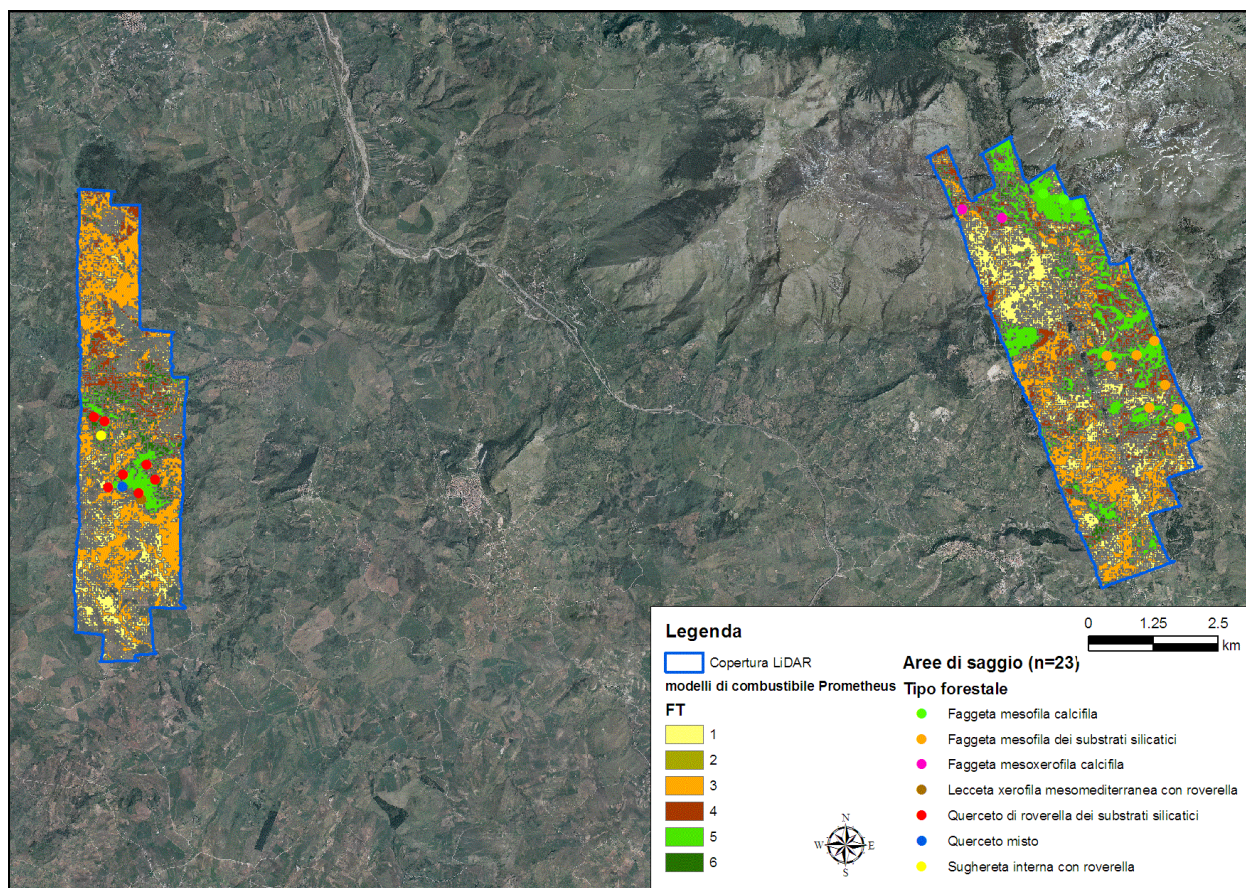


Figura 9. Area di studio 1- Mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (risoluzione spaziale 20 metri) su base ortofoto IT2000.

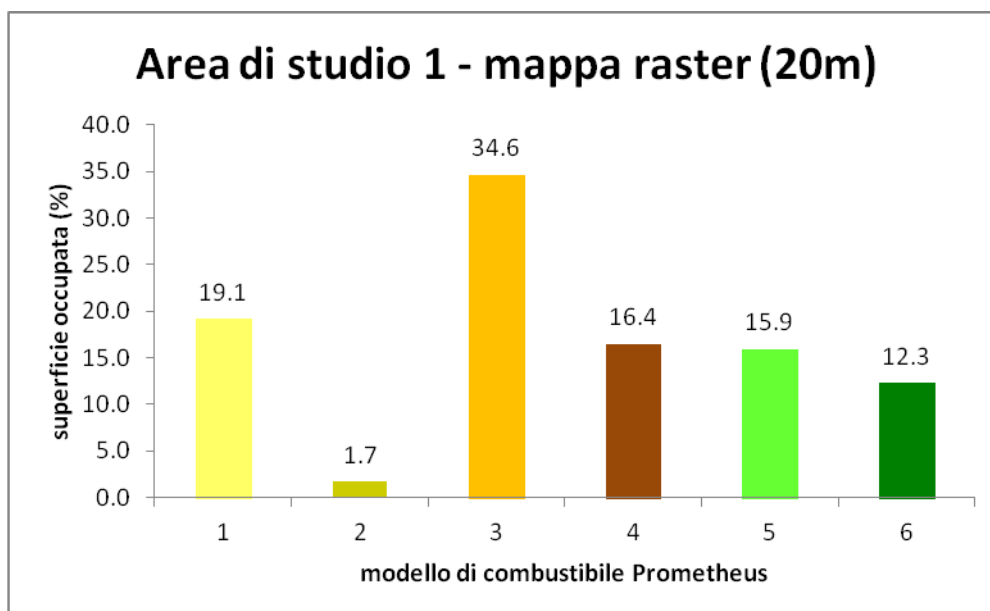


Figura 10. Mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da risoluzione spaziale di 20 metri dell'area di studio 1: rappresentazione grafica della superficie occupata da ciascun modello.

Gli arbusteti alti (FT4) e le praterie (FT1) rappresentano, in larga parte, la superficie residua. Confrontando gli istogrammi (Figura 10, 12, 18, 20) non si notano risultati molto dissimili per le differenti risoluzioni spaziali (20 e 50 metri) tra le superfici relative afferenti alle diverse classi di combustibile. Tendenzialmente le mappe vettoriali, per i modelli di combustibile rappresentati da aree di ridotta estensione ($<5.000 \text{ m}^2$) restituiscono valori (%) di superficie mappata inferiori rispetto alle mappe dei modelli di combustibile raster, che riescono a fornire un quadro più particolareggiato sulla presenza dell'eterogeneità spaziale dei modelli di combustibile Prometheus presenti.

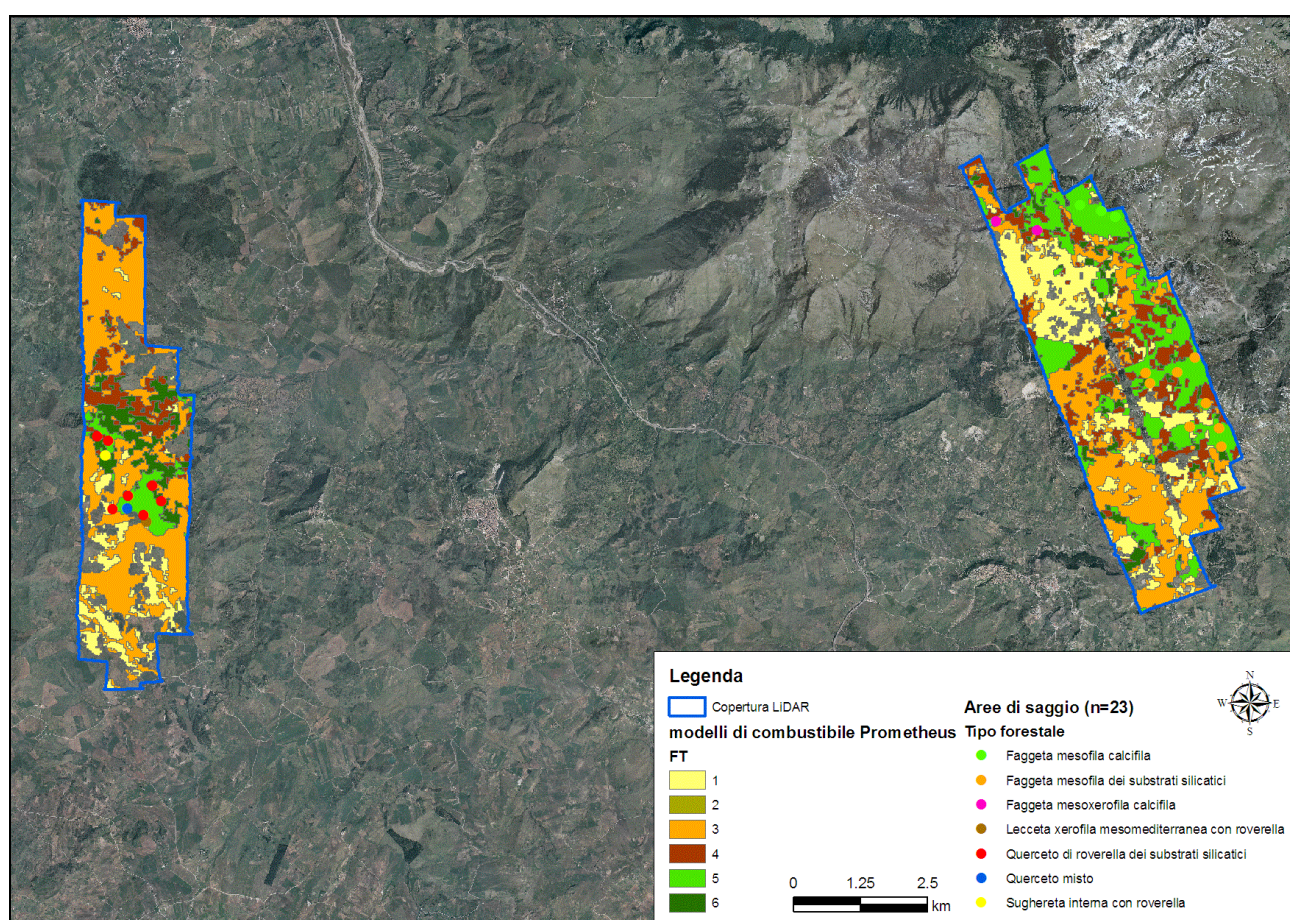


Figura 11. Area di studio 1- Mappa vettoriale dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (risoluzione spaziale 20 metri) su base ortofoto IT2000.

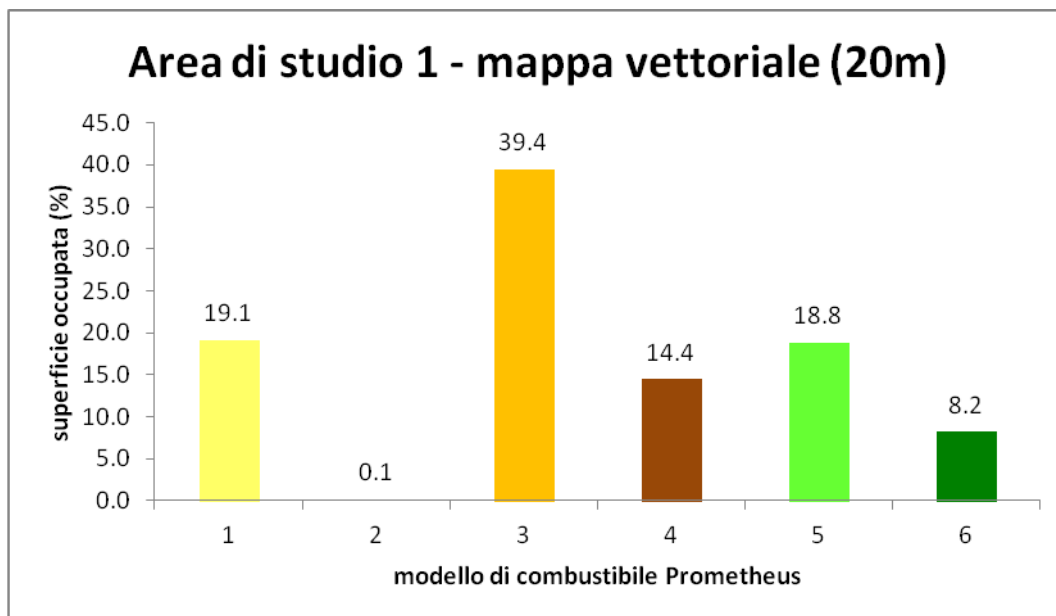


Figura 12. Mappa vettoriale dei modelli di combustibile Prometheus derivata da risoluzione spaziale di 20 metri dell'area di studio 1: rappresentazione grafica della superficie occupata da ciascun modello.

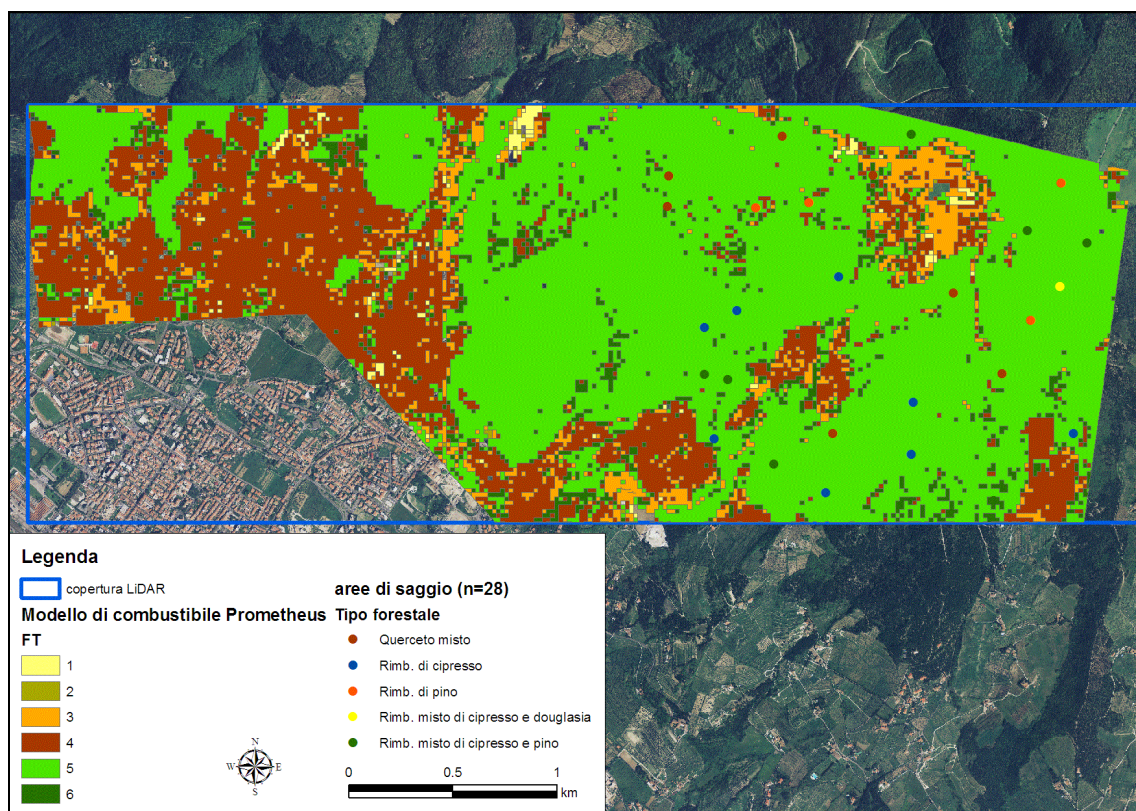


Figura 13. Area di studio 2 – Mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (risoluzione spaziale 20 metri) su base ortofoto 2007.

Per quanto riguarda l'area di studio 2 invece la maggior parte del territorio è stato mappato come fuel type 5, raggiungendo valori di superficie in termini di frequenza relativa sempre maggiore del 60% (Figura 14, 16, 22, 24). La superficie relativa mappata come modello di combustibile FT6

varia tra 0,7% e 9,2%, in particolare il valore più elevato è stato riscontrato nella mappa vettoriale dei modelli di combustibile derivata da risoluzione spaziale di 50 metri (Figure 23, 24) mentre il valore minimo è riferibile alla mappa vettoriale derivata da pixels di 20 metri (Figure 15, 16). La presenza di modelli di combustibile caratterizzati da altezze della vegetazione ridotte (inferiori a 0,6 metri) risulta marginale, e talvolta risulta assente nelle mappe vettoriali dei combustibili il fuel type 2 (cfr. Figure 15, 16, 23, 24). La superficie mappata come fuel type 3 è variabile tra 4,1% e 7,1%, mentre i valori relativi in termini di superficie per il modello di combustibile FT4 sono più elevati e variano tra 22,9% e 28,2% (cfr. Figure 15, 16, 23, 24).

