

ANDREA BARZAGLI (*)^(°) - SUSANNA NOCENTINI (*)^(**)
BARBARA DEL PERUGIA (*) - DAVIDE TRAVAGLINI (*)
FRANCESCA GIANNETTI (*) - CATHERINE ZOLLI ^(**) - SIMONE CARRARA ^(***)
MATTEO NERLI ^(***) - PATRIZIA ROSSI (*) - ANNA BARBATI ^(****)
BARBARA FERRARI ^(****) - ANTONIO TOMAO ^(****) - BRUNO LASSERRE ^(*****)
GIOVANNI SANTOPUOLI ^(*****) - MARCO MARCHETTI ^(*****)
MARCO BALSÌ ^(*****) - GHERARDO CHIRICI ^(*)^(**)

L'UTILIZZO DEL TELERILEVAMENTO A SUPPORTO
DELLA GESTIONE FORESTALE SOSTENIBILE
PRIMI RISULTATI DEL PROGETTO FRESH LIFE
DEMONSTRATING REMOTE SENSING INTEGRATION
IN SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT
(LIFE14_ENV/IT/000414)

(*) Università degli Studi di Firenze.
(**) Accademia Italiana di Scienze Forestali.
(***) Demetra.
(****) Università degli Studi della Toscana.

(*****) Università degli Studi del Molise.
(*****) Oben.
(°) Autore corrispondente; andrea.barzagli@unifi.it

Il cambiamento climatico è una sfida senza precedenti, con importanti ripercussioni sullo stato degli ecosistemi forestali e le molteplici utilità dirette e indirette da essi prodotte. È una situazione complessa ed estremamente dinamica che rende ancora più incerte le previsioni sulle conseguenze che avrà sulle foreste. In un contesto ambientale mutevole, rivelano la loro utilità tutti quegli strumenti che permettono ai gestori forestali di monitorare, piuttosto che modellizzare, gli effetti della gestione forestale sullo stato delle foreste. La Gestione Forestale Sostenibile ha come principio di base il mantenimento e miglioramento della salute degli ecosistemi forestali fornendo, a lungo termine, opportunità ambientali, economiche, sociali e culturali per le generazioni attuali e future. Il progetto FRESH LIFE si propone di dimostrare la possibile integrazione dei dati raccolti tramite metodi di inventariazione a terra con informazioni telerilevate per la stima spaziale a scala aziendale di alcuni indicatori di gestione forestale sostenibile, definiti a livello internazionale nell'ambito del processo Forest Europe. In questo contributo vengono presentate le attività del progetto FRESH LIFE volte alla creazione di un sistema di supporto alle decisioni (Forest Information System) in tre siti dimostrativi posti nell'Italia centrale. Dati inventariali e dati telerilevati ad altissima risoluzione acquisiti da drone sono stati utilizzati per la spazializzazione degli indicatori di gestione forestale sostenibile allo scopo di produrre mappe utili ai gestori nei loro processi decisionali.

Parole chiave: telerilevamento; FRESH LIFE; gestione forestale sostenibile; droni.
Key words: remote sensing; FRESH LIFE; sustainable forest management; UAV.

Citazione: Barzagli A., Nocentini S., Del Perugia B., Travaglini D., Giannetti F., Zolli C., Carrara S., Nerli M., Rossi P., Barbati A., Ferrari B., Tomao A., Lasserre B., Santopuoli G., Marchetti M., Balsi M., Chirici G., 2018 - L'utilizzo del telerilevamento a supporto della gestione forestale sostenibile. Primi risultati del progetto FRESH LIFE - Demonstrating Remote Sensing Integration in sustainable forest management (LIFE14_ENV/IT/000414). L'Italia Forestale e Montana, 73 (4/5): 169-194.
<https://doi.org/10.4129/ifm.2018.4.5.03>

1. INTRODUZIONE

Il cambiamento climatico è un problema senza precedenti, con importanti conseguenze sulla funzionalità ecologica degli ecosistemi forestali e sulle utilità ecosistemiche che essi forniscono. È una situazione complessa che aumenta la difficoltà di effettuare previsioni sulle dinamiche forestali e rende necessario un approccio quanto più possibile adattativo nelle scelte gestionali future (Marchetti *et al.*, 2012; Maes *et al.*, 2012).

In tale contesto, si rendono sempre più necessari strumenti di rilievo e di analisi che permettano ai gestori forestali di comprendere le condizioni attuali delle risorse forestali, anche in termini di capacità produttiva di utilità ecosistemiche. Al fine di monitorare l'efficacia della gestione forestale attraverso indicatori consolidati di gestione forestale sostenibile (GFS), i sistemi informativi geografici e il telerilevamento costituiscono strumenti utili in tale scenario per supportare le scelte di gestione forestale (Corona, 2010).

La GFS è universalmente accettata come l'obiettivo principale della politica e delle pratiche forestali. Al fine di monitorare, valutare e segnalare i progressi verso una GFS nella regione europea sono stati adottati sei criteri chiave misurati da una serie di indicatori quantitativi (34) e qualitativi (11) pan-europei per la gestione delle foreste (MCPFE, 2015). Questo sistema ha lo scopo di facilitare la valutazione dei risultati e i progressi nell'avanzamento della GFS a livello regionale, nazionale o sovranazionale. Molti degli indicatori hanno però la necessità di essere specificati per tipologia forestale. Per questo motivo in uno dei cicli di valutazione di Forest Europe (Forest Europe, UNECE e FAO, 2011), la segnalazione di 14 categorie di tipi forestali europei (European Forest Types - EFT) è stata testata sperimentalmente per una selezione di indicatori di tipo forestale. Ne è risultato che la stratificazione mediante EFT migliora sostanzialmente la qualità delle informazioni riportate, fornendo un contesto ecologicamente valido per inquadrare indicatori di GFS e interpretarne le tendenze temporali (Barbati *et al.*, 2014).

Il progetto FRESH LIFE, Demonstrating Remote Sensing Integration in sustainable forest management (LIFE14_ENV/IT/000414), si occupa di dimostrare, attraverso tre aree pilota situate in centro Italia, metodologie innovative per l'integrazione dei dati raccolti tramite metodi di inventariazione a terra con informazioni telerilevate per la stima spaziale a scala aziendale di alcuni indicatori di GFS. Tramite l'utilizzo di droni equipaggiati con sensori LiDAR e ottici sono stati acquisiti dati ad alta risoluzione al fine di verificare l'operatività di metodi automatici e semiautomatici di mappatura di variabili forestali utili a caratterizzare la fisionomia e le condizioni dei popolamenti forestali alla scala operativa tipica della gestione forestale. Le variabili indagate includono la classificazione dei soprassuoli in tipi forestali secondo il sistema di nomenclatura proposto per gli European Forest Types (Barbati *et al.*, 2014) e la stima di altri indicatori della GFS (ad es. superficie forestale, composizione specifica, struttura, stato fitosanitario, naturalità, provvigione legnosa, incrementi e quantità

di legno morto in foresta). Queste informazioni, unite a quelle già disponibili nelle aree di studio del progetto, sono state impiegate per costruire un sistema informativo forestale messo al servizio di enti, gestori locali, tecnici e liberi professionisti che operano nel settore forestale per aiutarli a perseguire gli obiettivi della GFS. Attraverso l'analisi delle attività del progetto, il presente articolo ha lo scopo di esporre gli obiettivi, i metodi impiegati e i risultati ottenuti dal progetto FRESH LIFE, sia dal punto di vista scientifico che della disseminazione delle metodologie sperimentate.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Le aree dimostrative

Il progetto FRESH LIFE si è svolto in tre aree dimostrative ubicate in tre regioni: Toscana, Lazio e Molise (Figura 1), caratterizzate da ambienti forestali diversi, al fine di verificare l'applicabilità e replicabilità della metodologia sperimentata in una ampia gamma di condizioni ambientali.