Inoltre non si ravvisano aree classificate con modello di combustibile FT7, presenti invece nelle aree campione (AdS, cfr. Tabella 15), che rappresentano pertanto modelli di combustibile difficilmente derivabili con l'utilizzo di dati LiDAR a bassa densità di punti e penetrazione sotto chioma.

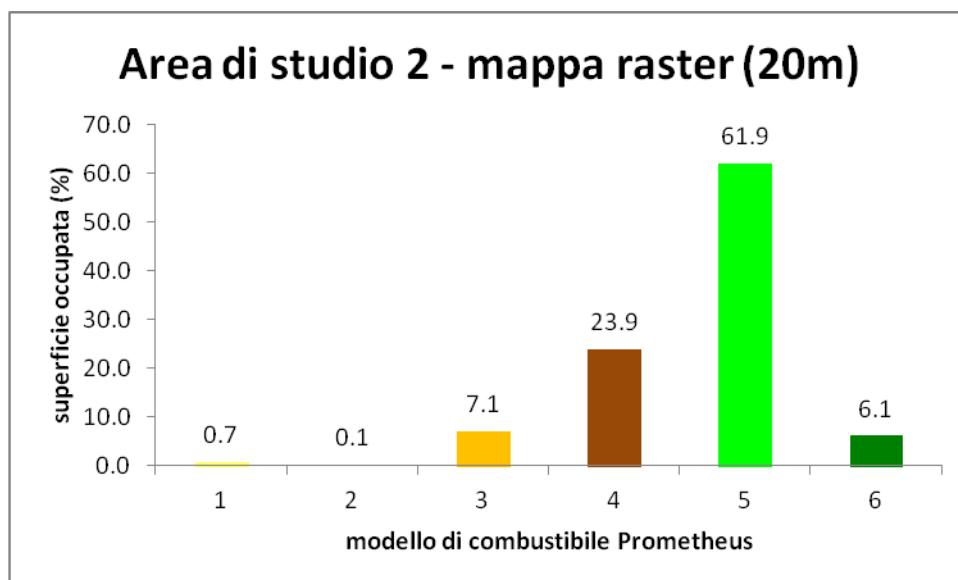


Figura 14. Mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da risoluzione spaziale di 20 metri dell'area di studio 2: rappresentazione grafica della superficie occupata da ciascun modello.

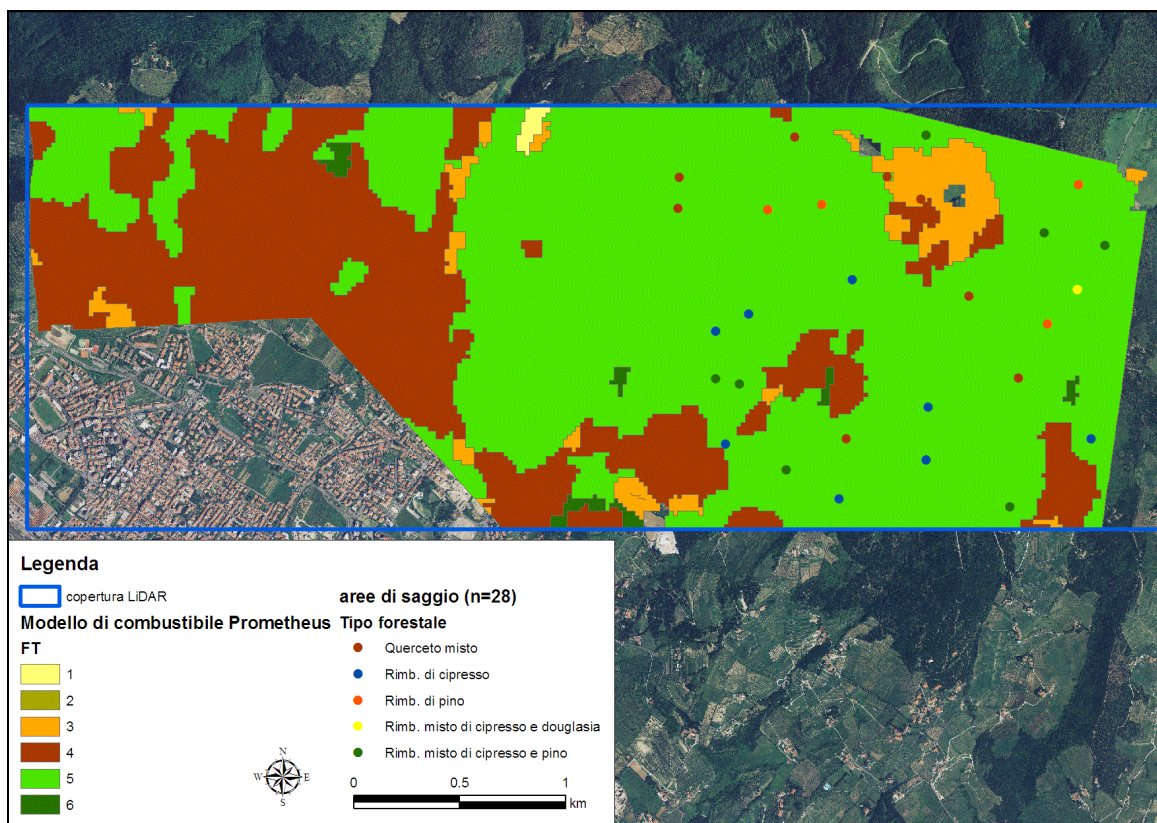


Figura 15. Area di studio 2 – Mappa vettoriale dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (risoluzione spaziale 20 metri) su base ortofoto 2007.

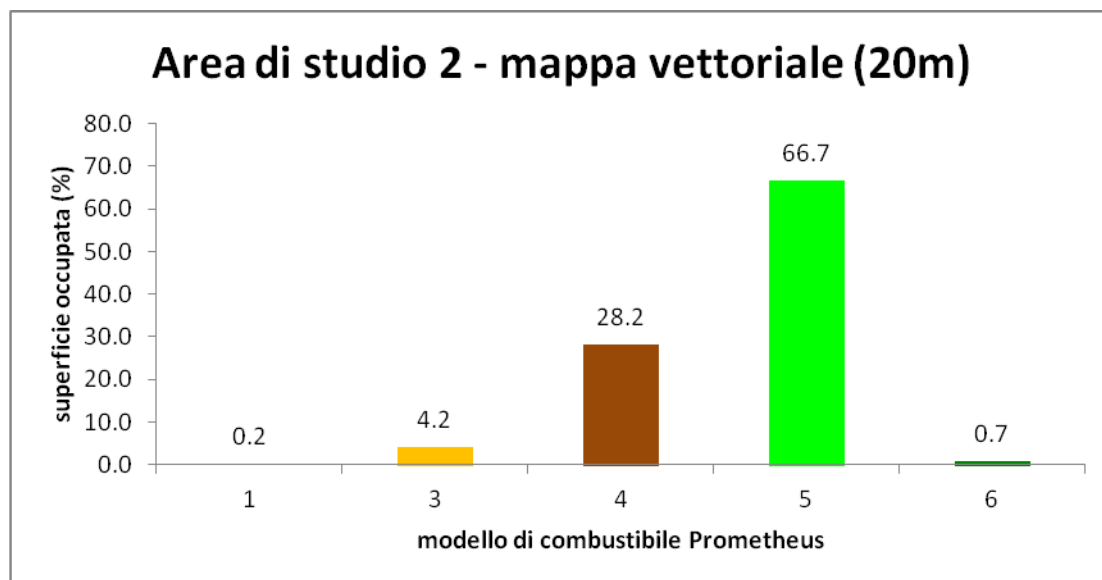


Figura 16. Mappa vettoriale dei modelli di combustibile Prometheus derivata da risoluzione spaziale di 20 metri dell'area di studio 2: rappresentazione grafica della superficie occupata da ciascun modello.

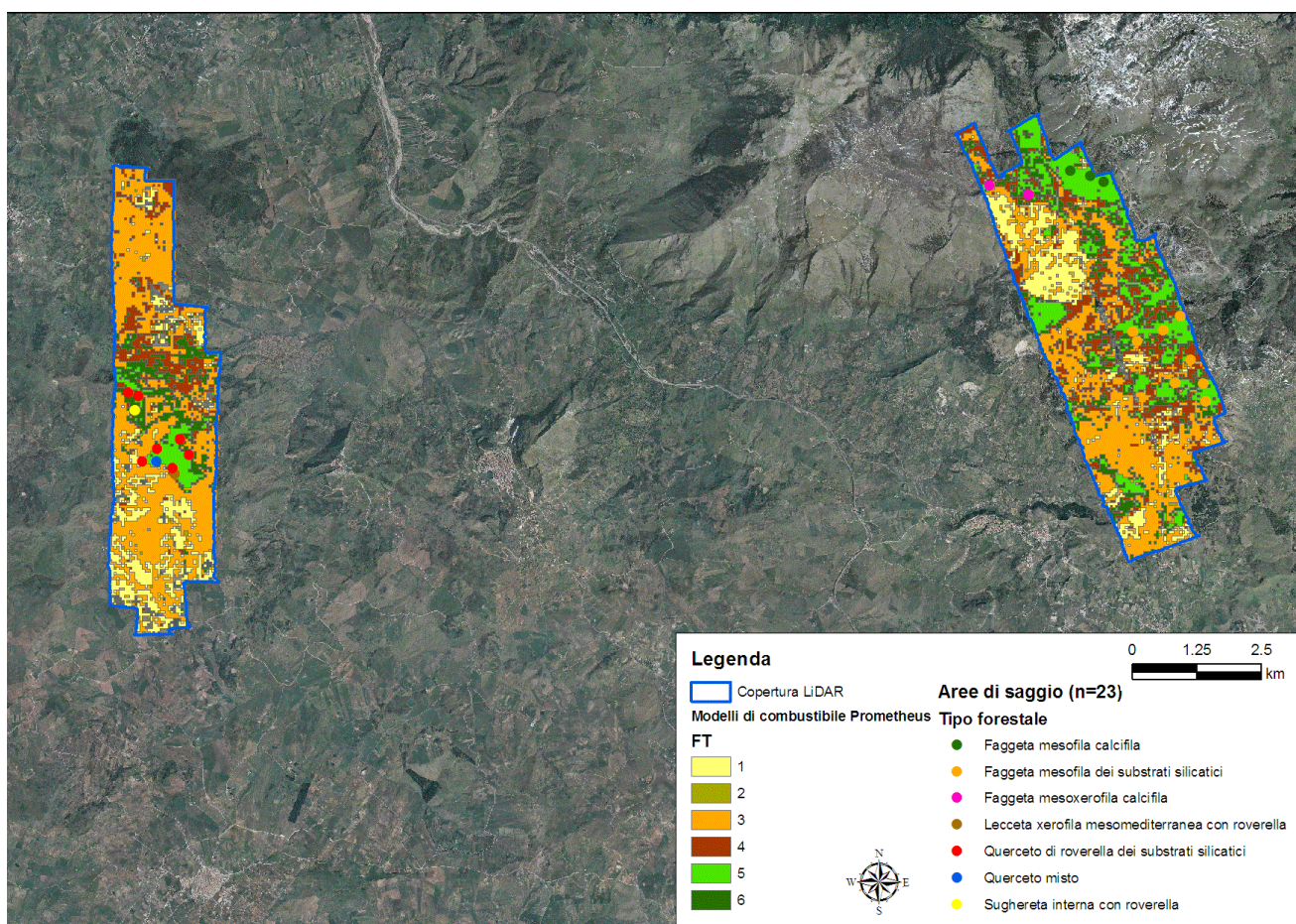


Figura 17. Area di studio 1- Mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (risoluzione spaziale 50 metri) su base ortofoto IT2000.

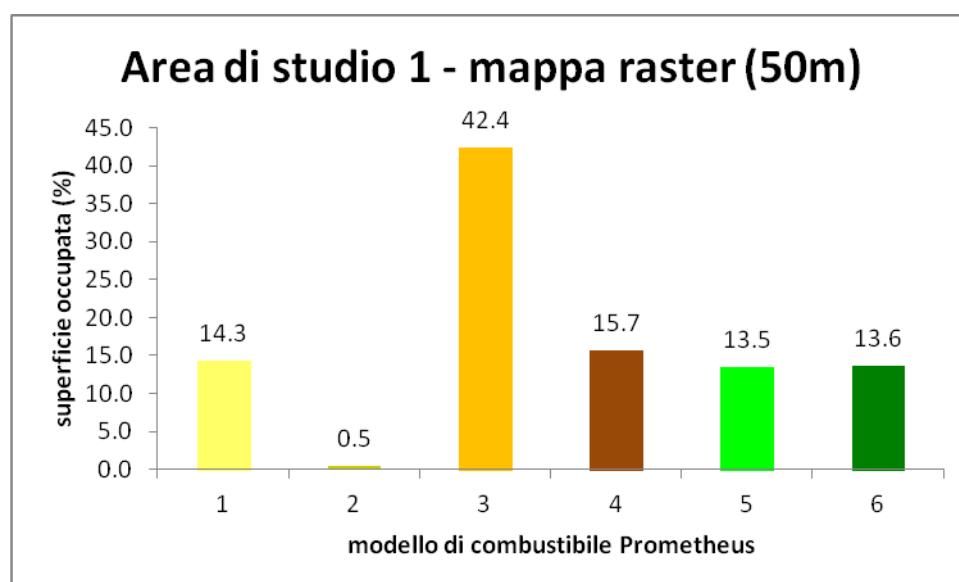


Figura 18. Mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da risoluzione spaziale di 50 metri dell'area di studio 1: rappresentazione grafica della superficie occupata da ciascun modello.

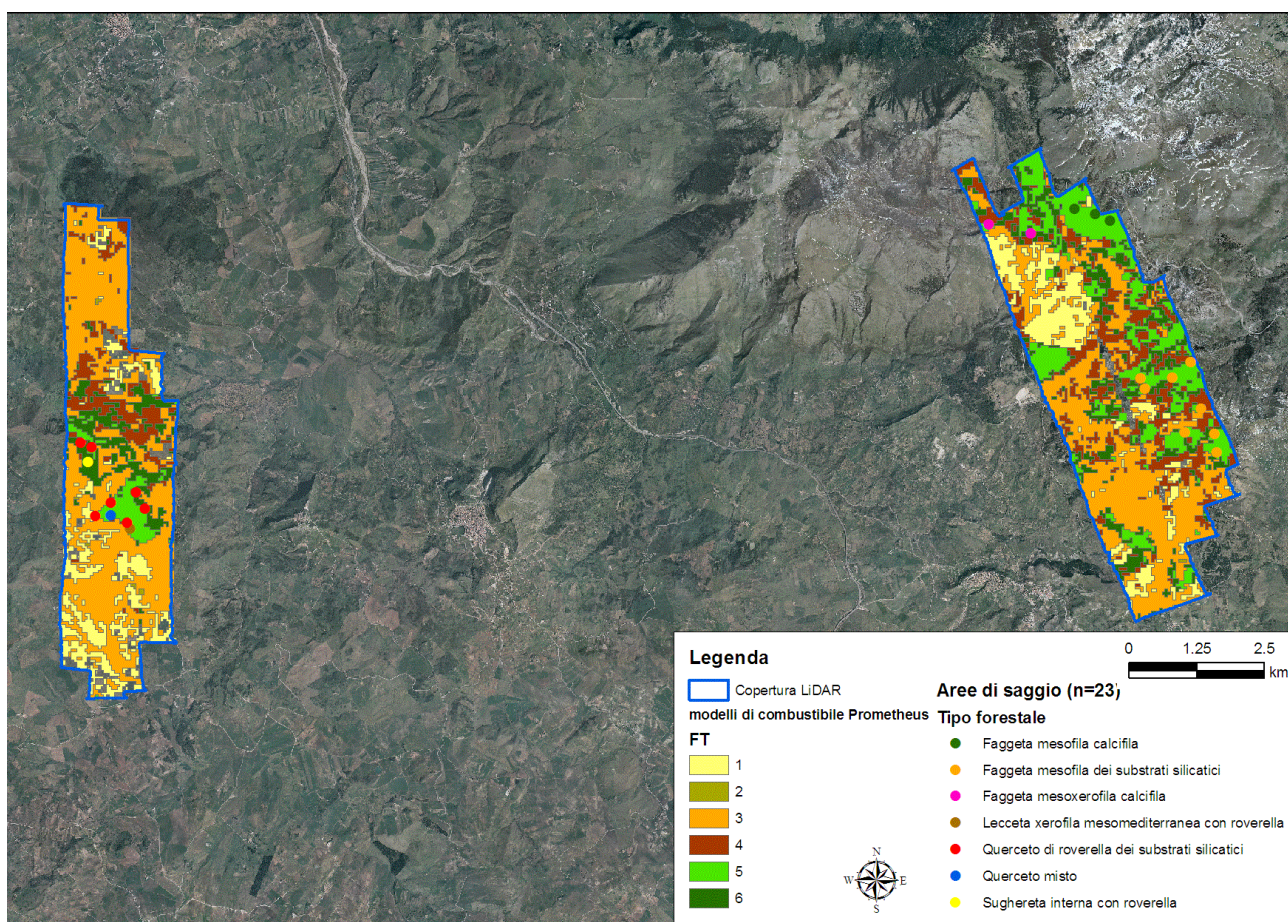


Figura 19. Area di studio 1- Mappa vettoriale dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (risoluzione spaziale 50 metri) su base ortofoto IT2000.

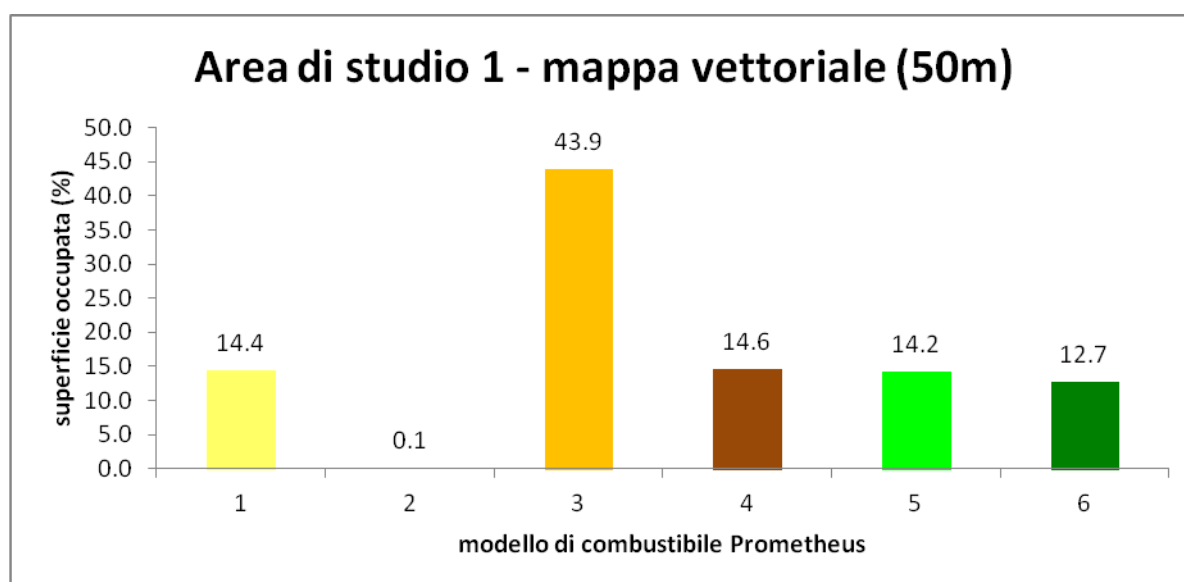


Figura 20. Mappa vettoriale dei modelli di combustibile Prometheus derivata da risoluzione spaziale di 50 metri dell'area di studio 1: rappresentazione grafica della superficie occupata da ciascun modello.

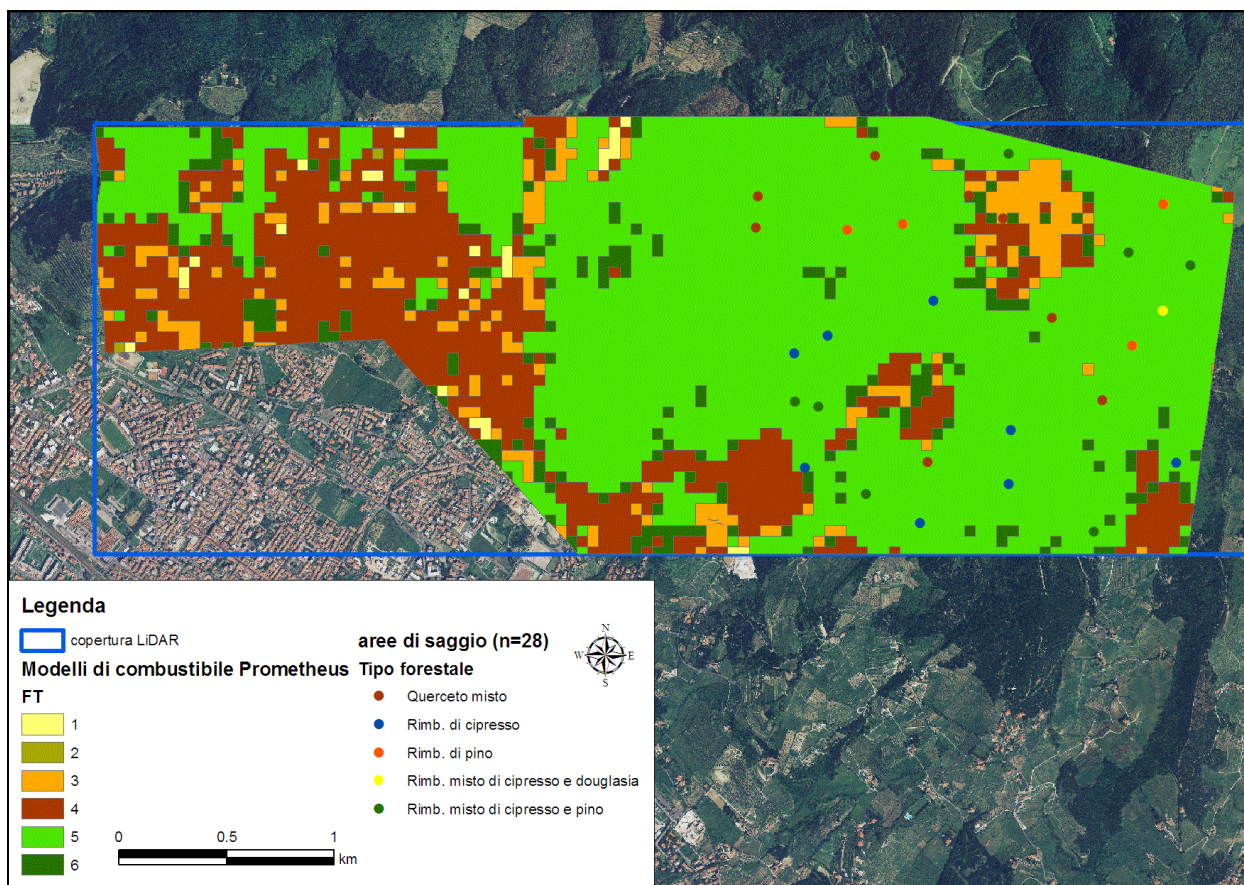


Figura 21. Area di studio 2- Mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (risoluzione spaziale 50 metri) su base ortofoto 2007.

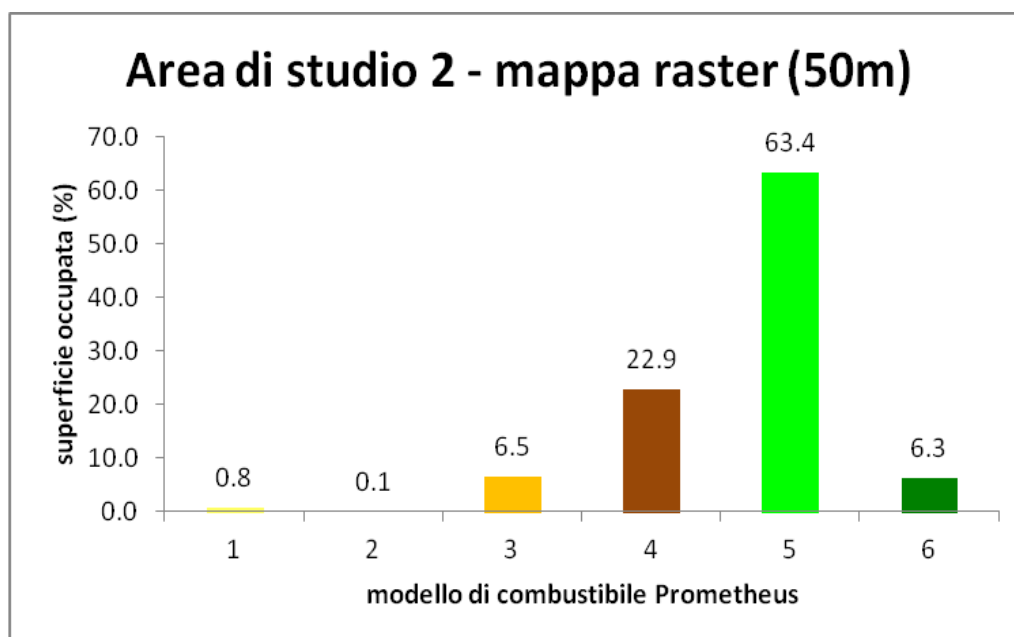


Figura 22. Mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da risoluzione spaziale di 50 metri dell'area di studio 2: rappresentazione grafica della superficie occupata da ciascun modello.

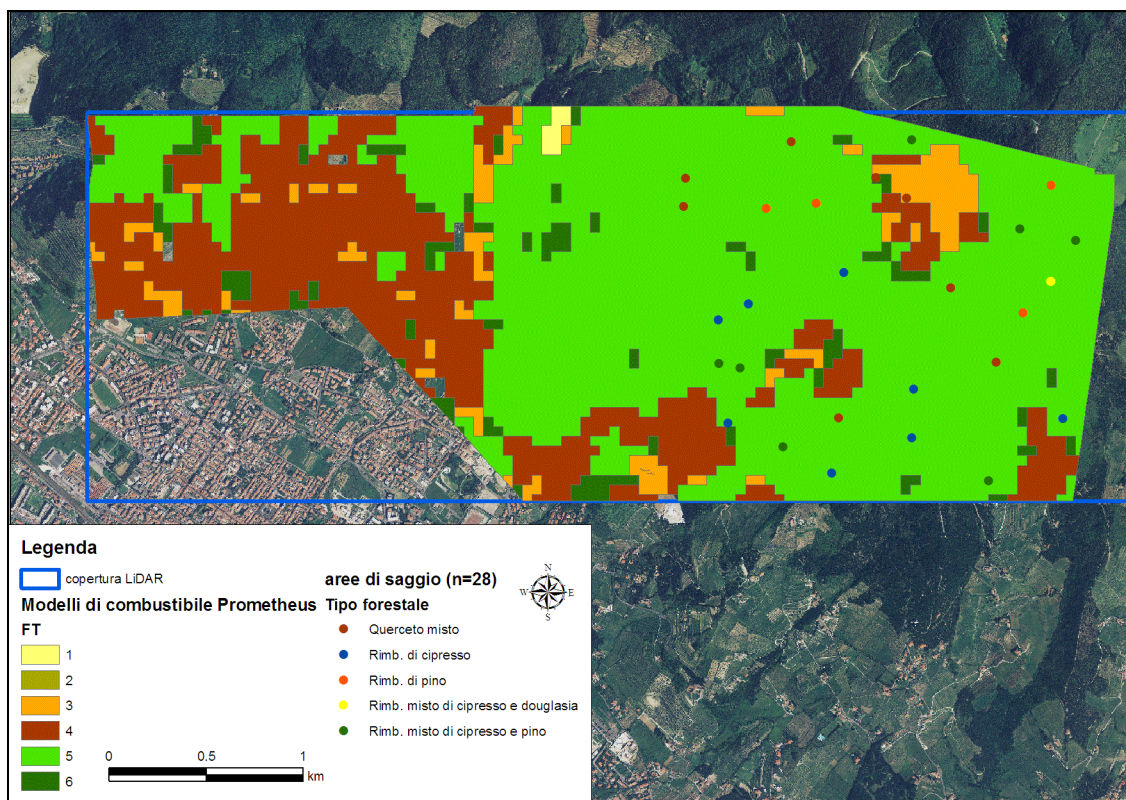


Figura 23. Area di studio 2- Mappa vettoriale dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (risoluzione spaziale 50 metri) su base ortofoto 2007

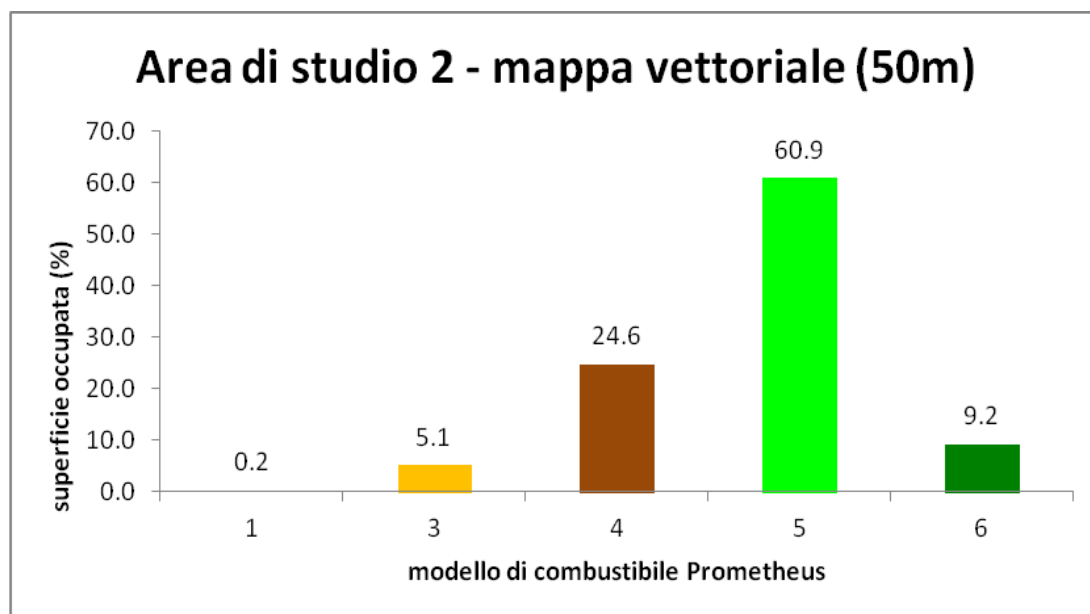


Figura 24. Mappa vettoriale dei modelli di combustibile Prometheus derivata da risoluzione spaziale di 50 metri dell'area di studio 2: rappresentazione grafica della superficie occupata da ciascun modello.

4.1.2 Accuratezza della classificazione dei modelli di combustibile forestali (FT5, FT6, FT7)

Le aree campione (AdS) per la verifica delle prestazioni del classificatore LIDAR per la mappatura dei fuel types relativi a aree interessate da coperture forestali sono 23 per l'area di studio 1 in Sicilia e 28 per quella sita in Toscana (Area di studio 2). In questo caso le aree all'interno del bosco sono state realizzate per valutare la capacità del modello LiDAR di classificare modelli di combustibile forestali sotto copertura. In particolare da sottolineare il fatto che il dato LiDAR impiegato in questa ricerca è a bassa densità di punti (rispettivamente 0,4 e 1,5 per m⁻² per Toscana e Sicilia) e che la classificazione Prometheus è stata implementata senza l'ausilio di altri sensori di telerilevamento come invece è stato applicato nel caso di alcuni studi condotti sempre in ambiente mediterraneo (Arroyo et al., 2006; Garcia et al., 2011).

Nell'area di studio 1 il modello di combustibile FT5 è prevalente (87% delle AdS) rispetto al FT6 (13% delle AdS). L'area di studio 2 presenta una maggiore eterogeneità nei modelli di combustibile: il 78% delle AdS è attribuibile al FT5, il 14% al FT6 e 8% al FT7. Nell'area di studio 1 l'accuratezza del classificatore nelle aree di saggio quantificata attraverso la matrice di confusione (Tabelle 12-14) risulta abbastanza elevata solo per il modello di combustibile FT5, sia nel caso della mappa dei tipi di combustibile che riporta la classificazione in formato raster, sia per la mappa vettoriale derivata dalla precedente con superficie minima cartografabile 0,5 ettari. In particolare per il fuel type 5 si raggiunge il 100% di producers accuracy dell'estimatore nel caso della mappa raster con risoluzione geometrica di 20 e 50 metri. Questo risultato si replica per la mappa vettoriale dei modelli di combustibile derivata da mappa raster a 50 metri, mentre per quella derivata da pixels di 20 metri si scende al 95,5%. Le aree forestali interessate da fuel type 6, invece, non sono riconosciute dal classificatore come tali, almeno nelle mappe derivate da risoluzioni di 20 metri, ma vengono attribuite, nella maggior parte dei casi, al fuel type 5. Soltanto nel caso della mappa (sia raster che vettoriale) a 50 metri si raggiunge un'accuratezza del 33,3%.