Per la Toscana, in collaborazione con l'Unione dei Comuni Valdarno e Valdisieve, si è scelto di operare all'interno del complesso demaniale di Rincine, realtà nota per una gestione attenta che ha portato alla sua inclusione all'interno della Rete Internazionale delle Foreste Modello (<http://www.imfn.net/>). L'area, estesa 275 ha, è caratterizzata da querceti misti, boschi di castagno, faggete e rimboschimenti di conifere, ideale per rappresentare la situazione tipo degli ecosistemi forestali dell'Appennino centrale.

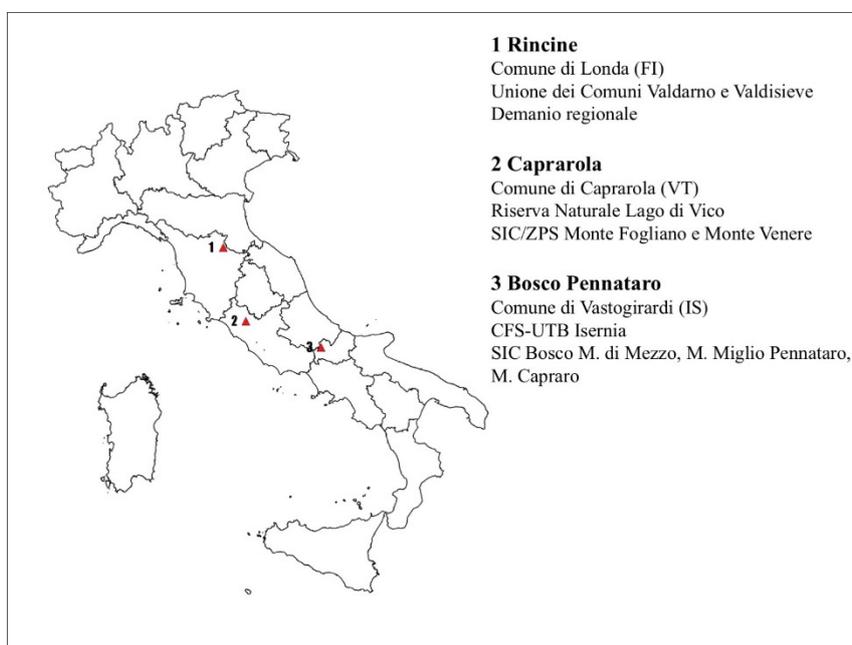


Figura 1 - Distribuzione delle aree dimostrative del progetto.

In collaborazione con la Regione Molise, è stata selezionata l'area di Bosco Pennataro che copre una superficie di 277 ha. L'area è caratterizzata da boschi misti a dominanza di cerro e faggio sui quali l'Università degli Studi del Molise conduce ricerche finalizzate allo studio dei boschi vetusti e al monitoraggio della biodiversità. Recentemente l'area è stata riconosciuta come *core area* della riserva Man and Biosphere “Collemeluccio-Montedimezzo Alto Molise”.

Nel Lazio è stata scelta un'area inserita nel territorio del Comune di Caprarola, nel versante sud dei Monti Cimini, a est del lago di Vico. L'area, ampia 240 ha, è ubicata all'interno di un mosaico di habitat ecologicamente diversi, dominati da boschi mesofili a prevalenza di faggio e cerro, con castagni, aceri e altre latifoglie. Il Comune di Caprarola vanta una prolungata tradizione di pianificazione forestale e, dal 1982, la maggior parte del territorio forestale comunale è incluso nella Riserva Naturale Regionale del Lago di Vico.

2.2 *Acquisizione dati inventariali*

In ciascuna area sono stati effettuati rilievi a terra su 50 plot inventariali di forma quadrata con lato di 23 m (superficie del plot = 529 m²), utilizzando una soglia minima di cavallettamento di 2,5 cm a petto d'uomo (1,30 m). La posizione spaziale dei plot inventariali (coordinate x,y del centro del plot) è stata acquisita con ricevitori GNSS a precisione sub-metrica.

Particolare cura è stata posta nella scelta del campione inventariale su base probabilistica, in modo da garantire la rappresentatività del campione e la valenza statistica degli stimatori degli indicatori di GFS. A tal fine ci si è avvalsi della collaborazione del Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA) e dell'Università degli Studi di Siena (UNISI) per la messa a punto della procedura di selezione del campione inventariale. La procedura utilizzata si basa sul sistema di campionamento denominato *one-per-stratum stratified sampling* (Brus *et al.*, 1999; Barabesi *et al.*, 2012; Fattorini *et al.*, 2015). In sintesi, tale procedura consiste in:

- ripartizione dell'area di studio in unità spaziali omogenee (ai fini del progetto sono state utilizzate celle quadrate di 23 m di lato, così da avere una superficie dell'area di saggio pari a 530 m², assimilabile a quella dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio);
- ripartizione dell'area di studio in cluster di superficie uniforme e in numero uguale al numero di plot inventariali da rilevare a terra (ai fini del progetto si è considerata una dimensione del campione inventariale pari a 50 plot);
- selezione casuale di una unità spaziale in ciascun cluster.

In Figura 2 è riportata la distribuzione dei plot inventariali selezionati in ciascuna area di studio applicando il sistema di campionamento *one-per-stratum stratified sampling*. Infine, per omogeneizzare la raccolta dei dati nel campione inventariale secondo procedure uniformi tra le aree di studio è stato predisposto un apposito protocollo di rilievo nel quale sono descritte in dettaglio le fasi del rilievo a terra, le variabili da rilevare, i metodi di rilievo e elaborazione dati.

All'interno di ciascun plot sono stati rilevati i seguenti parametri:

- posizione, specie, diametro, altezza, estensione della chioma, stato di salute e presenza di microhabitat di ciascuna delle piante vive;
- posizione, diametro, altezza e stato di decomposizione degli alberi morti in piedi;
- posizione, diametro, origine e stato di decomposizione delle ceppaie;
- posizione, orientamento, lunghezza, stato di decomposizione del legno morto a terra.

Come si evince dall'elenco, oltre ai classici dati dendrometrici, sono stati rilevati anche numerosi dati qualitativi, come ad esempio la presenza e la tipologia di microhabitat, che possono essere impiegati nel monitoraggio e nella stima di indici di biodiversità (Santopuoli *et al.*, 2018a, 2019; Spina *et al.*, 2019) anch'essi fondamentali nel perseguire gli obiettivi della GFS.

Per agevolare la fase di rilievo, soprattutto per quanto riguarda il posizionamento dei singoli elementi, si è ricorsi all'utilizzo del Field-Map, strumento che permette la registrazione automatica delle variabili rilevate, fornendo come output un file excel ed uno shapefile che riducono notevolmente i tempi di trasferimento dei dati grezzi all'interno del database finale. Inoltre, l'utilizzo del prisma, per rilevare la posizione dei singoli elementi, garantisce una riduzione dell'errore in questa fase permettendo di ottenere stime più precise nelle successive correlazioni con i dati telerilevati (Santopuoli *et al.*, 2018b).