Fuel types Prometheus AdS modello LiDAR						Producers accuracy (%)		
Fuel types Promethe us AdS terra	3	5	6	Totale				
	5	0	19	1	20	95,5		
	6	1	2	0	3	0		
	Totale	1	21	1	23			
Users accuracy (%)					0	90,5	0	82,6
Overall accuracy								

Fuel types Prometheus AdS modello LiDAR					Producers accuracy (%)	
Fuel types Prometheus AdS terra	3	5	6	Totale		
	5	0	20	0	20	100,0
	6	1	2	0	3	0,0
	Totale	1	22	0	23	
Users accuracy (%)					87,0	
					Overall accuracy	

Da sottolineare anche che la matrice di confusione della mappa dei modelli di combustibili raster con risoluzione di 50 metri riporta gli stessi risultati di quella in Tabella 14, pertanto non è stata riportata.

Tabella 14. Area di studio 1: matrice di confusione tra modelli di combustibile Prometheus nelle aree campione (n=23) derivati da LiDAR (mappa vettoriale) e calcolati sulla base di dati rilevati in campo (risoluzione geometrica 50 m).

Fuel types Prometheus AdS modello LiDAR					Producers accuracy (%)
					(%)
Fuel types Promethe us AdS terra	5	6	Totale		
	5	18	2	20	100,0
	6	2	1	3	33,3
Totale					23
					82,6
Users accuracy (%)					90,0
					33,3
					Overall accuracy

Il classificatore raggiunge livelli di producers accuracy ottimali (90-95%) anche nell'Area 2 unicamente per il FT5, mentre le aree interessate da FT6 e FT7 sono attribuite erroneamente al FT5 (Tabelle 15-17). Questo risultato comporta una overall accuracy del 75% e 71,4%, rispettivamente per le mappe di combustibile con risoluzione di 20 metri (raster e vettoriale) e per la mappa dei modelli di combustibile con risoluzione di 50 metri (raster e vettoriale). Non è stata inclusa nei risultati la matrice di confusione tra la verità a terra e la classificazione LiDAR (mappa raster) con risoluzione di 50 metri poiché avente gli stessi risultati riportati in Tabella 17.

Tabella 15. Area di studio 2: matrice di confusione tra modelli di combustibile Prometheus nelle aree campione (n=28) derivati da LiDAR (mappa vettoriale) e calcolati sulla base di dati rilevati in campo (risoluzione geometrica 20 m).

Fuel types Prometheus AdS modello LiDAR						Producers accuracy (%)
						(%)
Fuel types Prometheus AdS terra	3	5	6	7	Totale	
	5	1	21	0	0	22
	6	0	4	0	0	4
	7	0	2	0	0	2
Totale						28
						75,0
Users accuracy (%)						0
						77,8
						0
						0
						Overall accuracy

Tabella 16. Area di studio 2: matrice di confusione tra modelli di combustibile Prometheus nelle aree campione (n=28) derivati LiDAR (mappa raster) e calcolati sulla base di dati rilevati in campo (risoluzione geometrica 20 m).

Fuel types Prometheus AdS modello LiDAR						Producers accuracy (%)
		5	6	7	Totale	
Fuel types Prometheus AdS terra	5	21	1	0	22	95,6
	6	4	0	0	4	0,0
	7	2	0	0	2	0,0
	Totale	27	1	0	28	
						75,0
Users accuracy (%)		77,8	0,0	0,0	Overall accuracy	

Tabella 17. Area di studio 2: matrice di confusione tra modelli di combustibile Prometheus nelle aree campione (n=28) derivati da LiDAR (mappa vettoriale) e calcolati sulla base di dati rilevati in campo (risoluzione geometrica 50 m).

Fuel types Prometheus AdS modello LiDAR						Producers accuracy (%)
		3	5	6	7	Totale
Fuel types Prometheus AdS terra	5	1	20	1	0	22
	6	0	4	0	0	4
	7	0	2	0	0	2
	Totale	1	26	1	0	28
						71,4
Users accuracy (%)		0,0	76,9	0,0	0,0	Overall accuracy

4.1.3 Validazione della cartografia dei modelli di combustibile in base a mappe tematiche

In questo paragrafo sono presentati i risultati della valutazione dell'accuratezza della mappa dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR per le superfici delle aree di studio 1 (8.100 ha) e area di studio 2 (845 ha) coperte da mappe tematiche e riconducibili alla classificazione Prometheus (vd. § 3.5.2). La rappresentazione mediante matrici di confusione permette di evidenziare le accuratèzze statistiche dell'estimatore (modello). Le cartografie derivate con il modello classificatore LiDAR, alle diverse risoluzioni spaziali, sono state sovrapposte alle classi inventariali (Tabella 10) delle mappe tematiche per valutare il grado di congruenza tra le due cartografie attraverso una matrice di confusione (cfr. Tabelle 18, 19).

Area di studio 1 - Sicilia

Le matrici di confusione delle mappe raster e vettoriali derivate dalla risoluzione a 20 m sono riportate nelle Tabelle 18 e 19, mentre le Tabelle 20 e 21 riguardano le mappe derivate dall'elaborazione a 50 m. Nel complesso i livelli di overall accuracy variano tra 53.3% (50 m) e 55,7% (mappa vettoriale, 20 m).

Gli arbusteti e le macchie, associati anche a aree temporaneamente prive di copertura forestale corrispondenti al fuel type 3 rappresentano la classe Prometheus mappata con livelli dal classificatore LiDAR variabili tra il 71% (mappa raster, 20 m) e l'86% (mappa vettoriale, 50 m).

I livelli più bassi di producer accuracy (23-26%) si rilevano nella classe inventariale boschi radi, in larga parte attribuita dal classificatore al FT3 invece che al FT4.

La classe inventariale boschi, associata all'insieme delle classi FT5-FT7, presenta un livello di accuratezza variabile tra il 49% (mappa vettoriale, 20 m) al 52% (mappa vettoriale, 50 m).

Le aree caratterizzate da vegetazione erbaceo arbustiva bassa (FT1-FT2) presentano livelli accuratezza maggiore nelle cartografie derivate da elaborazioni a 20 m (58%) rispetto a quelle elaborate a 50 m (38%).

Tabella 18. Matrice di confusione tra la mappa vettoriale dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (pixel 20 metri) e la verità a terra espressa dalla carta dei tipi forestali della Regione Sicilia (estratto).

Superfici %	modello di combustibile Prometheus mappa LiDAR					
Classe inventariale carta dei tipi forestali	FT1+FT2	FT3	FT4	FT5+FT6	Totale	Producers accuracy (%)
praterie, pascoli, incolti (FT1+FT2)	58,5	31,1	6,3	4,1	100,0	58,5
arbusteti e macchie (FT3)	13,0	81,0	4,9	1,1	100,0	81,1
aree temporaneamente prive di copertura forestale (FT3)	8,7	82,6	8,7	0	100,0	
boschi radi (copertura 5-10%) (FT4)	17,6	52,8	22,9	6,7	100,0	22,9
boschi (copertura >10%) (FT5+FT6+FT7)	18,1	27,9	21,3	49,0	100,0	49,0
Users accuracy (%)	77,7	36,5	6,4	94,9		55,7 Overall accuracy

Tabella 19. Matrice di confusione tra la mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (pixel 20 metri) e la verità a terra espressa dalla carta dei tipi forestali della Regione Sicilia (estratto).

Superfici %	modello di combustibile Prometheus mappa LiDAR					
Classe inventariale carta dei tipi forestali	FT1+FT2	FT3	FT4	FT5+FT6	Totale	Producers accuracy (%)
praterie, pascoli, incolti (FT1+FT2)	57,7	30,3	8,6	3,4	100,0	57,7
arbusteti e macchie (FT3)	19,4	71,2	7,5	1,9	100,0	71,0
aree temporaneamente prive di copertura forestale (FT3)	14,2	69,5	16,3	0	100,0	
boschi radi (copertura 5-10%) (FT4)	18,4	48,1	24,0	8,5	100,0	24,0
boschi (copertura >10%) (FT5+FT6+FT7)	18,5	23,8	22,7	51,5	100,0	51,5
Users accuracy (%)	72,1	36,0	5,9	94,7		55,1 Overall accuracy

Tabella 20. Matrice di confusione tra la mappa vettoriale dei tipi di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (pixel 50 metri) e la verità a terra espressa dalla carta dei tipi forestali della Regione Sicilia (estratto).

Superfici %	modello di combustibile Prometheus mappa LiDAR					
Classe inventariale carta dei tipi forestali	FT1+FT2	FT3	FT4	FT5+FT6	Totale	Producers accuracy (%)
praterie, pascoli, incolti (FT1+FT2)	38,4	47,7	8,9	5,0	100,0	38,4
arbusteti e macchie (FT3)	6,2	85,2	6,8	1,8	100,0	
aree temporaneamente prive di copertura forestale (FT3)	0,0	88,6	7,2	4,2	100,0	
boschi radi (copertura 5-10%) (FT4)	1,4	63,1	25,0	10,5	100,0	25,0
boschi (copertura >10%) (FT5+FT6+FT7)	0,0	26,8	20,9	52,3	100,0	52,3
Users accuracy (%)	90,4	33,6	6,6	93,0		53,3 Overall accuracy

Tabella 21. Matrice di confusione tra la mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (pixel 50 metri) e la verità a terra espressa dalla carta dei tipi forestali della Regione Sicilia (estratto).

Superfici %	modello di combustibile Prometheus mappa LiDAR					
Classe inventariale carta dei tipi forestali	FT1+FT2	FT3	FT4	FT5+FT6	Totale	Producers accuracy (%)
praterie, pascoli, incolti (FT1+FT2)	38,4	46,6	10,4	4,6	100,0	38,4
arbusteti e macchie (FT3)	7,0	83,8	7,3	1,9	100,0	
aree temporaneamente prive di copertura forestale (FT3)	0,1	84,7	9,7	5,5	100,0	
boschi radi (copertura 5-10%) (FT4)	2,0	60,6	26,5	10,9	126,9	26,5
boschi (copertura >10%) (FT5+FT6+FT7)	0,1	25,7	21,6	52,6	100,0	52,6
Users accuracy (%)	88,9	33,9	6,6	93,2		53,3 Overall accuracy

Area di studio 2 - Toscana

Le matrici di confusione delle mappe raster e vettoriali derivate dalla risoluzione a 20 m sono riportate nelle Tabelle 22 e 23, mentre le Tabelle 24 e 25 riguardano le mappe derivate dall'elaborazione a 50 m. La sperimentazione evidenzia accuratezze complessive molto elevate per le mappe elaborate con una risoluzione spaziale di 20 metri, rispettivamente 90% per la mappa

vettoriale 86% per la mappa raster. La overall accuracy per la mappa vettoriale dei modelli di combustibile e la mappa raster a 50 metri si riduce rispettivamente a 87% e 85,2%. I boschi, associati all'insieme delle classi FT5-FT7 rappresentano la classe mappata con livelli più elevati di producers accuracy dal classificatore LiDAR con valori superiori al 90%. Anche gli oliveti e gli arbusteti con altezze comprese tra 2 e 4 m, associati al FT4, presentano livelli di accuratezza molto elevati variabile tra il 73% (mappa raster, 20 m) a 86% (mappa vettoriale, 20 m), seguiti dagli arbusteti con altezze comprese tra 0,6 e 2 m (47-59%). Anche in questo caso, i livelli di accuratezza più bassi sono associati alle classi caratterizzate da vegetazione erbaceo arbustiva bassa: i prati-pascoli (FT1) presentano livelli accuratezza maggiore nelle cartografie derivate da elaborazioni a 20 m (30-43%) rispetto a quelle elaborate a 50 m (15-21%). Accuratezze nulle si registrano nella classe arbusteti con $h < 0,6$ in larga parte attribuita al FT3, invece che al FT2.

Tabella 22. Matrice di confusione tra la mappa vettoriale dei tipi di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (pixel 20 metri) e la verità a terra espressa dalla carta di uso del suolo ad hoc per l'area di Monte Morello (FI).

Superfici %	modello di combustibile Prometheus mappa LiDAR						
Classe di uso del suolo	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5+FT6	Totale	Producers accuracy (%)
prati/pascolo	29,4	0	37,7	2,6	30,3	100,0	29,4
arbusteti con $h < 0,6$ m	0	0	88,7	7,5	3,8	100,0	0
arbusteti con $h < 2$ m	0	0	58,6	38,9	2,5	100,0	58,6
arbusteti con $h < 4$ m	0	0	58,4	8,0	33,6	10,1	86,7
oliveti	0	0	2,1	90,3	7,6	100,0	
bosco	0	0	2,8	4,0	93,2	100,0	93,2
Users accuracy (%)	98,1	0	3,3	89,4	96,0		90,5 Overall accuracy

Tabella 23. Matrice di confusione tra la mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (pixel 20 metri) e la verità a terra espressa dalla carta di uso del suolo ad hoc per l'area di Monte Morello (FI).

Superfici %	modello di combustibile Prometheus mappa LiDAR						
Classe di uso del suolo	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5+FT6	Totale	Producers accuracy (%)
prati/pascolo	42,8	0	22,4	16,7	18,1	100,0	42,8
arbusteti con $h < 0,6$ m	6,2	0	81,4	6,2	6,2	100,0	0
arbusteti con $h < 2$ m	0	0	55,1	28,0	16,9	100,0	55,1
arbusteti con $h < 4$ m	0,1	2,8	44,3	24,5	28,3	100,0	72,8
oliveti	0,9	0,1	12,4	74,9	11,7	100,0	
bosco	0,1	0,1	3,2	4,2	92,4	100,0	92,4
Users accuracy (%)	5,8	0	1,8	86,8	95,0		86,1 Overall accuracy

Tabella 24. Matrice di confusione tra la mappa vettoriale dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (pixel 50 metri) e la verità a terra espressa dalla carta di uso del suolo ad hoc per l'area di Monte Morello (FI).

Superfici %	modello di combustibile Prometheus mappa LiDAR						
Classe di uso del suolo	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5+FT6	Totale	Producers accuracy (%)
prati/pascolo	21,6	0	30,2	8,1	40,1	100,0	21,6
arbusteti con h<0,6 m	0	0	66,7	33,3	0	100	0
arbusteti con h<2 m	0	0	46,9	35,5	17,6	100,0	46,9
arbusteti con h<4 m	0	0	43,4	19,2	37,4	100,0	75,8
oliveti	0	0	7,0	78,3	14,7	100,0	
bosco	0,1	0	2,6	4,4	92,9	576,0	92,9
Users accuracy (%)	74,2	0	2,1	86,7	93,0		87,0 Overall accuracy

Tabella 25. Matrice di confusione tra la mappa raster dei modelli di combustibile Prometheus derivata da LiDAR (pixel 50 metri) e la verità a terra espressa dalla carta di uso del suolo ad hoc per l'area di Monte Morello (FI).

Superfici %	modello di combustibile Prometheus mappa LiDAR						
Classe di uso del suolo	FT1	FT2	FT3	FT4	FT5+FT6	Totale	Producers accuracy (%)
prati/pascolo	15,1	0	36,1	15,1	33,7	100,0	15,1
arbusteti con h<0,6 m	0	0	68,7	18,7	12,6	100,0	0
arbusteti con h<2 m	0	0	47,2	33,3	19,5	100,0	47,2
arbusteti con h<4 m	0	0	43,9	20,4	35,7	100,0	69,4
oliveti	2,0	0,2	10,4	71,6	15,8	226,1	
bosco	0,1	0	2,9	4,0	93,0	576,1	93,0
Users accuracy (%)	21,2	0	1,7	86,6	92,6		85,2 Overall accuracy

4.2 Stima su base spaziale di attributi strutturali

Per quanto riguarda l'obiettivo 2 (cfr. § 3.1) del presente lavoro, sono state condotte analisi in particolare sulla derivazione diretta e indiretta di parametri strutturali dei popolamenti forestali e ne è stata valutata l'accuratezza attraverso il confronto con misure rilevate in campo all'interno delle aree di saggio. Le principali variabili strutturali estratte, che sono necessarie all'implementazione di modelli che simulano il comportamento del fuoco in foresta (e.g. FARSITE), sono l'altezza media delle chiome degli alberi, il grado di copertura (misura diretta) e indirettamente anche il volume e la biomassa epigea del soprassuolo. L'estrazione dell'altezza media del popolamento è un procedimento piuttosto diretto durante il processamento di dati LiDAR con il pacchetto software las tools, così pure la stima del grado di copertura delle chiome degli alberi. La derivazione di mappe di volume e biomassa epigea è un'operazione indiretta che è stata attuata sulla base di regressioni lineari tra altezze medie calcolate sulla base di rilievi in campo e altezze medie derivate da LiDAR. I risultati ottenuti per le due aree di studio, in Sicilia e in Toscana, sull'accuratezza delle stime di altezza del soprassuolo da LiDAR, dimostrano una elevata capacità dello strumento di rappresentare l'andamento del profilo della vegetazione e la stima dell'altezza media del popolamento forestale. Nel caso specifico il profilo della vegetazione è stato tagliato a 4 metri perché nel sistema Prometheus tale soglia di altezza divide gli arbusti dalla componente arborea.

A tal proposito si osservano correlazioni più elevate per l'area di Monte Morello dove le mappe di altezza media del bosco registrano un R^2 maggiore di 0,9 confrontandole con la verità a terra rappresentata dalle misure di altezza media registrate nelle 28 aree di saggio. Mentre per l'area di studio in Sicilia è la risoluzione spaziale a 20 metri a fornire i risultati di correlazione ($R^2=0,76$) maggiore con le altezze medie rilevate in campo.

La maggiore accuratezza per Monte Morello potrebbe essere spiegata dal fatto che nell'area di studio 2 c'è una prevalenza di conifere, specie la cui altezza è più facilmente derivabile con l'utilizzo del LiDAR (Floris et al., 2009). Per entrambe le aree di studio, sono state realizzate mappe di altezza media del bosco (e.g. Figura 8). Per la spazializzazione dei volumi relativi alla provvigione legnosa del bosco ($m^3 ha^{-1}$; Figura 28), sono state prese in considerazione le funzioni di regressione lineare riportate nei grafici in Figura 12.

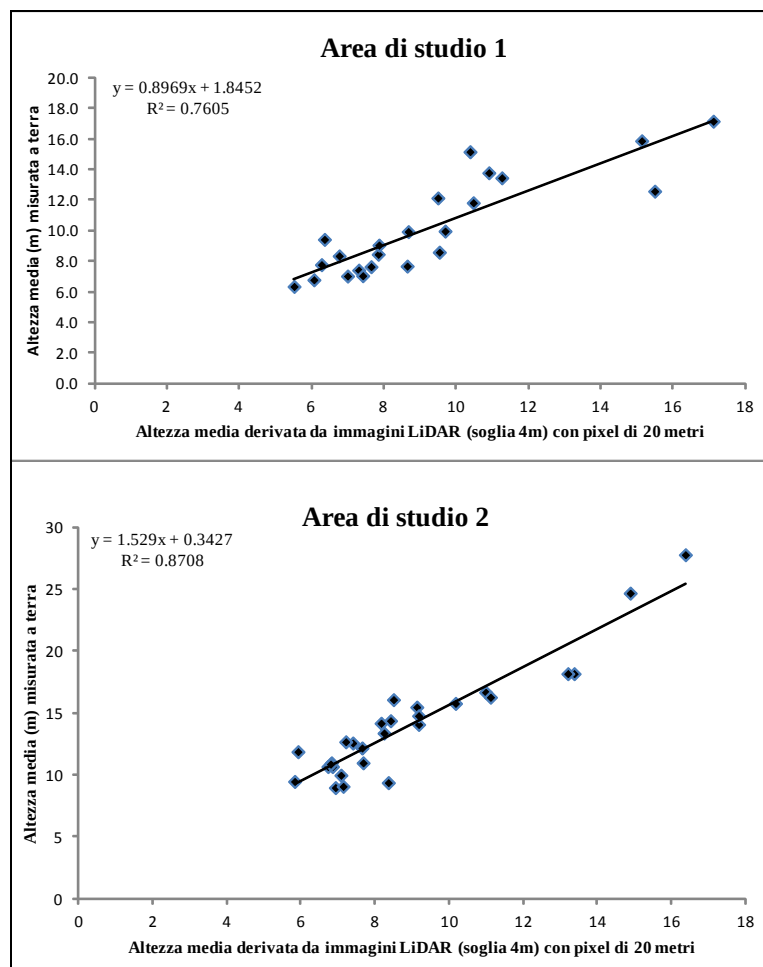


Figura 25. Grafici delle aree di studio (1, n=23; 2, n=28) a confronto: correlazione tra altezza media (m) del popolamento forestale misurata a terra nelle aree campione (AdS) e altezza media derivata da LiDAR.

Tali funzioni matematiche modellizzano il legame tra altezza media derivata da LiDAR e volume legnoso presente in bosco. In particolare per l'area di studio 1 si è osservata una buona correlazione ($R^2=0,73$) per il classificatore LiDAR con risoluzione spaziale di 20 metri, mentre nell'area di studio 2 la correlazione tra altezza media stimata da LiDAR e da terra è maggiore ($R^2=0,8708$). Dal confronto con i volumi calcolati per le due aree di studio, in Toscana si evidenzia anche una maggiore correlazione con le altezze medie stimate da LiDAR ($R^2=0,7913$). Confrontando i valori di volume legnoso ad ettaro delle due aree di studio nelle AdS si osserva una maggiore eterogeneità strutturale per i boschi della Sicilia, caratterizzati (in particolare all'interno della RN Orientata Bosco Favara e Granza) da querceti misti a prevalenza di roverella che si trovano in evidente stato di abbandono, senza alcuna forma di gestione selvicolturale e molto spesso oggetto di un elevato carico di pascolamento bovino. Molto simili a quelli precedentemente descritti per il volume legnoso (Figura 26) sono i risultati di correlazione tra la biomassa epigea (Figura 27) espressa in tonnellate di sostanza secca (t s.s.) e calcolata sulla base di coefficienti di espansione (BEF) e densità basale del legno (WBD). Anche qui, a partire dalle altezze medie LiDAR, le funzioni

matematiche di regressione lineare hanno condotto ad una spazializzazione della biomassa epigea su tutta la superficie delle aree di studio.

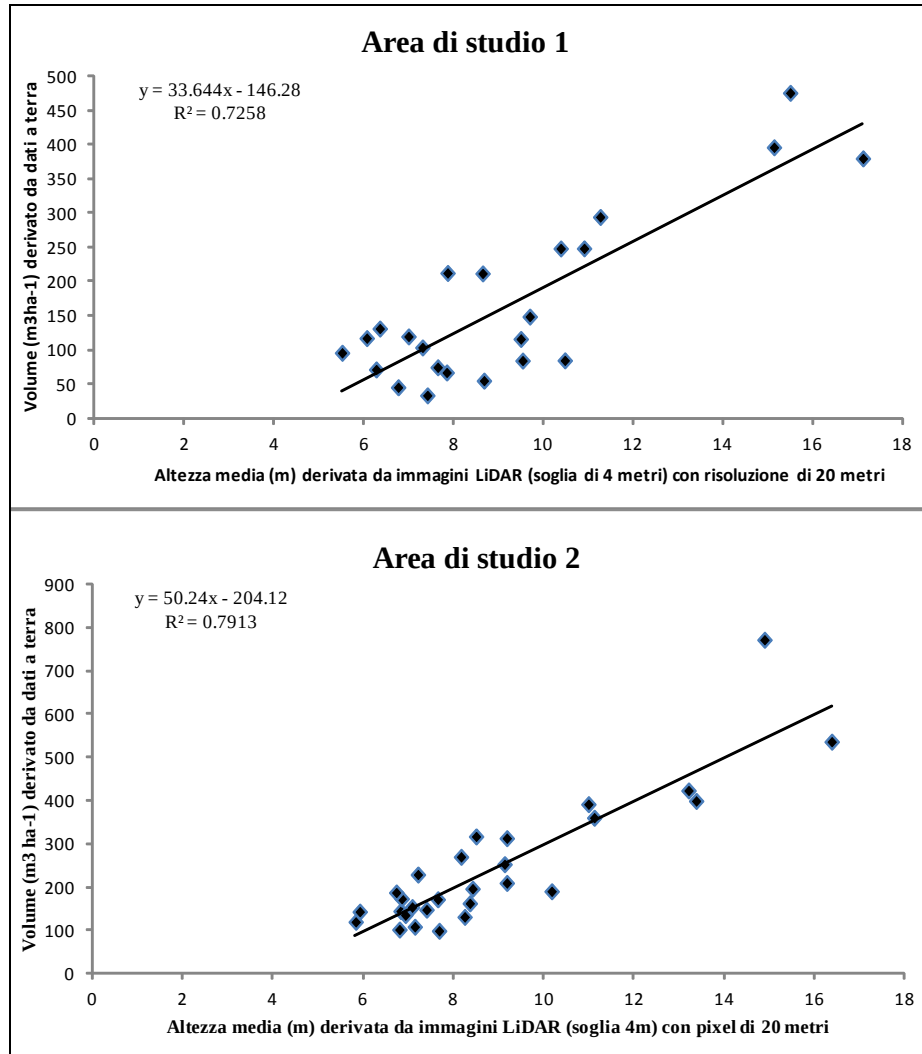


Figura 26. Grafici delle aree di studio (1, n=23; 2, n=28) a confronto: correlazione tra volume legnoso (m³ ha⁻¹) del popolamento forestale stimato attraverso dati rilevati a terra nelle aree campione e altezza media derivata da LiDAR.

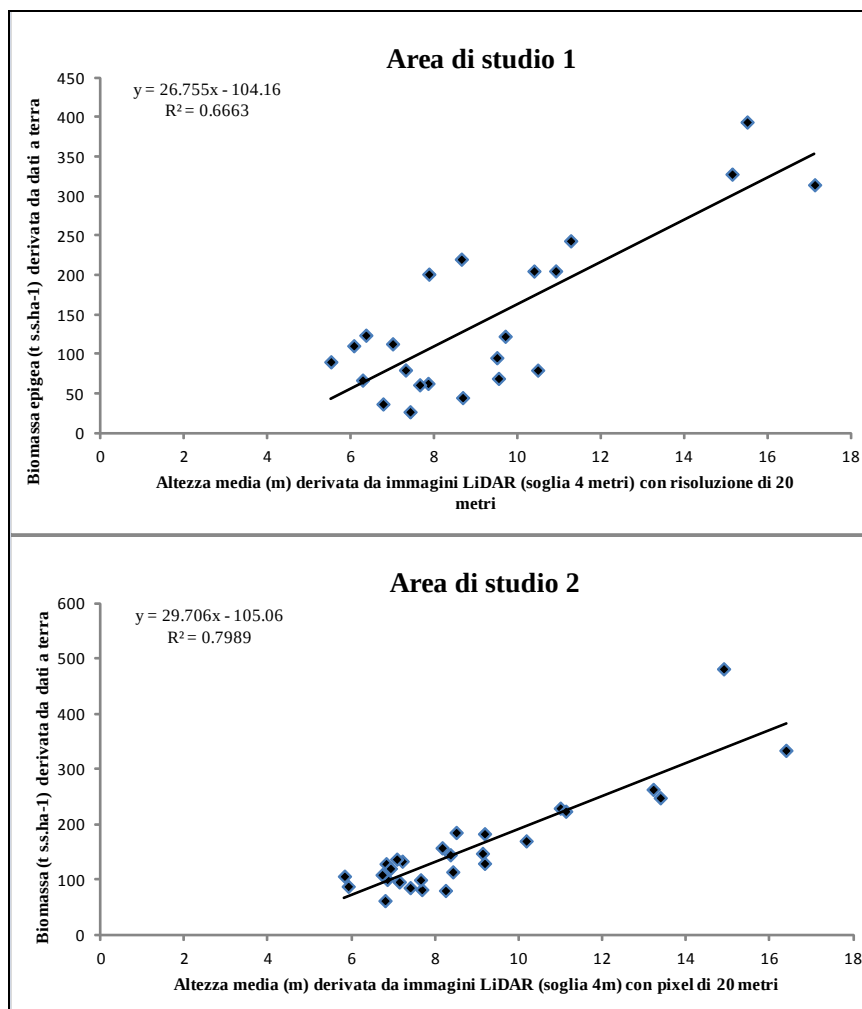


Figura 27. Grafici delle aree di studio (1, n=23; 2, n=28) a confronto: correlazione tra biomassa epigea (t s.s. ha⁻¹) del popolamento forestale stimato attraverso i coefficienti di BEF e WBD (Federici et al., 2007) e dati di campo e altezza media derivata da LiDAR a differenti risoluzioni spaziali.

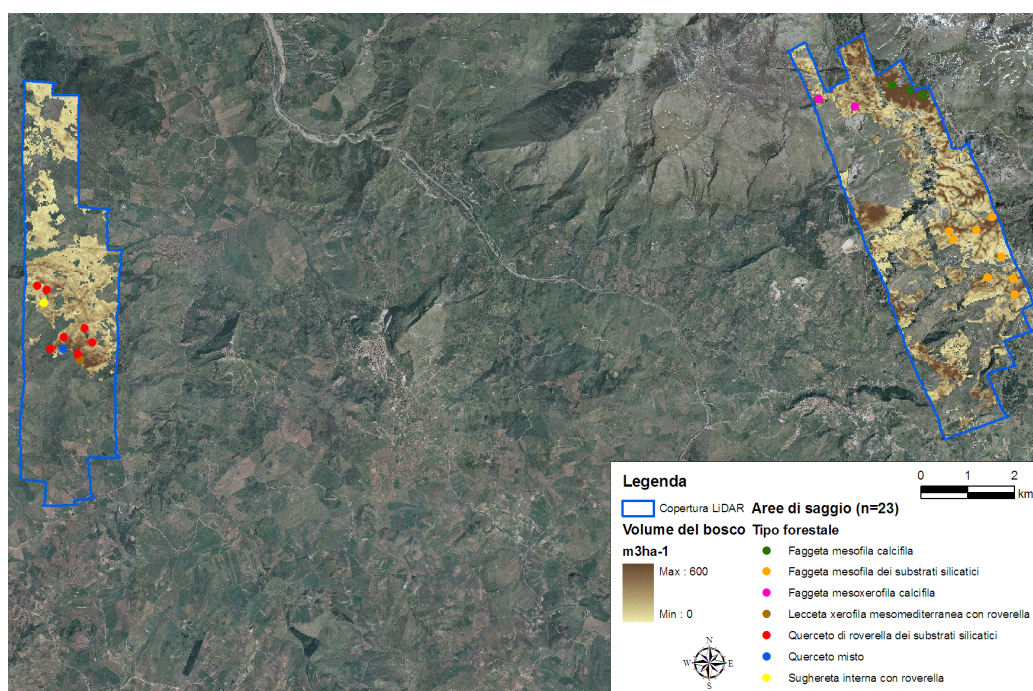


Figura 28. Area di studio n. 1: esempio di mappa del volume legnoso del bosco derivata LiDAR.

5. Discussione

5.1 Mappatura dei modelli di combustibile Prometheus attraverso dati LiDAR a bassa densità di punti

I risultati prodotti nel corso di questa sperimentazione, condotta in contesti applicativi diversificati sotto il profilo fisionomico, di carico, continuità (orizzontale e verticale) e compattezza degli strati di combustibile erbaceo, arbustivo, arboreo, aiutano a mettere in luce capacità e limiti di dati LiDAR a bassa densità di punti nel classificare e cartografare i modelli di combustibile Prometheus. Nel valutare le prestazioni del classificatore si ritiene opportuno e utile inquadrare l'analisi dei risultati cercando di comprendere i seguenti aspetti:

- i) se esistono delle differenze significative tra le principali fisionomie di vegetazione rappresentate nel modello Prometheus (praterie, arbusteti e boschi) nella ripartizione percentuale tra ritorni suolo (ground) e al di sopra del suolo (non ground);
- ii) se le fisionomie vegetali rilevate nelle due aree di studio si presentano omogenee o eterogenee in termini di ripartizione percentuale dei ritorni al di sopra del suolo tra le classi di altezza adottate per la classificazione dei modelli Prometheus (vd. Tabella 7);
- iii) quali risoluzioni spaziali (20 m vs 50 m) e quali modalità di restituzione cartografica (raster vs vettoriale) producano risultati migliori in termini di overall accuracy nel cartografare i modelli di combustibile Prometheus.

Per rispondere al punto i) è stato calcolato la percentuale di ritorni suolo sul totale ritorni per classe inventariale della carta dei tipi forestali della Regione Sicilia (Figura 29) e per le classi della carta di uso del suolo redatta ad hoc dal GESAAF di Firenze (Figura 30). L'andamento percentuale di ritorni suolo mostra un decremento progressivo dei valori da formazioni aperte di tipo pascoli e seminativi a quelle chiuse di tipo. Tale dato mette in luce in generale una limitata capacità informativa del dato LiDAR a bassa densità di punti per la discriminazione di formazioni vegetali erbacee e arbustive aperte, in quanto gli echi di ritorno al di sopra del suolo utilizzati per l'implementazione del classificatore rappresentano una aliquota minoritaria del totale dei ritorni.

In particolare per l'area di studio 1 il numero di ritorni non-ground su cui si è basata la classificazione del modello LiDAR per i fuel types 1 e 2 è rispettivamente del 19% e del 38% rispetto al totale (figura 29), mentre per l'area di studio 2 l'aliquota di ritorni non-ground su cui è stato possibile testare il modello per il fuel type 1 è del 12%. Invece, per formazioni forestali chiuse, il classificatore riesce lavorare invece su una quantità di ritorni prossima al 75% rispetto al totale, quest'ultimo inteso come densità di ritorni, che mediamente si attesta su 1,5 echi m^{-2} per la Sicilia e 0,4 echi m^{-2} per Monte Morello.