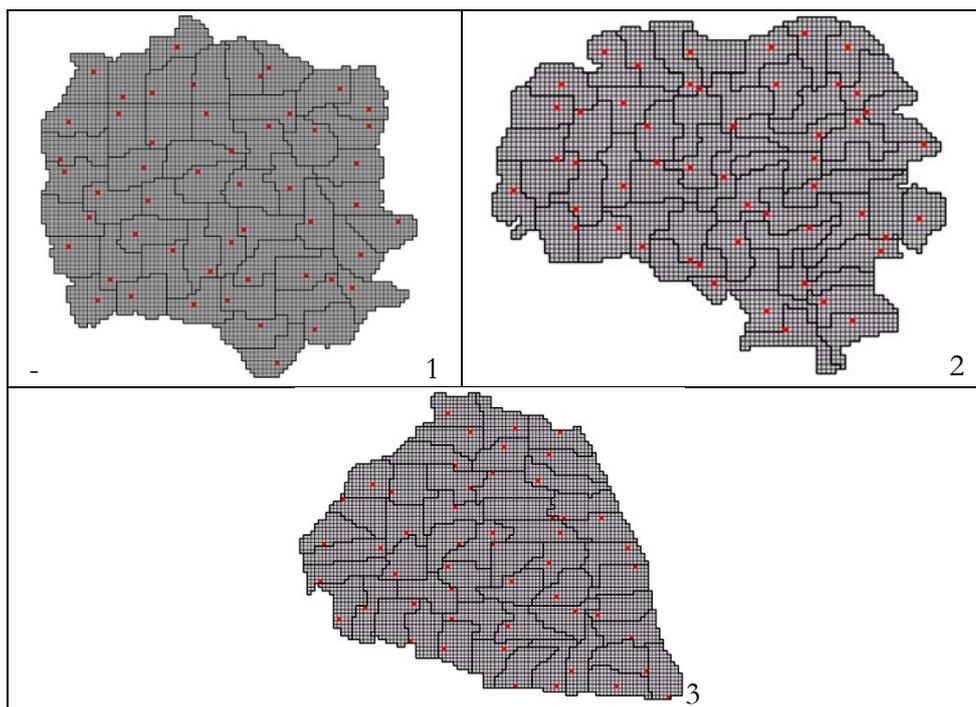


Figura 2 - Distribuzione dei plot inventariali nelle tre aree dimostrative: 1 - Rincine; 2 - Caprarola; 3 - Bosco Pennataro.

I dati così raccolti sono stati organizzati in un database unico per tutte le tre aree di studio che, grazie alle informazioni relative al posizionamento dei singoli elementi rilevati, ha permesso la creazione di uno strato informativo geografico all'interno di un software GIS (Figura 3).

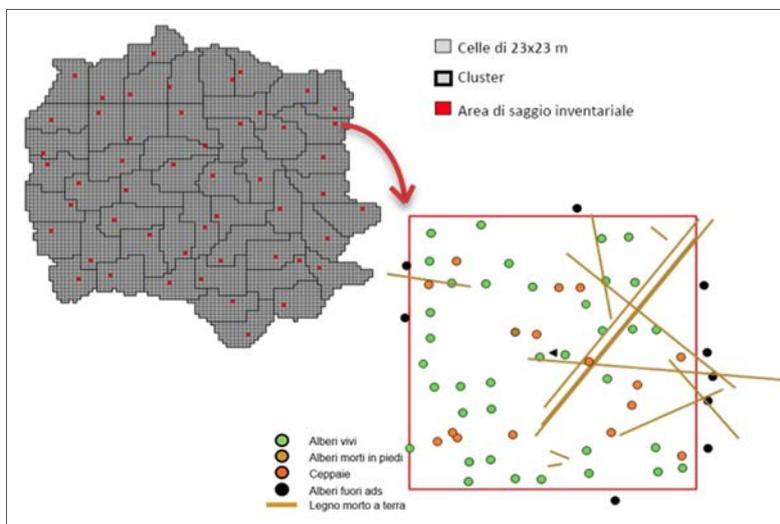


Figura 3 - Visualizzazione dei dati inventariali riportati all'interno del software GIS.

2.3 Acquisizione dati telerilevati

2.3.1 Sistemi a Pilotaggio Remoto

Alla base dell'impiego dei Sistemi A Pilotaggio Remoto (SAPR), spesso denominati “droni”, vi è una sempre più solida letteratura che ne ha dimostrato l'efficienza in molti campi della ricerca forestale (a es., Tang e Shao, 2015), specialmente se affiancati all'uso di immagini satellitari. L'utilizzo dei SAPR in campo forestale è particolarmente vantaggioso per i seguenti motivi:

- la risoluzione spaziale delle immagini ottiche derivate dai SAPR è particolarmente elevata (nell'ordine di pochi centimetri), come conseguenza della bassa quota di volo; questa caratteristica migliora di molto l'interpretazione delle immagini, ad esempio per l'identificazione delle singole specie forestali e per la perimetrazione di aree danneggiate o soggette a utilizzazioni;
- la risoluzione temporale: i bassi costi di manutenzione e di volo dei SAPR permettono di acquisire immagini della stessa area molto più frequentemente rispetto a quanto sia possibile con aeromobili con pilota o da satellite. È inoltre possibile effettuare nuove acquisizioni in tempi brevi nel caso di eventi specifici;
- la possibilità di effettuare acquisizioni multisensore per la disponibilità di SAPR dotati di strumenti ottici multispettrali o LiDAR.

Nell'ambito del progetto FRESH LIFE sono stati utilizzati due SAPR: un otocottero e un SAPR ad ala fissa (Figura 4).



Figura 4 - Ottocottero con sensore LiDAR (sinistra) e drone ad ala fissa eBee (destra).

L'ottocottero, sviluppato da Oben, ha un diametro di 1,8 m, un peso complessivo al decollo di circa 15 kg, un'autonomia di volo di circa 20 minuti e opera in genere ad una quota di 20 m sopra le chiome. In una giornata di lavoro, con diversi voli effettuati in sequenza con più batterie, l'ottocottero consente di acquisire dati su una superficie complessiva compresa tra 20 e 50 ha in funzione dell'accessibilità e dell'orografia dell'area di interesse. Questo SAPR è stato equipaggiato con un LiDAR Yellowscan ultraleggero che nelle condizioni operative tipiche del rilievo forestale, permette di ottenere nuvole di punti con una densità di circa 50 punti per metro quadro.

Il SAPR ad ala fissa, acquistato dall'Università degli Studi di Firenze per le finalità del progetto, è il modello eBee Ag della ditta senseFly equipaggiato con una fotocamera con sensori RGB (spettro del visibile) e NIR (infrarosso vicino) in grado di acquisire immagini multispettrali ad altissima definizione. eBee Ag ha un'apertura alare di 98 cm ed un peso complessivo intorno ai 700 g; ha una autonomia di volo di 45 minuti e la possibilità di coprire, con un singolo volo, circa 60 ha di superficie. eBee Ag nasce specificatamente per applicazioni fotogrammetriche in grado di poter creare, a partire dalle foto aeree, modelli 3D digitali e ortofoto ad altissima risoluzione.

Entrambi i SAPR possono svolgere le proprie missioni in modo automatico, tramite apposito software. I piloti supervisionano le operazioni e possono intervenire direttamente in caso di necessità.

A causa delle modifiche introdotte da ENAC (Ente nazionale per l'aviazione civile) nella regolamentazione nazionale riguardante il volo dei droni, che ha limitato l'uso di queste piattaforme, in particolare vietando qualsiasi operazione fuori contatto visivo e obbligando a mantenere una breve distanza (500 m) tra il drone e la posizione del pilota, è stato possibile volare con l'ottocottero per il 75% della superficie totale delle aree dimostrative; nel rimanente 25% non è stato possibile acquisire i dati poiché alcune zone presentavano caratteristiche, come valli relativamente profonde e lontananza dalle radure adatte per il pilotaggio, che hanno reso impossibile il sorvolo entro i limiti imposti dalla normativa. Per completare l'acquisizione dei dati LiDAR si è quindi reso necessario l'utilizzo di un elicottero leggero con caratteristiche

tecniche (ad esempio, profilo di volo, altitudine di volo sopra la copertura arborea, velocità di volo) che hanno consentito di simulare il volo di un drone (Balsi *et al.*, 2018b).

2.3.2 Dati multispettrali

Per quanto riguarda i dati multispettrali, contestualmente al volo con eBee, sono stati posizionati in ogni area dimostrativa 12 punti di controllo a terra (Ground Control Point) usando bersagli di 50x50 cm; le coordinate x, y di ciascun GCP sono state registrate con sistema GNSS a precisione sub-metrica.

Il software eMotion 2 versione 2.4.2 è stato utilizzato per simulare, pianificare e monitorare i voli per l'acquisizione di una superficie complessiva di 1298 ettari con un totale di 23h40' di volo.

Tabella 1 - Dati relativi ai voli di acquisizione con drone eBee e acquisizione con GNSS dei punti di controllo (GCP = Ground Control Point).