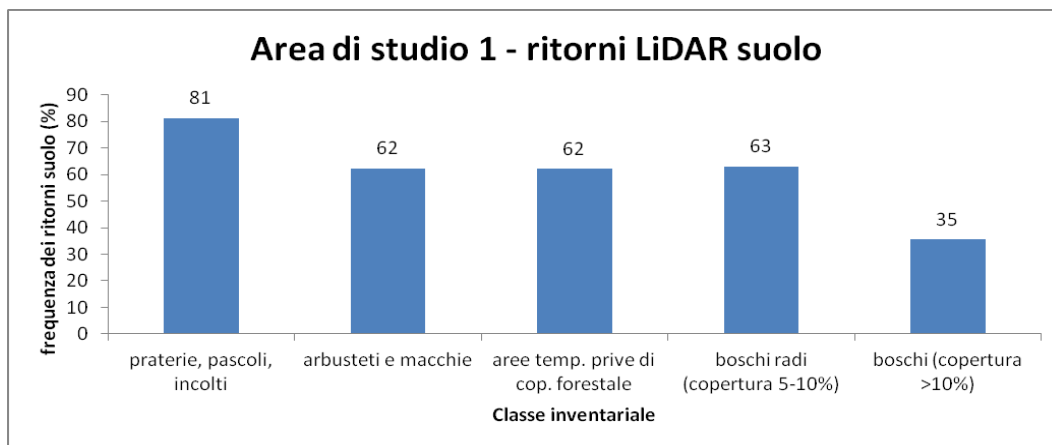


Figura 29. Frequenza relativa dei ritorni ground per classe inventariale della carta dei tipi forestale per l'area di studio 1 in Sicilia

Analizzando il numero di ritorni LiDAR al di sopra del suolo per intervalli di altezza e classe di vegetazione (vd. punto ii), ciascuna associata ad un fuel type Prometheus, si evidenzia che nelle due aree di studio la percentuale di ritorni relativa oltre i 4 metri di altezza (rispetto al totale dei ritorni non ground) varia tra il 59% e l'80% (Figure 31, 32).

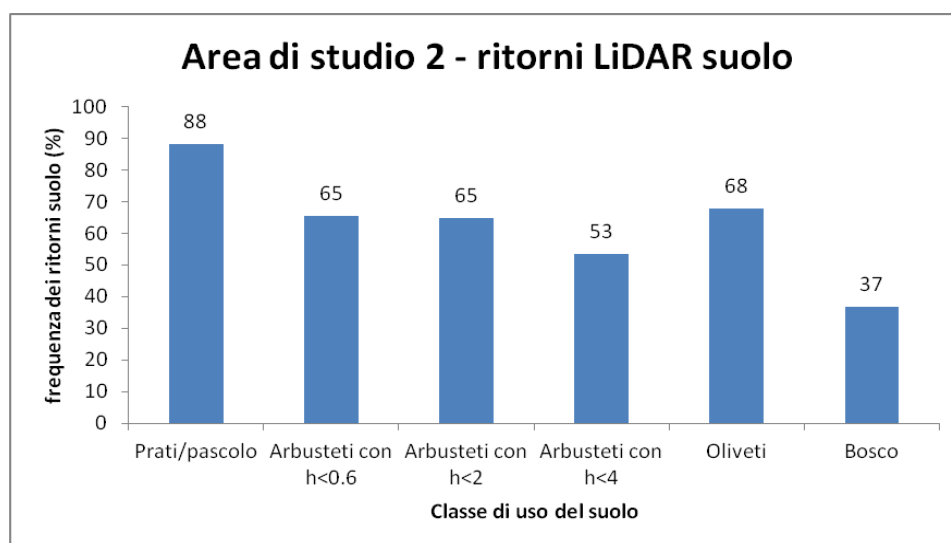


Figura 30. Frequenza relativa dei ritorni ground per classe di uso del suolo per l'area di studio 2 in Toscana.

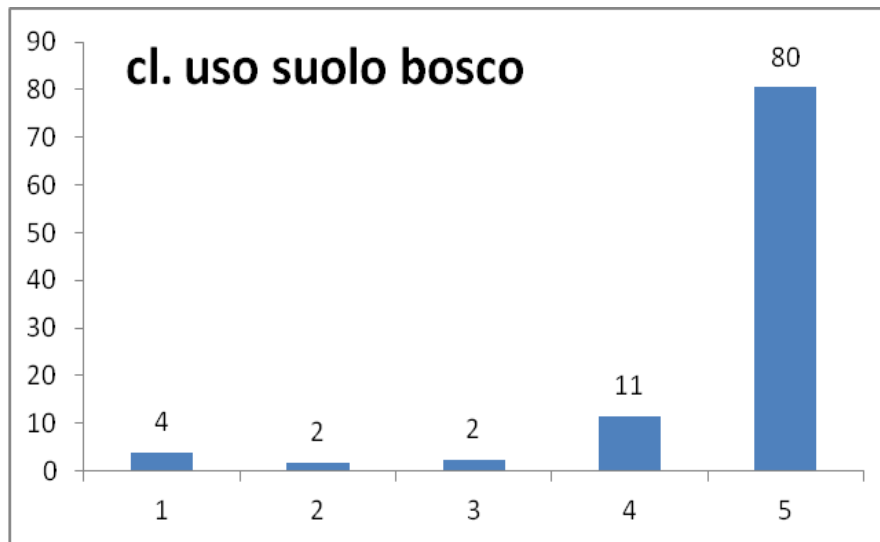


Figura 31. Area di studio n. 2: in ordinata il numero di ritorni percentuale per intervallo di altezza da terra (1=0-0,3m; 2=0,3-0,6m; 3=0,6-2m; 4=2-4m; 5=oltre 4m) all'interno della classe di uso del suolo bosco (carta di uso del suolo di Monte Morello).

Questo dato aiuta a interpretare i risultati del classificatore in termini di capacità di discriminazione della classe bosco (FT5-7) nelle due aree di studio (§ 4.1.3). In termini percentuali i ritorni non-ground utilizzabili dal modello sono simili (63-65%); nonostante la densità di punti sia più bassa nell'area 2 sono stati ottenuti valori più elevati di producers accuracy (> 90%,) rispetto all'area 1 (49-53%).

Tale differenza può essere spiegata analizzando la struttura del bosco nelle due aree di studio: in Sicilia (area 1) caratterizzata spesso da fisionomie di cedui di faggio a bassa fertilità stazionale e querceti con scarsa densità e valori di altezza media ridotti; in Toscana (area 2) caratterizzata invece in prevalenza da rimboschimenti di conifere con grado di copertura maggiore e densità e fertilità elevate. La maggiore eterogeneità fisionomica dei boschi nell'area di studio 1 spiega per un verso l'attribuzione del classificatore di una quota significativa della classe boschi (copertura >10%) ai FT4 e FT3. Questo dato è coerente con quanto riscontrato in fase di rilievo dove si è potuto osservare che soprattutto nella Riserva Naturale Orientata Bosco Favara e Granza sono diffusi boschi giovani misti di roverella e cerro con valori di diametro medio prossimo a 25 cm ma caratterizzate da basse densità in termini di area basimetrica ($13-14 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$) in cui la componente arbustiva molto diffusa è rappresentata da ginestreti e formazioni a *Calicotome* sp.

Più in generale, la scarsa penetrazione del segnale sotto i 4 m (figura 31 e 32) spiega l'incapacità del classificatore di discriminare i FT6 e FT7 ove presenti (vd. § 4.1.2).

Seguendo la medesima chiave di lettura possono essere interpretati i risultati di bassa accuratezza nella classificazione dei modelli di combustibile alla classe "praterie, pascoli, incolti" nell'area di studio 1 (figura 33) e ai "prati pascoli" nell'area di studio 2 (figura 34). Il dato che meglio spiega la

scarsa accuratezza di queste classi è la bassa percentuale di ritorni non-ground (12-19%) su cui è stato implementato il modello (figure 29-30).

Tuttavia, nel caso della Sicilia, la metà di questi ritorni ricade ad altezze comprese tra 0 e 0,3 metri da terra, mentre in Toscana la distribuzione dei ritorni è equiripartita tra le classi di altezza con una prevalenza per intervalli di altezze maggiori di 4 metri (figura 34).

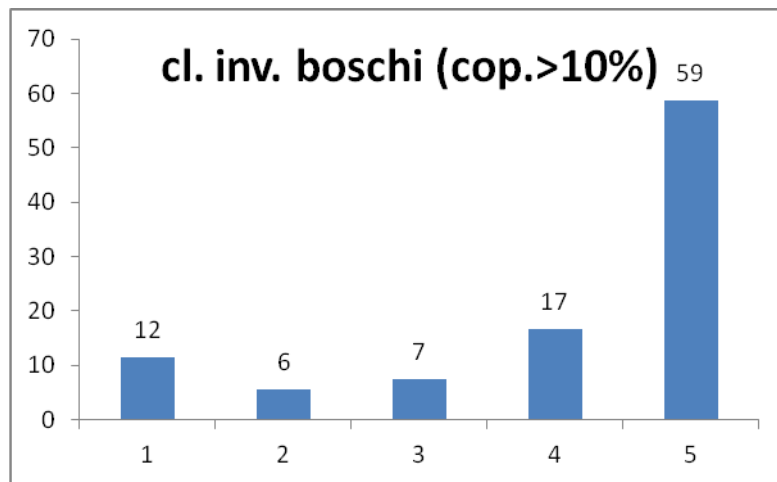


Figura 32. Area di studio n. 1: in ordinata il numero di ritorni percentuale per intervallo di altezza da terra (1=0-0,3m; 2=0,3-0,6m; 3=0,6-2m; 4=2-4m; 5=oltre 4m) all'interno della classe inventariale bosco (estratto della carta dei tipi forestali della Regione Sicilia).

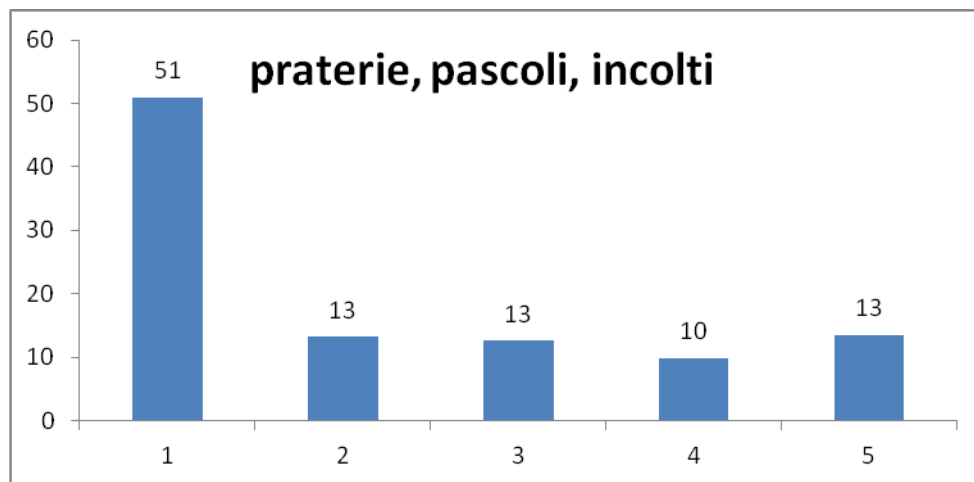


Figura 33. Area di studio n. 1: in ordinata il numero di ritorni percentuale per intervallo di altezza da terra (1=0-0,3m; 2=0,3-0,6m; 3=0,6-2m; 4=2-4m; 5=oltre 4m) all'interno della classe inventariale praterie pascoli, incolti (carta dei tipi forestali della Regione Sicilia).

Questo potrebbe spiegare il valore mediamente più alto di producers accuracy in Sicilia (38-58%) rispetto alla Toscana (15-43%). Da aggiungere che nel caso di Monte Morello, la superficie della carta dell'uso del suolo "prato/pascolo" è pari solo al 1% rispetto al totale. Si sottolinea che l'area

essendo talvolta caratterizzata da formazioni a prato/pascolo inferiori a 5.000 m² di superficie (non cartografate), presenta un ridotto campione in termini di numero e superficie di poligoni nonché di ritorni LiDAR disponibili per la classificazione Prometheus. Infine molto spesso le aree caratterizzate da tessuto erbaceo sono generalmente campi agricoli intervallati da siepi o boschetti che possono confondere la classificazione della stessa classe prato/pascolo. In tal senso può essere spiegato l'errore del classificatore a Monte Morello in cui la maggior parte dei ritorni ricadenti in tale classe di uso del suolo afferiscono ad intervalli di altezza maggiori di 4 metri. Quanto detto in precedenza in merito alle ridotte superfici per la classe prato/pascolo, è corroborato dal fatto che tendenzialmente l'accuratezza dell'estimatore è più elevata per la mappa raster di 20 metri di risoluzione spaziale, contrariamente alle mappe raster e vettoriali derivate da 50 metri di risoluzione. I risultati, evidenziano quindi che per l'area di studio 2 la risoluzione a grande scala è più efficiente nella mappatura dei combustibili rispetto a risoluzioni spaziali a piccola scala, perché con la risoluzione a 20 metri si evidenziano di più le uniformità su piccole superfici (e.g. prato/pascolo). Invece la classe arbusteti con $h < 0,6$ m associata al modello di combustibile FT2 non trova alcuna corrispondenza nella mappa dei combustibili, classificata nella maggior parte dei casi come fuel type 3 (sempre oltre il 66%, cfr. Tabelle 22-25). La predetta classe rappresenta soltanto lo 0,2% in termini di superficie (vd. Tabella 5 § 3.2.2), la percentuale di ritorni a disposizione per il modello di classificazione è soltanto del 35% (Figura 30), ed inoltre risulta molto bassa la percentuale di ritorni ricadente nell'intervallo di altezza della stessa classe (13%, Figura 35). Al contrario il numero di ritorni relativo ricadente nell'intervallo di altezza associato al fuel type 3 è il più alto (27%). Quanto descritto giustifica i risultati delle matrici di confusione delle Tabelle 22-25.

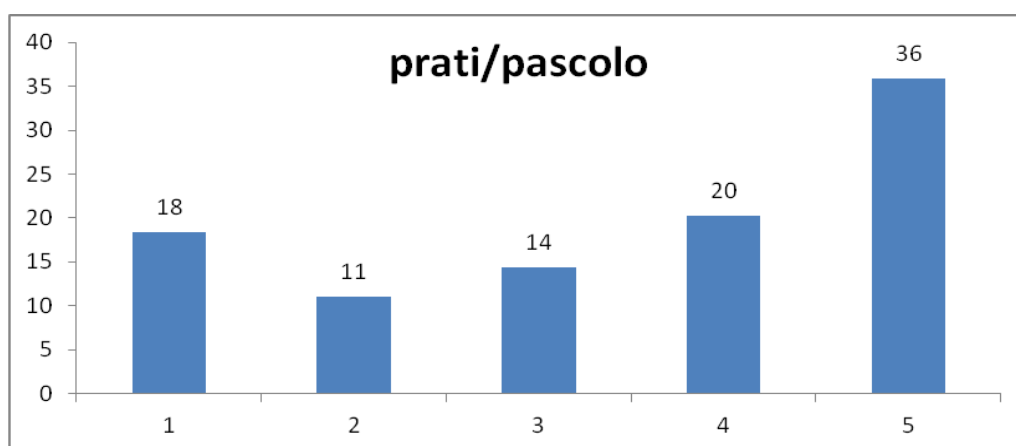


Figura 34. Area di studio n. 2: in ordinata il numero di ritorni percentuale per intervallo di altezza da terra (1=0-0,3m; 2=0,3-0,6m; 3=0,6-2m; 4=2-4m; 5=oltre 4m) all'interno della classe di uso del suolo prato/pascolo (carta di uso del suolo di Monte Morello).

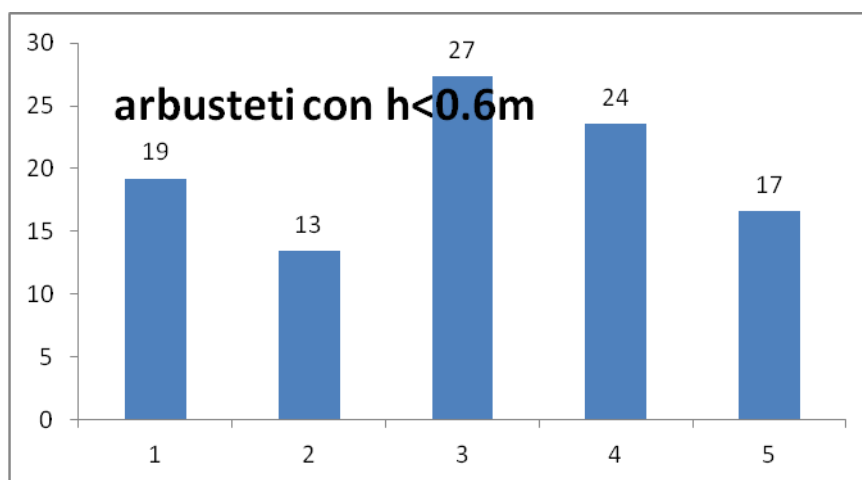


Figura 35. Area di studio n. 2: in ordinata il numero di ritorni percentuale per intervallo di altezza da terra (1=0-0,3m; 2=0,3-0,6m; 3=0,6-2m; 4=2-4m; 5=oltre 4m) all'interno della classe di uso del suolo arbusteti con $h < 0,6$ m (carta di uso del suolo di Monte Morello).

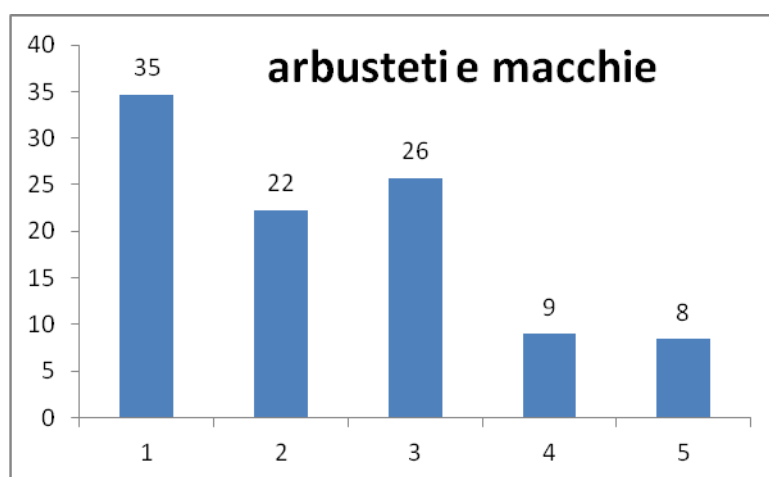


Figura 36. Area di studio n. 1: in ordinata il numero di ritorni percentuale per intervallo di altezza da terra (1=0-0,3m; 2=0,3-0,6m; 3=0,6-2m; 4=2-4m; 5=oltre 4m) all'interno della classe inventariale arbusteti e macchie (carta dei tipi forestali della Regione Sicilia).

Nel caso di classi di uso del suolo che sono riferibili a arbusteti assimilabili al FT3 (figure 35-38) la distribuzione percentuale dei ritorni per intervalli di altezza Prometheus è molto eterogenea. Una distribuzione percentuale così difforme evidenzia una grande varietà strutturale delle comunità vegetali di mantello sia in Sicilia (Area di studio 1) sia nell'area di studio 2 in Toscana. Considerato ciò, il classificatore ha ottenuto range di accuratezza incoraggianti (Sicilia il 70-85%, Toscana 47-59%) tenendo conto che il numero di ritorni non-ground è solo pari al 35-40%.

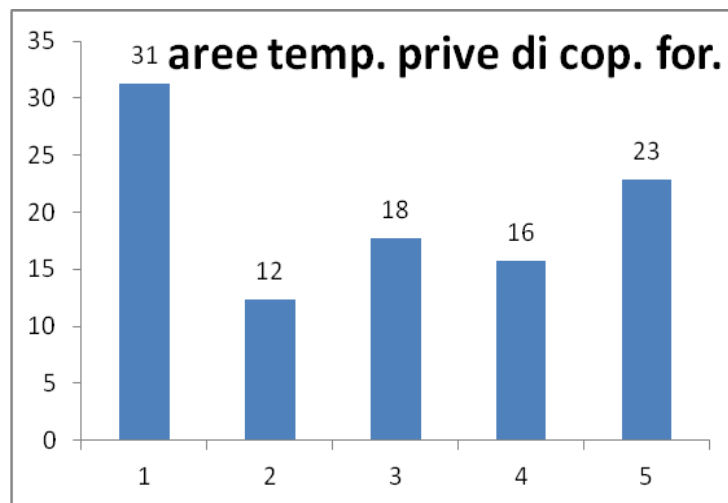


Figura 37. Area di studio 1: in ordinata il numero di ritorni percentuale (%) per intervallo di altezza da terra (1=0-0,3m; 2=0,3-0,6m; 3=0,6-2m; 4=2-4m; 5=oltre 4m) all'interno della classe inventariale “aree temporaneamente prive di copertura forestale” (estratto della carta dei tipi forestali della Regione Sicilia) associata al fuel type 3.

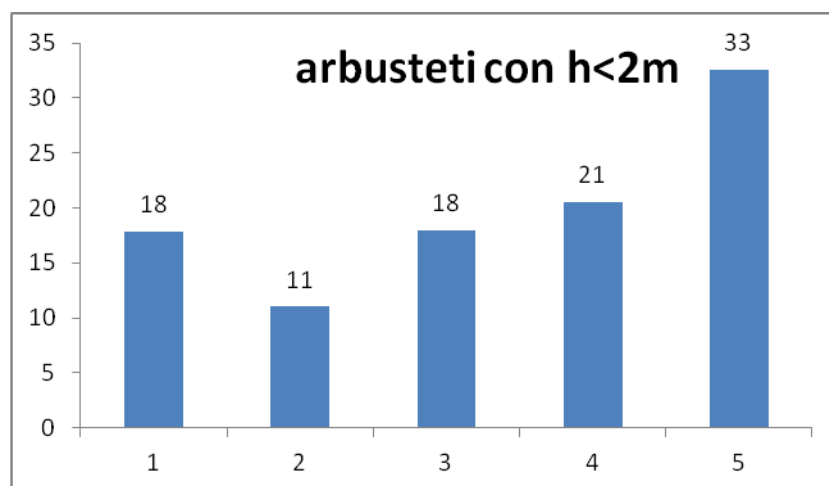


Figura 38. Area di studio n. 2: in ordinata il numero di ritorni percentuale per intervallo di altezza da terra (1=0-0,3m; 2=0,3-0,6m; 3=0,6-2m; 4=2-4m; 5=oltre 4m) all'interno della classe di uso del suolo “arbusteti con h<2 m” (carta di uso del suolo di Monte Morello) associata al fuel type 3.

Nel caso delle fisionomie attribuite al FT4 (Figure 37-39) i livelli di producers accuracy sensibilmente diverse tra le classi interessate (boschi radi, arbusteti <4m e oliveti) sono ben spiegate dalla eterogeneità nella distribuzione per classi di altezza dei ritorni al di sopra del suolo. Per l'area di studio 1 lo scarso grado di accuratezza (23-26%) per la classe inventariale “boschi radi (cop. 5-10%)” è attribuibile al fatto che la maggior parte dei ritorni (Figura 40) è localizzato ad altezze maggiori di 4 m (23%) e inferiori a 0,3 metri (31%). Tale distribuzione identifica strutture con caratteristiche simili a boschi di neoformazione.

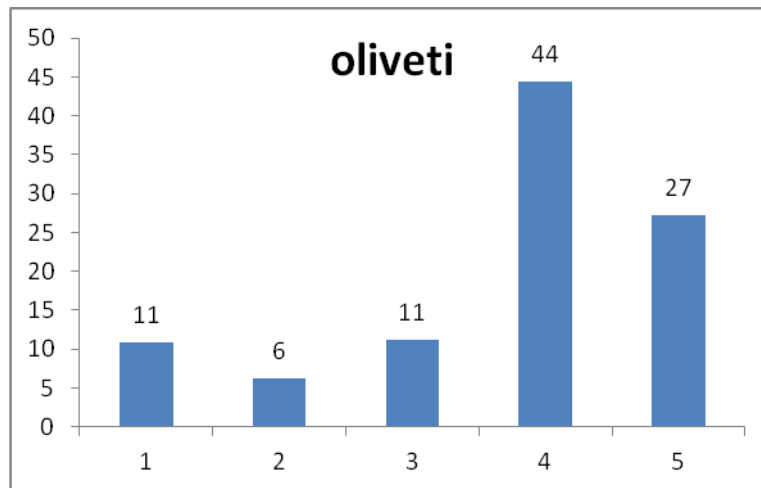


Figura 39. Area di studio n. 2: in ordinata il numero di ritorni percentuale (%) per intervallo di altezza da terra (1=0-0,3m; 2=0,3-0,6m; 3=0,6-2m; 4=2-4m; 5=oltre 4m) all'interno della classe di uso del suolo "oliveti" associata al fuel type 4.

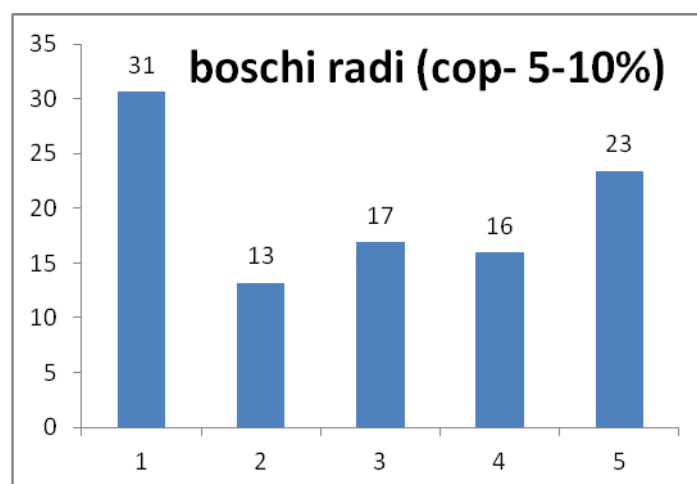


Figura 40. Area di studio n. 1: in ordinata il numero di ritorni percentuale (%) per intervallo di altezza da terra (1=0-0,3m; 2=0,3-0,6m; 3=0,6-2m; 4=2-4m; 5=oltre 4m) all'interno della classe inventariale "boschi radi (cop. 5-10%)" (estratto della carta dei tipi forestali della Regione Sicilia) associata al fuel type 4.

Nell'area di studio 2, la distribuzione dei ritorni della classe arbusteti con altezza <4m, registra ritorni frequenti sopra i 4 metri di altezza (figura 38). In questo caso gli arbusteti, classificati da ortofoto come fuel type 4, sono caratterizzati da strutture molto diversificate che spiegherebbero l'attribuzione del classificatore di una quota significativa di questa classe ai FT3 (43-58%) e FT5-7 (28-37%).

Molto chiara e di facile interpretazione è la situazione rappresentata in Figura 39, in cui per la classe "oliveti" si identifica una grande percentuale di ritorni che cade al suolo (68%), giustificata dal fatto che le coltivazioni di olivo hanno sesti di impianto regolari in cui la componente erbacea è molto rappresentata e quindi il dato LiDAR non riesce a colpire il tessuto erbaceo, in quanto nella maggior

parte dei casi gli echi ricadono sulla superficie del terreno. Pur avendo una ridotta percentuale di ritorni su cui sviluppare la classificazione Prometheus il modello ha raggiunto per gli oliveti, assimilati al fuel type 4, accuratezze significative (>70%, Tabelle 22-25).

Per quanto riguarda la valutazione della overall accuracy dei risultati conseguiti nella presente sperimentazione (vd. punto iii) possono essere tracciate alcune considerazioni generali.

Rispetto a lavori condotti sulla mappatura dei modelli di combustibile Prometheus in aree mediterranee attraverso l'impiego del LiDAR associato a dati ottici (Garcia et al., 2011) oppure mediante soltanto immagini ottiche ad elevata risoluzione (Arroyo et al., 2006), la presente sperimentazione raggiunge valori di accuratezza globale (overall accuracy) inferiori per l'area di studio 1 (55,7%, valore massimo) e superiori (90,5%, valore massimo) nell'area di studio 2 (Toscana). Da sottolineare che questi valori sono stati conseguiti utilizzando unicamente soltanto dati di tipo quantitativo ALS, al fine di testare le effettive capacità e i limiti di una classificazione basata su dati LiDAR a bassa densità di punti. Inoltre soltanto nel caso dei boschi il numero di ritorni disponibili su cui implementare il modello classificatore supera il 50%, per tutte le altre classi di uso del suolo il test è stato sviluppato lavorando soltanto su una parte dei dati a disposizione per proprietà intrinseche del dato LiDAR low density.

In entrambi i casi di studio i risultati migliori in termini di overall accuracy sono riconducibili alla mappa vettoriale dei modelli di combustibile derivata da pixels di 20 metri di risoluzione spaziale (56% in Sicilia e 90% in Toscana).

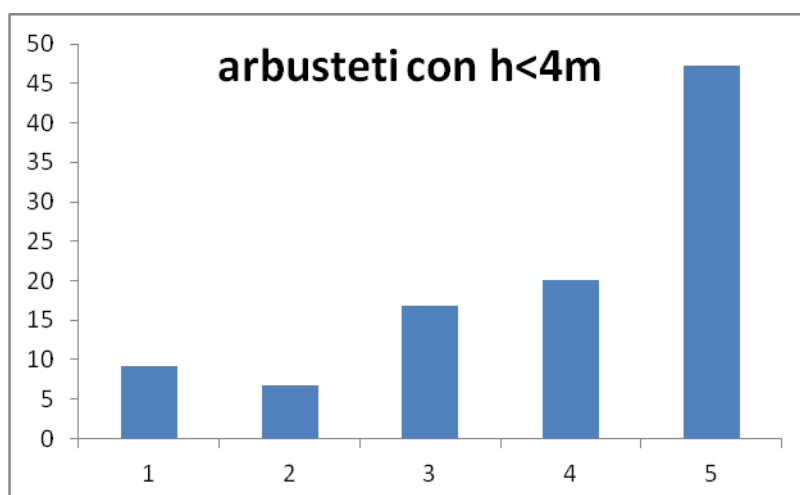


Figura 41. Area di studio n. 2: in ordinata il numero di ritorni percentuale per intervallo di altezza da terra (1=0-0,3m; 2=0,3-0,6m; 3=0,6-2m; 4=2-4m; 5=oltre 4m) all'interno della classe di uso del suolo arbusteti con h<4 metri (carta di uso del suolo di Monte Morello) associata al *fuel type* 4.

5.2 Obiettivo 2

L'aspetto comunque più utile, a livello applicativo, della messa a punto di modelli di stima sulla base di metriche ALS è l'estrapolazione spaziale degli attributi strutturali dei combustibili forestali: l'esito di questo processo è esemplificato nella Figura 8, che restituisce una rappresentazione di dettaglio della variabilità spaziale del carico di combustibile epigeo (t s.s. ha^{-1}) e delle soluzioni di continuità nella sua distribuzione orizzontale.

Dai risultati ottenuti per questo studio, il LiDAR appare una tecnologia con un'ottima capacità di derivare misure di altezza media della canopy, e per soprassuoli di conifera addirittura dei singoli alberi corroborata ampiamente anche in letteratura (Corona et al., 2008; Corona e Fattorini, 2008; Floris et al., 2009; Clementel et al., 2010; Hermosilla et al., 2013). Le altezze medie del popolamento forestale calcolate sulla base di misure a terra con strumenti digitali ad elevata precisione (Ipsometro Vertex) sono state derivate anche da LiDAR e in seguito confrontate. Sono state riscontrate elevate correlazioni per entrambe le aree test rappresentate da funzioni di regressione lineare. Nel caso dell'area di studio 2 si è raggiunta una correlazione pari a $R^2=0,91$, con valori relativamente più bassi che non scendono mai al di sotto di $R^2=0,74$ (Figura 25). Sulla base di questa verifica è stato possibile implementare il procedimento di elaborazione della nuvola di punti LiDAR su tutta l'area coperta da dati ALS e realizzare mappe di altezza relativamente alla classe bosco (Figura 7).

Importante ai fini di inventariazione e per studi applicativi è conoscere la provvigione ad ettaro di singole aree geografiche caratterizzate da copertura forestale. In tal senso i dati di altezza media del popolamento acquisiti da LiDAR sono stati confrontati con i dati di volume legnoso (m^3ha^{-1}) calcolati per ciascuna area di saggio rilevata in campo. Sulla base di indici di correlazione piuttosto elevati (Area di studio 1, max $R^2=0,7258$; Area di studio 2, max $R^2=0,7913$) è stato possibile implementare per la classe bosco il modello di derivazione LiDAR del volume, rappresentato da funzioni di regressione lineare (Figura 26). Pertanto con l'estrazione di altezze, indirettamente è stato possibile inferire il valore di volume legnoso per singolo pixel. Infine replicando lo stesso procedimento per la biomassa epigea è stato possibile realizzare mappe di biomassa forestale epigea dell'intera superficie boscata di cui si disponevano dati LiDAR, attraverso l'impiego di coefficienti espansione (BEF) e densità basale del legno (WBD) acquisiti dall'Inventario Nazionale delle Foreste e del Carbonio (Figura 8).