Dato acquisito	Area	Numero di voli	Tempo totale volo e acquisizione dei GCP	Immagini
GCP	Caprarola	-	10h	-
RGB	Caprarola	5	3h20'	483
NIR	Caprarola	5	4h20'	564
GCP	Bosco Pennataro	-	11h	-
RGB	Bosco Pennataro	6	3h50'	608
NIR	Bosco Pennataro	7	4h35'	689
GCP	Rincine	-	8h	-
RGB	Rincine	4	3h25'	506
NIR	Rincine	5	4h10'	682
Totale		27	52h40'	3532

Le immagini acquisite sono state elaborate utilizzando Agisoft PhotoScan (Agisoft LLC, 2017) per creare una nuvola di punti 3D. Agisoft PhotoScan combina gli algoritmi SfM (Structure from Motion) e fotogrammetrici per la ricostruzione 3D da immagini adeguatamente sovrapposte. Questo software offre un workflow di elaborazione di facile comprensione che combina algoritmi di visione artificiale SfM e stereo-matching per le fasi di allineamento dell'immagine e ricostruzione stereo multi-vista. L'allineamento dell'immagine consiste nella ricostruzione sparsa della geometria 3D rilevando e abbinando i punti omologhi in immagini sovrapposte usando le tecniche SfM. In questa fase i GCP sono stati utilizzati per migliorare le stime della posizione e dell'orientamento della camera, consentendo una ricostruzione più accurata del modello (Giannetti *et al.*, 2017, 2018a). Le loro coordinate sono state importate e posizionate utilizzando un approccio guidato. Dopo queste prime fasi una nuvola di punti densa e un Digital Surface Model (DSM) sono stati calcolati con Agisoft Photoscan. Il DSM è stato utilizzato per effettuare la ortocorrezione delle immagini acquisite dall'eBee.

I dati telerilevati prodotti da queste elaborazioni per ciascuna area dimostrativa sono: 2 nuvole di punti dense (NIR e RGB) con una media di 20-40 punti/m², 2 modelli digitali della superficie (DSM) con 50 cm di risoluzione e due ortofoto (RGB e NIR) con una risoluzione di 10 cm (Figura 5).

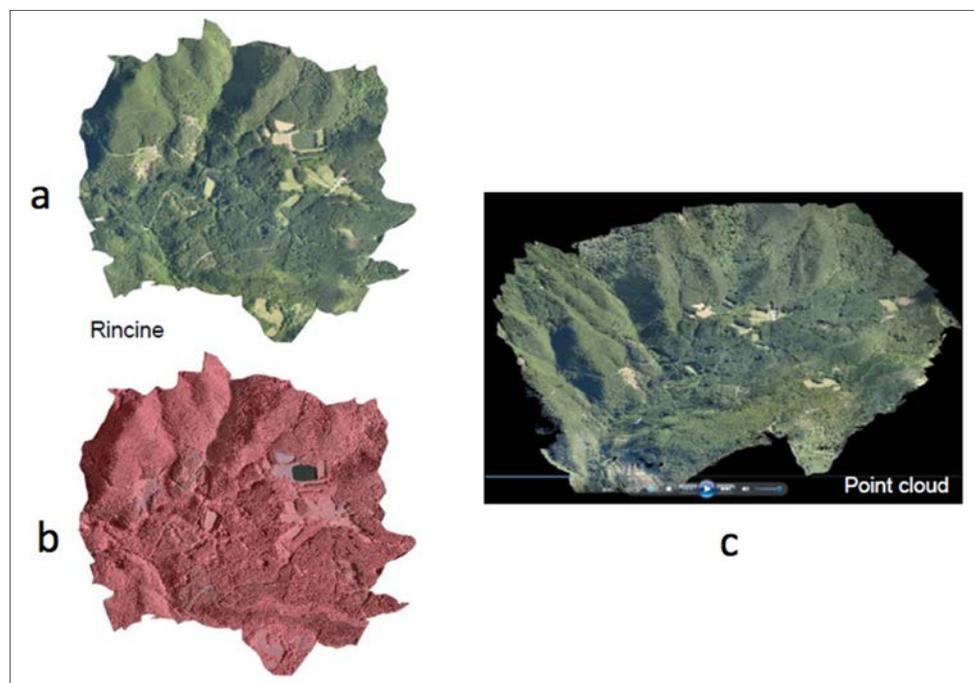


Figura 5 - Esempi di prodotti ottenuti dall'elaborazione dei dati eBee relativi all'area dimostrativa di Rincine: a - ortofoto RGB; b - ortofoto NIR; c - modello 3D della nuvola di punti.

2.3.3 Dati LIDAR

Nelle tabelle 2 e 3 un riassunto dei voli realizzati sulle aree dimostrative con l'ottocottero e l'elicottero leggero.

La pre-elaborazione dei dati LiDAR è stata eseguita utilizzando i software Cloud Compare e Terrascan con la produzione, per ciascuna area dimostrativa, dei seguenti prodotti (Figura 6):

- nuvola di punti densa (con una media di 70-120 punti/m²);
- modello digitale del terreno (DTM) con una risoluzione spaziale di 50 cm;
- DSM con una risoluzione spaziale di 25-50 cm;
- Canopy Height Model (CHM) con una risoluzione spaziale di 50 cm (Balsi *et al.*, 2016).

Al fine di validare i dati acquisiti sono stati eseguiti dei confronti con dati ALS già disponibili per l'area dimostrativa di Rincine. Queste procedure hanno riguardato, ad esempio, il confronto qualitativo dei profili LiDAR, il confronto qualitativo con ortofoto, l'estrazione di geometrie e l'analisi della rugosità ottenendo come risultato la conferma della qualità del dato e la validazione delle metodologie di acquisizione testate (Balsi *et al.*, 2017, 2018a).

Tabella 2 - Dati LiDAR acquisiti con ottocottero.

Area	Quota di volo (m)	Tempo totale di acquisizione	Numero di voli	Numero di strisciate	Superficie volata con ottocottero (ha)	Superficie volata con ottocottero e elicottero leggero (ha)
Bosco Pennataro	70	4h40'	24	97	195	259
Rincine	70	4h00'	20	88	178	236
Caprarola	70	5h00'	30	60	140	241

Tabella 3 - Dati LiDAR acquisiti con elicottero leggero (per ragioni tecniche legate alle traiettorie di volo alcune aree sono state acquisite da entrambi i vettori).

Area	Quota di volo (m)	Tempo totale di acquisizione	Numero di voli	Numero di strisciate	Superficie volata (ha)
Bosco Pennataro	70	6h00'	5	22	94
Rincine	70	5h00'	4	20	82
Caprarola	70	10h00'	7	41	120