I risultati dimostrano che l'impiego del LiDAR a bassa densità di punti caratterizzato da basso grado di penetrazione sotto chioma (Kilian et al., 1996), nella stima di attributi strutturali utilizzabili come variabili di input per strumenti matematici che modellizzano il comportamento del fuoco in foresta e/o per la pianificazione spaziale di interventi di riduzione del carico di combustibile, è

senza dubbio efficiente ed accurato, fornendo anche la possibilità di acquisire dati aggiornati delle variabili forestali studiate. Inoltre l'affidabilità del LiDAR, la sua capacità di indagare grandi superfici forestali (anche a scala regionale) e la possibilità di derivare strati informativi aggiornati sull'altezza, il volume e la biomassa epigea di soprassuoli necessari all'implementazione di programmi che simulano il comportamento del fuoco è di fondamentale importanza, ai fini della predizione del rischio di incendio in foresta. Infine il LiDAR low density può certamente essere anche a supporto di programmi per la realizzazione di inventari forestali a scala regionale e nazionale.

6. Considerazioni conclusive

In questi ultimi anni è aumentato l'interesse circa le potenzialità di applicazione del LiDAR non soltanto nella ricerca ma soprattutto per applicazioni pratiche e professionali. Tale strumento ha numerosi vantaggi, primo fra tutti la possibilità di acquisire informazioni dimensionali quantitative della superficie terrestre e dei complessi vegetazionali compresi in ecosistemi naturali. In campo forestale il sistema si è in breve tempo evoluto in riferimento al trattamento e al processamento dei dati. In generale, è stato dimostrato da molti lavori (Corona et al., 2008; Floris et al., 2009; Gregoire et al., 2011; Stål et al., 2011, Garcia et al., 2011) che l'impiego del LiDAR fornisce al monitoraggio delle risorse forestali un valido contributo. A tal proposito data la mutabilità delle condizioni all'interno del bosco, in cui gli equilibri ecologici e strutturali sono in costante cambiamento e divenire (Ciancio e Nocentini, 1996), risulta fondamentale un aggiornamento delle condizioni del bosco. Quindi l'utilizzo del LiDAR, è destinato a crescere anche in campo professionale con lo sviluppo di nuove tecniche di elaborazione dati e pertanto una costante riduzione dei costi di ripresa, ad oggi ancora piuttosto elevati. Un tema di interesse per lo sviluppo scientifico del LiDAR è sicuramente quello della mappatura del combustibile in foresta, tradizionalmente basata su onerosi rilievi campionari. Ad oggi pochi sono gli studi su questo aspetto (Seielstad e Queen, 2003; Mutlu et al., 2008; Koetz et al., 2008; Garcia et al., 2011) e la maggior parte di essi utilizzano il LiDAR associato ad immagini ottiche ad alta risoluzione per aumentarne l'accuratezza nella classificazione dei modelli di combustibile oppure mediante metodi di elaborazione di dati LiDAR non parametrici (Chirici et al., 2013). Tale ricerca ha voluto soprattutto verificare la possibilità e l'accuratezza del LiDAR, a bassa densità di ritorni (o echi) per metro quadrato nella mappatura dei modelli di combustibile secondo la classificazione Prometheus in ambiente mediterraneo. Il tipo di dato LiDAR che è stato utilizzato nel presente lavoro è definito low cost da Clementel et al. (2010) e risulta essere anche quello maggiormente disponibile per il territorio nazionale (Bovio et al., 2014).

I risultati ottenuti hanno dimostrato che il tipo di dato LiDAR impiegato è capace di derivare variabili strutturali di popolamento (e.g. altezza media, grado di copertura, volume e biomassa epigea) su larga scala. Inoltre, alla luce dei limiti tecnici del dato LiDAR low cost e spesso del ridotto campione di ritorni non-ground processato dal modello, i risultati ottenuti nella mappatura dei modelli di combustibile Prometheus appaiono interessanti sia per l'area di studio siciliana sia per quella localizzata a Monte Morello (Toscana).

Nella prospettiva di future sperimentazioni, può essere interessante cercare di analizzare meglio le prestazioni del classificatore su una superficie di indagine più ampia per le classi Prometheus non forestali (prato/pascolo, arbusteti) implementando una fase di pre-classificazione e stratificazione del dato, attraverso l'ausilio di immagini ottiche e tecniche di segmentazione della nuvola di punti LiDAR per classi di altezza. Questa operazione aiuterebbe a superare alcuni limiti dell'approccio metodologico pixel-based qui impiegato, aiutando a ridurre i livelli di eterogeneità delle fisionomie di vegetazione, ad esempio discriminando nelle aree prative e pascolive siepi e boschetti che caratterizzano la realtà agricola e che creano confusione nella classificazione del modello LiDAR Prometheus.

Per quanto attiene invece la mappatura dei modelli di combustibile FT6 e FT7 dai risultati conseguiti, non appare possibile utilizzare dati LiDAR low density per una delineazione diretta. Pertanto in contesti ambientali in cui tali modelli di combustibile sono presenti si conferma la necessità di dati LiDAR ad elevato numero di ritorni per m^{-2} in grado di penetrare sotto la copertura forestale (Hermosilla et al., 2013).

In definitiva emerge che l'impiego del LiDAR di tipo discrete return nella mappatura dei modelli di combustibile in ambiente mediterraneo è in grado di fornire indicazioni importanti sul carico di combustibile epigeo e su alcuni parametri strutturali del bosco. Tali informazioni disponibili attraverso l'utilizzo di questo tipo di dato LiDAR sono indispensabili per ricerche preliminari nell'ambito di programmi antincendio anche a scala regionale e nazionale. Invece nel caso in cui si volesse utilizzare al meglio il dato LiDAR low cost nella mappatura dei modelli di combustibile è dunque consigliabile integrarlo con il telerilevamento passivo. Mentre se si volesse caratterizzare la struttura verticale del bosco in dettaglio è necessario utilizzare invece un dato LiDAR multiritorno avente più di 2 ritorni per m^{-2} .

7. Ringraziamenti

Alla realizzazione della mia Tesi di Dottorato in “Ecologia Forestale” hanno partecipato donando un contributo indispensabile alcuni Professori e Ricercatori.

Un ringraziamento speciale va al mio Tutor Professor Piermaria Corona, che mi ha permesso e insegnato a crescere scientificamente durante i tre anni del Dottorato di Ricerca.

Ringrazio di cuore la Dott.ssa Anna Barbati che mi ha fornito un valido e impagabile supporto scientifico durante tutte le fasi della ricerca.

Ringrazio tutto il gruppo di lavoro del Prof. Portoghesi, in particolare il Dott. Alessandro Alivernini e il Dott. Diego Giuliani per la loro disponibilità e Professionalità gentilmente concessa durante il mio percorso Accademico.

Ringrazio inoltre DiBT dell’Università degli Studi del Molise, in particolare il Professor Gherardo Chirici, che mi ha gentilmente fornito indispensabili strumenti permettendomi di sviluppare la mia ricerca.

Infine un ringraziamento particolare va al Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali (GESAAF) dell’Università di Firenze, in particolare al Dott. Davide Travaglini e alla Dott.ssa Francesca Bottalico per aver fornito esperienza scientifica e parte dei dati della mia tesi di Dottorato.

8. Bibliografia

- Ahokas E., Kaartinen H., Hyypä J., 2003. A quality assessment of airborne laser scanner data. In: Proceeding of the IAPRS, Dresden, Deutschland, Vol. XXXIV-3/W13.
- Albini F.A., 1976. Estimating wildfire behavior and effects. Gen. Tech. Rep. INT-GTR-30. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Ogden, USA.
- Anderson H.E., 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. Gen. Tech. Rep. INT-122. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Ogden, USA.
- Arroyo L.A., Healey S.P., Choen W.B., Cocero D., 2006. Using object-oriented classification and high resolution imagery to map fuel type in a Mediterranean region. *Journal of Geophysical Research* 111: 10 pp.
- Arroyo L.A., Pascual C., Manzanera J.A., 2008. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 256: 1239-1252.
- Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetti M., Maturani A., 2004. Incendi e complessità ecosistemica. Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio. Società Botanica Italiana. Palombi Editori, Roma.
- Bovio G., Corona P., Leone V. (a cura di), 2014. Gestione selvicolturale dei combustibili forestali per la prevenzione degli incendi boschivi. Compagnia delle Foreste, Arezzo, pp. 208.
- Breiman L., 2001. Random Forest. *Machine Learning*, 45 (1): 5-32.
- Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J., 1984. Classification and regression tree. Chapman and Hall/Wadsworth, Inc., New York.
- Burgan, R., Rothermel, R.C., 1984. BEHAVE: Fire Behaviour Prediction and Fuel Modeling System-FUEL Subsystem. Rep. No. GTR INT-167. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Ogden, USA.
- Chirici G., Corona P., 2006. Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali. Aracne Editrice, Roma.
- Chirici G., Corona P., Marchetti M., Mastronardi A., Maselli F., Bottai L., Travaglini D., 2012. K-NN FOREST: a software for the non-parametric prediction and mapping of environmental variables by the k-Nearest Neighbors algorithm. *European Journal of Remote Sensing*, 45: 433-442.

- Chirici G., Scotti R., Montagni A., Barbati A., Cartisano R., Lopez G., Marchetti M., McRoberts R.E., Olsson H., Corona P., 2013. Stochastic gradient boosting classification trees for forest fuel types mapping through airborne laser scanning and IRS LISS-III imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 25: 87-97.
- Chuvieco E., Riano D., van Wagtendonk J., Morsdorf F., 2003. Fuel loads and fuel types. In: Chuvieco E. (Ed.), *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping. The Role of the Remote Sensing Data*. World scientific Publishing Co.Ltd., Singapore, pp: 1-32.
- Chuvieco E., Cocero D., Riaño D., Martín P., Martínez-Vega J., Riva J.d.l., Pérez F., 2004. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing and Environment*, 92: 322-331.
- Ciancio O., Nocentini S., 1996. La selvicoltura sistemica: conseguenze scientifiche e tecniche. *L'Italia Forestale e Montana*, 51: 112-130.
- Clementel F., Colle G., Farruggia C., Floris A., Scrinzi G., Torresan C., 2010. Stima operativa di parametri dendrometrici forestali con riprese LiDAR invernali a bassa risoluzione. Atti XIV Conferenza Nazionale ASITA, Brescia 9-12 novembre 2010.
- Corona P., 2007. Metodi di inventariazione delle masse e degli incrementi legnosi in assestamento forestale. Aracne Editrice, Roma.
- Corona P., 2010. Integration of forest inventory and mapping to support forest management. *iForest, Biogeoscience and Forestry*, 3: 59-64.
- Corona P., Fattorini L., 2008. Area-based LiDAR assisted estimation of forest standing volume. *Canadian Journal of Forest Research*, 38: 2911-2916.
- Corona P., Lamonaca A., Chirici G., 2008. Remote sensing support for post fire forest management. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 1: 6-12.
- Federici S., De Laurentis R., Vitullo M., 2007. La contabilità del carbonio contenuto nelle foreste italiane. *Silvae*, 9: 91-104.
- Finney M.A., 1998. *FARSITE: Fire Area Simulator—model development and evaluation*. Research Paper RMRS-RP-4 Revised. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Ogden, USA
- Finney M.A., 2004. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: *Fuels management—how to measure success: conference proceedings*. 2006 March 28-30; Portland, Oregon. Proceedings RMRS-P-41. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Fort Collins, USA, pp. 213-220.

- Finney M.A., 2006. An overview of FlamMap Fire modeling capabilities. In: Proceedings RMRS-P Fuels management –how to measure success, Portland: 213-220.
- Floris A., Clementel F., Farruggia C., Scrinzi G., 2009. Il LiDAR nella stratificazione tematica dei soprassuoli forestali: applicazioni in Trentino. Atti 13° Conferenza Nazionale ASITA, Bari, 1-4 dicembre 2009.
- Friedman J.H., 2002. Stochastic gradient boosting. *Computational Statistics and Data Analysis*, 38: 367-378.
- Garcia M., Riano D., Chuvieco E., Salas J., Danson F.M., 2011. Multispectral and LiDAR data fusion for fuel map type mapping using Support Vector Machine and decision rules. *Remote Sensing of Environmen*, 115: 1369-1379.
- Giakoumakis N.M., Gitas I.Z., San-Miguel J., 2002. Object-oriented classification modelling for fuel type mapping in the Mediterranean, Using Landsat TM and Ikonos imagery-preliminary results. In: Viegas D.X. (Ed.), *Forest Fire Research and Wildland Fire Safety*, Rotterdam: 44-56.
- Gitas I.Z., Mitri G.H., Kazakis G., Ghosn D., Xanthopolous G., 2006. Fuel type mapping in Annopolis, Crete by employing QuickBird imagery and object-based classification. *Forest Ecology and Management*, 234: 228.
- Gregoire T.G., Stål G., Næsset E., Gobakken T., Nelson R., Holm S., 2011. Model-assisted estimation of biomass in a LiDAR sample survey in Hedmark County, Norway. *Canadian Journal of Forest Research*, 41: 83-95.
- Heinsch F.A., Andrews P.L., 2010. BehavePlus fire modeling system, version 5.0: Design and Features. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-249. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Fort Collins, USA.
- Hermosilla T., Ruiz L.A., Kazakova A.N., Coops N.C., Moskal L.M., 2013. Estimation of forest structure and canopy fuel parameters from small-footprint full-waveform LiDAR data. *International Journal of Wildland Fire*, 23 (2): 224-233.
- Hofmann A., Cibella R., Bertani R., Miozzo M., Fantoni I., Luppi S. (a cura di), 2011. Strumenti conoscitivi per la gestione delle risorse forestali della Sicilia. *Sistema Informativo Forestale. Assessorato Territorio e Ambiente. Regione Siciliana*, pp. 208.

- Hyypä J., Kelle O., Lehtikainen M., Inkinen M., 2001. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-d tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing of Environment*, 39: 969-975.
- Keane R.E., Burgan R.E., van Wageningen J., 2001. Mapping wildland fuel for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 301-319.
- Kilian J., Haala N., Englich M., 1996. Capture and evaluation of airborne laser scanning data. *International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing*. Volume 31, Part B3, pp: 383-388.
- Koetz B., Morsdorf F., van der Linden S., Curt T., Allgöwer B., 2008. Multi-source land cover classification for forestfire management based on imaging spectrometry and LiDAR data. *Forest Ecology and Management*, 1256: 263-271.
- Lawson B.D., Stocks B.J., Alexander M.E., van Wagner C.E., 1985. A system for predicting fire behavior in Canadian forest. In: *Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology*, Society of American Foresters, Detroit.
- Magnussen S., Eggermont P., La Riccia V.N., 1999. Recovering tree heights from airborne laser scanner data. *Forest Science*, 45:407-422.
- McArthur A.G., 1966. Weather and grassland fire behaviour. Australian Forestry and Timber Bureau Leaflet, no. 100.
- McArthur A.G., 1967. Fire behavior in eucalypt forests. Australian Forestry and Timber Bureau Leaflet, no. 107.
- Montaghi A., Corona P., Dalponte M., Gianelle D., Chirici G., Olsson H., 2013. Airborne Laser Scanning of Forest Resource: an overview of research in Italy as commentary case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23: 288-300.
- Mutlu M., Popescu S., Stripling C., Spencer T., 2008. Mapping surface fuel models using LiDAR and multispectral data fusion for fire behaviour. *Remote Sensing of Environment*, 112: 274-285.
- Pausas J.G., Vallejo V.R., 1999. The role of fire in European Mediterranean ecosystems. In: Chuvieco E. (Ed), *Remote Sensing of Large Wildfires*. Springer, Berlin, pp. 3-16.

- Riaño D., Chuvieco E., Salas F.J., Palacios-Orueta A., Bastarrica A., 2002. Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 32: 1301-1315.
- Riaño D., Chuvieco E., Condes S., Gonzales-Matesand J., Ustin S.L., 2004. Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 92: 345-352.
- Seielstad C., Queen L., 2003. Using airborne laser altimetry to determine fuel models for estimating fire behaviour. *Journal of Forestry*, 101: 10-15.
- Ståhl G., Holm S., Gregoire T., Gobakken T., Næsset E., Nelson R., 2011. Model-based inference for biomass estimation in a LiDAR sample survey in Hedmark County, Norway. *Canadian Journal of Forest Research*, 41: 96-107.
- Tabacchi G., Scrinzi G., Tosi V., Floris A., Paletto A., Di Cosmo L., Colle G., 2006. *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio – Procedure di posizionamento e di rilievo degli attributi di terza fase con istruzioni per l’impiego degli applicativi NAV£ e RAS£*. MiPAF, Ispettorato Generale del Corpo Forestale dello Stato, CRA-ISAFA, Trento.
- 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.