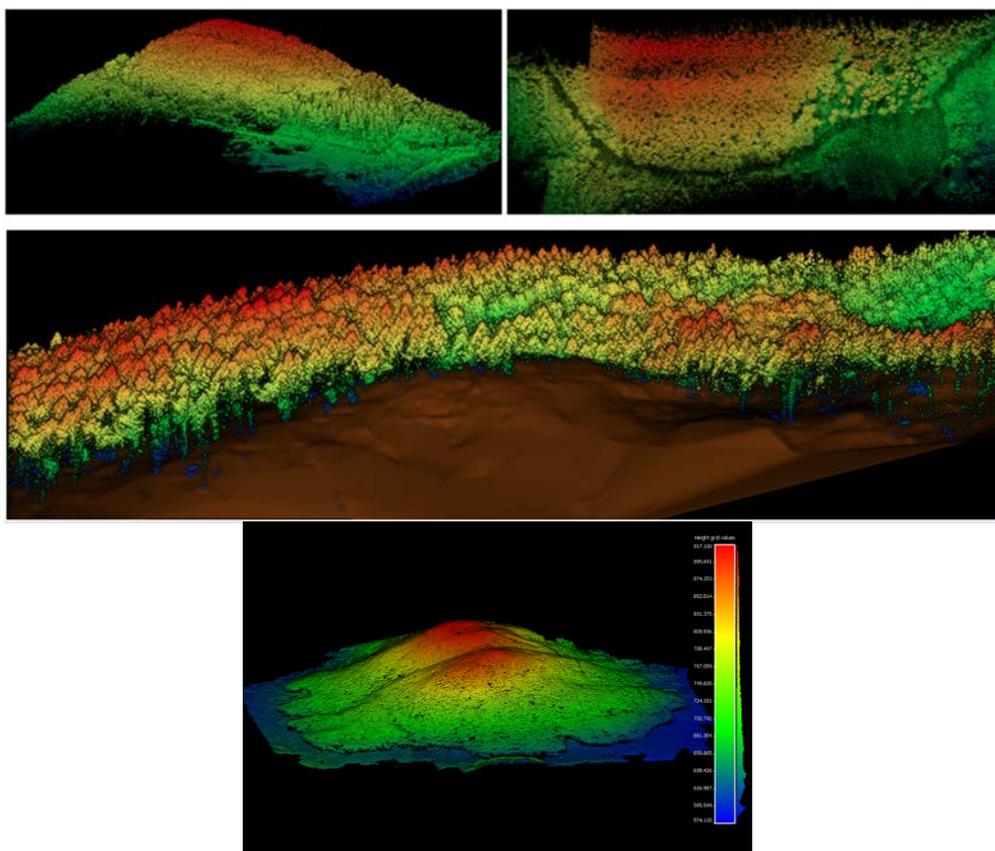


Figura 6 - Elaborazioni dei dati LiDAR acquisiti nell'area dimostrativa di Rincine (sopra) e Caprarola (sotto).

2.4 Elaborazione degli indicatori di gestione forestale sostenibile

2.4.1 Classificazione dei tipi forestali

La prima fase di elaborazione dei dati acquisiti nel progetto FRESH LIFE ha riguardato la classificazione delle aree dimostrative secondo le categorie di tipi forestali europei. La classificazione è stata effettuata mediante l'interpretazione visiva delle ortofoto a colori ad altissima risoluzione (risoluzione a terra 10 cm/pixel) acquisite dal drone eBee. I dati inventariali raccolti a terra su cinquanta unità di campionamento in ciascuna area dimostrativa sono stati utilizzati per valutare l'accuratezza tematica delle mappe ottenute dalla fotointerpretazione.

Gli EFT corrispondono a comunità forestali ecologicamente distinte e omogenee sotto il profilo della composizione specifica della copertura forestale (EEA, 2006; Barbati *et al.*, 2014). Le mappe degli EFT per le aree dimostrative del progetto sono state derivate per fotointerpretazione, una tecnica di classificazione qualitativa ampiamente applicata in ambito forestale per la tipizzazione della copertura forestale. Il criterio fondamentale in questa fase è la variabilità dei toni nella risposta spettrale nella banda del verde, ma l'alta risoluzione delle ortofoto RGB utilizzate ha permesso l'utilizzo di ulteriori parametri diagnostici come dimensione, forma e struttura delle chiome dei singoli alberi, permettendo l'identificazione a livello di genere o specie delle principali specie forestali presenti sul piano dominante delle chiome. Al fine di armonizzare le procedure di interpretazione nelle tre aree dimostrative, è stata definita una metodologia comune basata sui seguenti criteri:

- unità minima di mappatura di 0,5 ha (secondo la definizione di foresta FAO-FRA (2005): superficie > 0,5 ha, altezza degli alberi > 5 m, copertura delle chiome > 10%);
- scala di fotointerpretazione di 1:1500;
- creazione di una legenda dei tipi forestali presenti nelle aree dimostrative sulla base di informazioni pregresse (Tabella 4).

Tabella 4 - Legenda utilizzata per classificare le aree dimostrative nei tipi forestali europei (in parentesi specie presenti nelle aree di studio).

Codice	Tipo forestale
7.3	Apennine-Corsican mountainous beech forest (<i>Fagus sylvatica</i> L.)
8.1	Downy oak forest (<i>Quercus pubescens</i> Willd.)
8.2	Turkey oak, Hungarian oak and Sessile oak forest (<i>Quercus cerris</i> L.)
8.7	Chestnut forest (<i>Castanea sativa</i> Mill.)
8.8	Other thermophilous deciduous forests (<i>Fraxinus ornus</i> L., <i>Ostrya carpinifolia</i> Scop.)
10.2	Mediterranean and Anatolian Black pine forest (<i>Pinus nigra</i> spp.)
13.2	Italian alder forest (<i>Alnus glutinosa</i> L.)
14	Introduced tree species forest (<i>Pseudotsuga menziesii</i> Mirb. <i>Chamaecyparis lawsoniana</i> Murray)
99.2	Non forest

Oltre alla fotointerpretazione, per la classificazione degli EFT sono stati testati anche metodi di classificazione semiautomatici. L'Università della Tuscia ha testato una segmentazione multi-risoluzione con analisi *object-based* delle ortofoto tramite il software eCognition. In questo caso gli *object* (poligoni) sono stati ottenuti tramite un algoritmo di segmentazione i cui parametri (fattore di scala, omogeneità geometrica/spettrale, compattezza) sono stati settati mediante vari test per ciascuna delle aree dimostrative (Giuliarelli *et al.*, 2017).

La successiva classificazione dei poligoni ottenuti tramite segmentazione è stata eseguita tramite l'algoritmo Standard Nearest Neighbour (STD.N.N.). Il classificatore è stato "allenato" sulla base di un campione di poligoni (training sites) per ciascuna tipologia da classificare, selezionati manualmente mediante l'interpretazione visiva sullo schermo.

Parallelamente ulteriori test sono stati eseguiti dal laboratorio di geomatica forestale (GeoLab) dell'Università di Firenze: altri due classificatori, Random Forest (RF) e K-NN, sono stati testati per la classificazione delle specie forestali dominanti nell'area dimostrativa di Rincine (Del Perugia *et al.*, 2017; 2018).

2.4.2 Defogliazione

La definizione presente in Forest Europe per l'indicatore 2.3 riporta "defogliazione a carico di una o più specie principali delle foreste o di altre aree boscate in una qualsiasi delle classi di defogliazione *moderate, severe and dead*". Questo indicatore è un proxy dello stato di salute e vitalità degli alberi ed è generalmente monitorato tramite valutazione visiva dello stato delle chiome durante i rilievi in campo. Nel progetto FRESH LIFE, durante la campagna di rilievi a terra per l'acquisizione dei dati inventariali, sono stati raccolti dati sulla defogliazione basandosi su una scala percentuale dove il 100% indica alberi morti in piedi. Nella maggioranza dei casi il grado di defogliazione degli alberi vivi è risultato pari od inferiore al 10%, indicando un impatto limitato di questo fattore all'interno delle aree dimostrative. Al fine di verificare la possibilità di stimare questo indicatore dalle ortofoto RGB ad alta risoluzione acquisite dal drone eBee, sono stati selezionati i plot che avevano al loro interno alberi con defogliazione maggiore del 50% ma il risultato finale ha messo in evidenza come la defogliazione delle chiome sia chiaramente identificabile solo sugli alberi molto danneggiati corrispondenti all'intervallo di defogliazione più severo (70-99%). Dopo questi primi test si è quindi proceduto alla fotointerpretazione delle ortofoto RGB per l'identificazione delle sole classi di defogliazione più elevate (da 70 a 100%) con la produzione di una mappa dell'indicatore per ciascuna delle aree dimostrative.

2.4.3 Livello di danno

La definizione fornita da Forest Europe per l'indicatore 2.4 è "Foreste o altre aree boscate con danni classificati in base al principale agente di disturbo (abiotico, biotico, antropico)". Nelle aree dimostrative del progetto l'unico evento di disturbo su larga scala è risultato essere una tempesta di vento del marzo 2015 nella foresta di Rincine. La mappa dell'indicatore è stata realizzata per fotoin-

interpretazione dell'ortofoto RGB (risoluzione a terra 10 cm) con un'area minima mappabile di 0,25 ha. L'identificazione delle aree è stata facilitata dalle operazioni di sgombero delle aree danneggiate che, già concluse al momento del volo con il drone, hanno lasciato le superfici completamente prive di alberi.

2.4.4 Composizione specifica

Forest Europe definisce questo indicatore come “Area forestale o altre aree boscate classificate in base al numero di specie arboree presenti”, al fine di monitorare le aree boschive dominate da una sola specie forestale e quelle in cui invece sono presenti più specie arboree. Questo indicatore è generalmente quantificato durante i rilievi in campo con la determinazione della percentuale di area basimetrica riferita a ciascuna delle specie presenti nel plot. Vi sono infatti delle evidenti limitazioni nella mappatura di questo indicatore tramite interpretazione delle ortofoto: alcune specie arboree sono presenti soltanto negli strati inferiori della copertura vegetale senza mai raggiungere lo strato dominante. Al fine di garantire la mappatura dell'indicatore per le aree dimostrative si è deciso di basarsi sulla classificazione in tipi forestali, resa disponibile dalle precedenti fasi del progetto, utilizzando il numero dei tipi forestali come proxy del numero di specie.

2.4.5 Presenza di specie forestali non-native

La definizione dell'indicatore 4.4 riportata da Forest Europe è “Foreste o altre aree boscate dominate da specie forestali non-native”. Queste aree sono riunite nella classe 14 dei tipi forestali europei (EFT), la mappatura dell'indicatore ha quindi riguardato il semplice isolamento delle aree classificate all'interno di questo tipo forestale, che sono risultate presenti solo nell'area dimostrativa di Rincine.

2.4.6 Provvigione di massa legnosa e biomassa

Mentre per la stima degli altri indicatori di GFS il principale dato di partenza sono state le ortofoto RGB e NIR, per gli indicatori #1.3 e #1.4 sono stati utilizzati i dati LiDAR acquisiti tramite l'ottocottero, integrati con quelli dell'elicottero leggero al fine di garantire la totale copertura delle aree dimostrative. Combinando i dati telerilevati con i dati inventariali raccolti a terra sono state messe in correlazione le variabili misurate a terra (in questo caso volume totale degli alberi in piedi e biomassa totale) con le metriche estratte dai dati LiDAR per le celle corrispondenti, così da ottenere un modello di regressione con il quale “spazializzare” i dati disponibili ed ottenere una stima degli indicatori per l'intera area dimostrativa.

2.5 *Forest Information System*

I sistemi di supporto alle decisioni (Decision Support System, DSS) si sono sviluppati sempre di più negli ultimi anni anche per la maggiore disponibilità di dati, inventariali e telerilevati, a vari livelli di scala. Per fornire ai gestori delle aree dimostrative uno strumento utile alle attività che periodicamente li vedono coin-

volti nella gestione delle loro foreste, tutti i dati acquisiti ed elaborati all'interno del progetto sono stati organizzati in un Forest Information System (FIS) sviluppato in ambiente GIS. Un pacchetto di dati georeferenziati è stato preparato per ciascuna area dimostrativa, organizzato in modo che i vari *layers* potessero essere visualizzati su qualsiasi software GIS già disponibile presso le sedi degli enti gestori. Laddove i soggetti gestori non fossero già provvisti di piattaforme GIS, è stato realizzato un progetto con il software open-source QGIS e gli operatori sono stati formati al suo utilizzo con apposite sessioni di training.

Il FIS contiene tutti i dati raccolti dall'inizio del progetto: dati pre-esistenti (ad esempio viabilità, piani di gestione, carte tecniche regionali, idrografia), nuovi dati acquisiti (ortofoto, DTM, DSM, dati inventariali) e dati elaborati (classificazione in European Forest Types, mappe degli indicatori di GFS). Questi dati, dove possibile, sono stati organizzati e resi disponibili a scala di singola unità culturale, facendo riferimento ai particellari già presenti per le aree dimostrative. Gli operatori sono quindi stati invitati ad esplorare le potenzialità del sistema in modo da fornire feedback che permettessero di caratterizzare i singoli FIS e orientarli verso le diverse necessità della gestione delle aree dimostrative.

3. RISULTATI

Per quanto riguarda la classificazione dei tipi forestali i risultati della fotointerpretazione sono riportati nelle Figure 7 e 8.

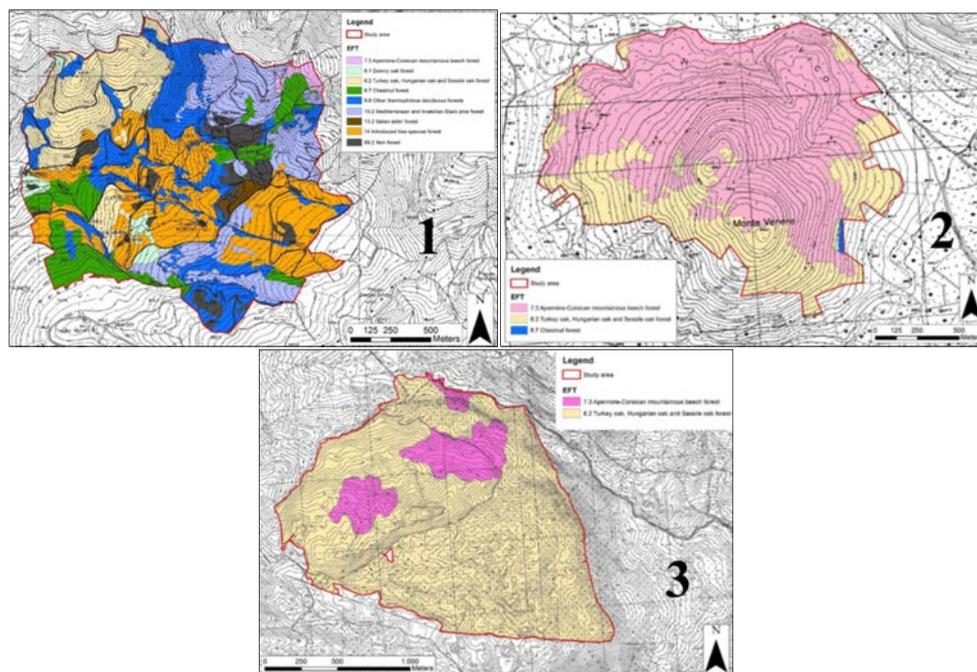


Figura 7 - Risultato della fotointerpretazione per le tre aree dimostrative (1 - Rincine; 2 - Caprarola; 3 - Bosco Pennataro).

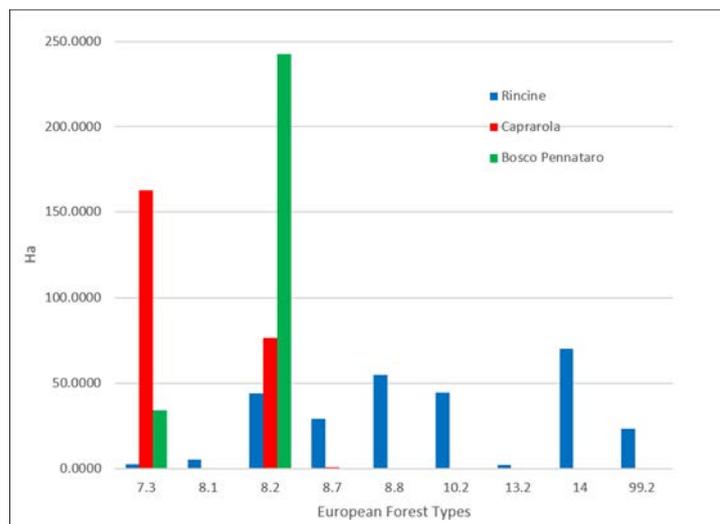


Figura 8 - Risultati della fotointerpretazione per le tre aree dimostrative (i codici fanno riferimento alle tipologie forestali elencate in Tabella 4).

È evidente la differente composizione delle aree dimostrative di Caprarola e Bosco Pennataro, che presentano due soli tipi forestali rispetto alla maggiore eterogeneità della foresta di Rincine.

Per quanto riguarda le classificazioni semiautomatiche i risultati nelle aree di progetto sono stati diversi (Figura 9). A Rincine l'orografia dell'area dimostrativa ha influenzato negativamente la qualità dell'ortofoto che presentava il 25% della superficie ombreggiata dai rilievi montuosi presenti, costringendo a limitare la classificazione semiautomatica alla sola distinzione tra conifere e latifoglie. L'accuratezza complessiva (OA "Overall Accuracy") della classificazione in questo caso si è attestata di poco al di sopra del 65% (0,67).

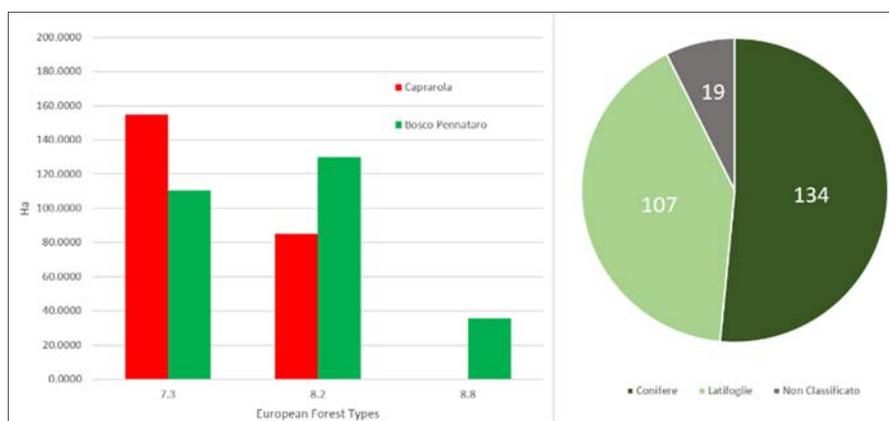


Figura 9 - Risultati della classificazione semiautomatica per le tre aree dimostrative: a sinistra l'istogramma per le aree di Caprarola e Bosco Pennataro; a destra la classificazione suddivisione in conifere e latifoglie per l'area di Rincine con indicata la superficie in ha per ciascuna categoria (i codici fanno riferimento alle tipologie forestali elencate in Tabella 4).

Per quanto riguarda invece Caprarola e Bosco Pennataro la presenza, all'interno delle aree dimostrative, di un numero ridotto di tipi forestali, ha facilitato le operazioni di classificazione permettendo di arrivare alla definizione degli EFT con un'accuratezza (OA) superiore all'85% (0,86), di poco inferiore a quella ottenuta per fotointerpretazione sulla stessa area (92%) (Giuliarelli *et al.*, 2017). Anche in questo caso però differenze sul periodo di acquisizione delle immagini tra le due aree hanno portato ad una diversa impostazione dei parametri a causa del variare dello stadio fenologico delle specie. A Caprarola, dove i voli sono stati effettuati alla fine di maggio, le due specie forestali dominanti (faggio e cerro) presentavano una differente risposta spettrale, particolarmente riconoscibile nella banda del verde, spingendo i ricercatori a dare maggior peso a quest'ultima all'interno dell'algoritmo di classificazione.

Per quanto riguarda il lavoro di Del Perugia *et al.* (2017; 2018) la migliore accuratezza, valutata in confronto al risultato della fotointerpretazione (Figura 10), si è ottenuta con l'impiego di RF e la combinazione di tre fonti di dati: NIR, RGB e LiDAR (OA 71%); un risultato ancora migliore (OA 83%) si è avuto limitando la classificazione alle categorie forestali (conifere, latifoglie e boschi misti) invece che all'identificazione delle singole specie.

I risultati per l'indicatore di defogliazione hanno evidenziato una media di meno di una pianta/ha appartenente alle classi di defogliazione più alte per Caprarola e Bosco Pennataro, mentre di circa 7 piante/ha per l'area dimostrativa di Rincine (Figura 11). Utilizzando gli stessi dati di partenza, per l'area dimostrativa di Caprarola, sono state testate anche procedure di segmentazione automatica volte a identificare altri tipi di caratteristiche della copertura forestale. Uno studio volto a testare l'utilizzo della mappatura dei gap come covariata per il monitoraggio della biodiversità da dati telerilevati (Bagaram *et al.*, 2018), ha dimostrato come, con procedure di segmentazione object-oriented, sia possibile mappare gap anche di piccole dimensioni a partire dalle ortofoto ad altissima risoluzione spaziale del drone eBee. Procedure simili potrebbero essere testate in futuro anche per la stima dell'indicatore "defoliation".

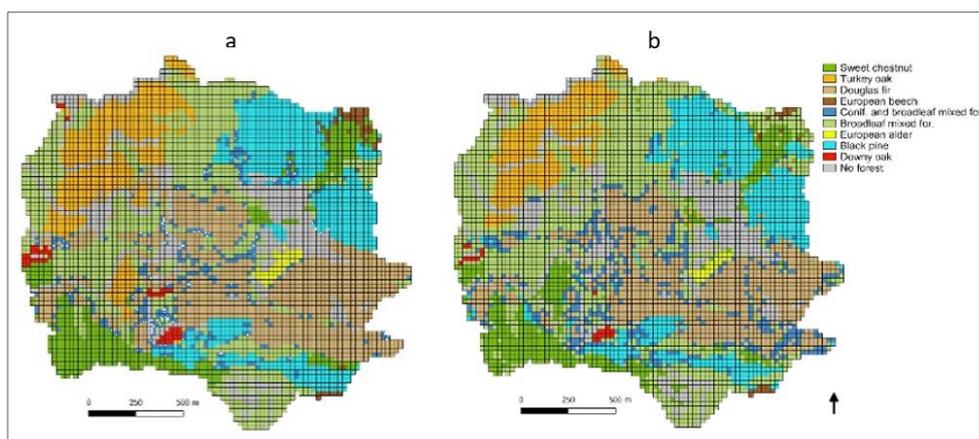


Figura 10 - Confronto tra i risultati della fotointerpretazione (a) e quelli ottenuti con RF (b).

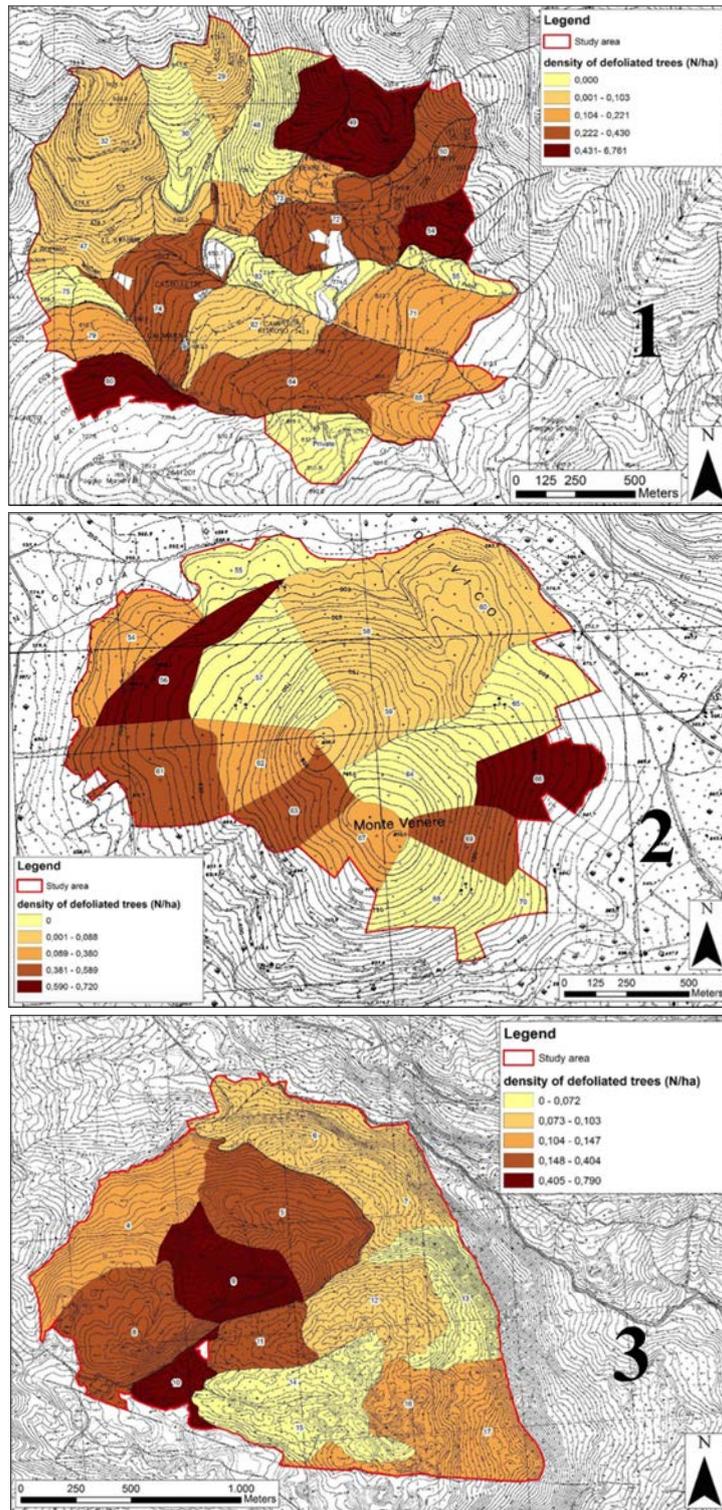


Figura 11 - Mappe dell'indicatore di defogliazione per le tre aree dimostrative (1 - Rincine; 2 - Caprarola; 3 - Bosco Pennataro).

Per quanto riguarda l'indicatore di danno alle foreste l'unica area con danni è risultata quella di Rincine con una superficie di poco superiore ai 3 ha sugli oltre 270 che costituiscono l'area dimostrativa (Figura 12).

Il numero di specie arboree presenti in ciascuna unità colturale (particella forestale), calcolato come il numero di EFT presenti al suo interno, presenta un intervallo di variazione tra 1 e 3 per Caprarola e Bosco Pennataro, e valori fino a 5 per l'area dimostrativa di Rincine (Figura 13).

Per quanto riguarda la mappatura delle specie non autoctone, queste sono state individuate solo nell'area di Rincine. Qui, rimboschimenti di specie come la duglasia (*Pseudotsuga menziesii*) e altre conifere non autoctone (ad es. *Chamaecyparis lawsoniana*) coprono circa il 25% dell'intera area dimostrativa (Figura 14).

I risultati ottenuti per la stima della provvigione legnosa e la biomassa, variano, anche in questo caso, tra le aree dimostrative, con valori di R^2 che vanno da 0,80 (Rincine - RMSE 111 m³/ha) a 0,26 (Caprarola - RMSE 167 m³/ha) per la provvigione legnosa (Figura 15), e da 0,68 (Rincine - RMSE 64,7 m³/ha) a 0,25 (Caprarola - RMSE 134,4 m³/ha) per la biomassa (Figura 16) (Puletti *et al.*, 2017; Grotti *et al.*, 2018).

Infine, i dati del progetto sono stati inseriti nei Forest Information System (Figura 17) e installati presso le tre sedi degli Enti Territoriali responsabili della pianificazione nelle tre aree dimostrative: l'Unione dei Comuni Valdarno e Valdisieve, il Comune di Caprarola e la Regione Molise. Su richiesta degli operatori locali il FIS è stato integrato nel comune GIS open-source QGIS in quanto già in uso per le normali attività di gestione.

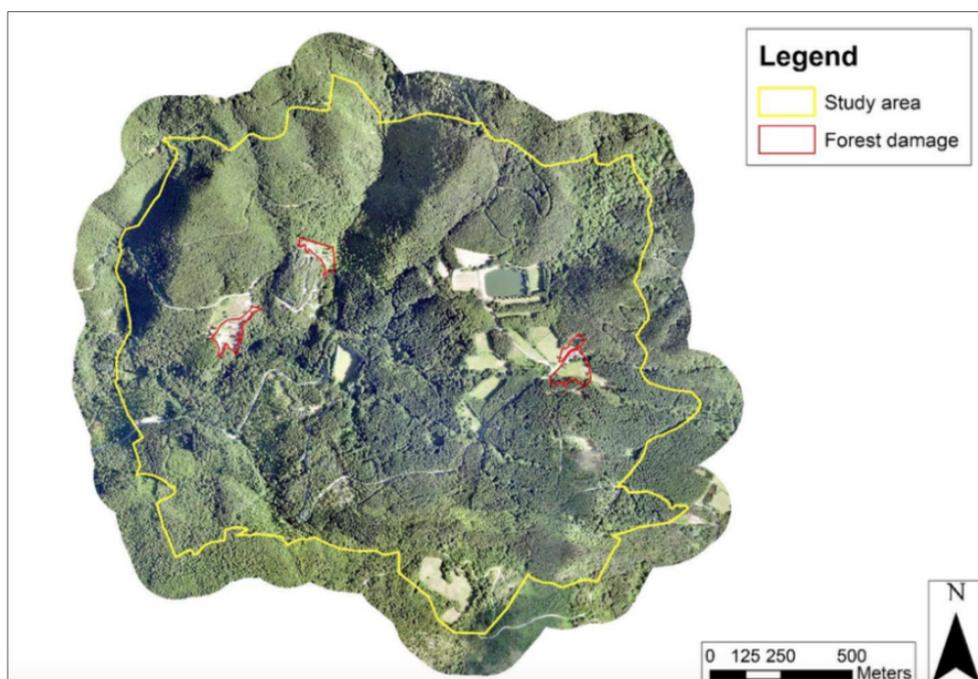


Figura 12 - Mappa dell'indicatore relativo alle aree danneggiate per l'area dimostrativa di Rincine.

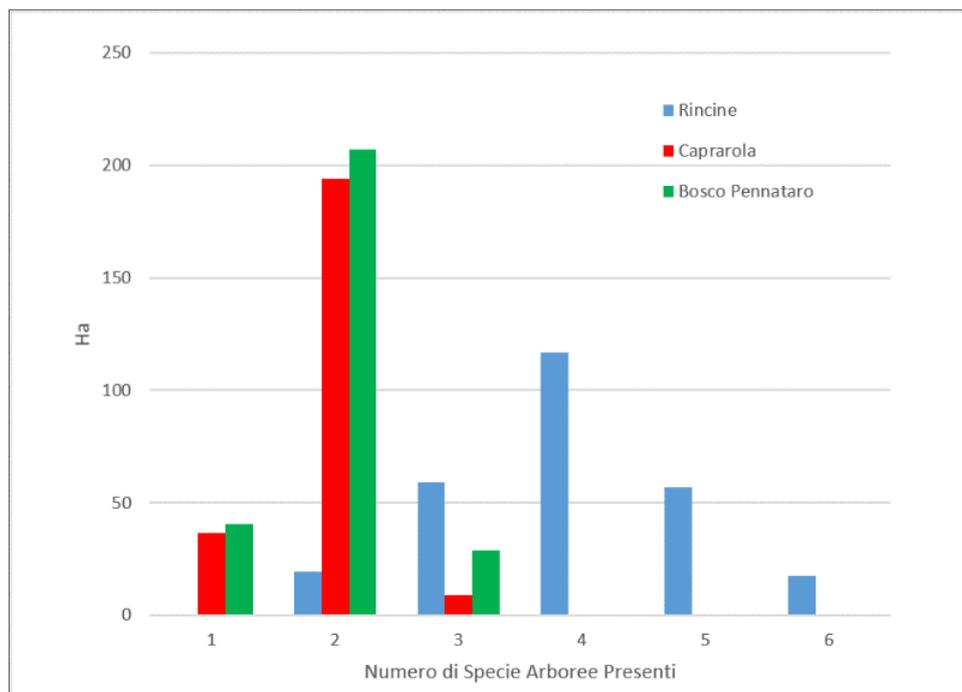


Figura 13 - Risultati della classificazione delle tre aree dimostrative in base all'indicatore di Gestione Forestale Sostenibile "Tree Species Composition".

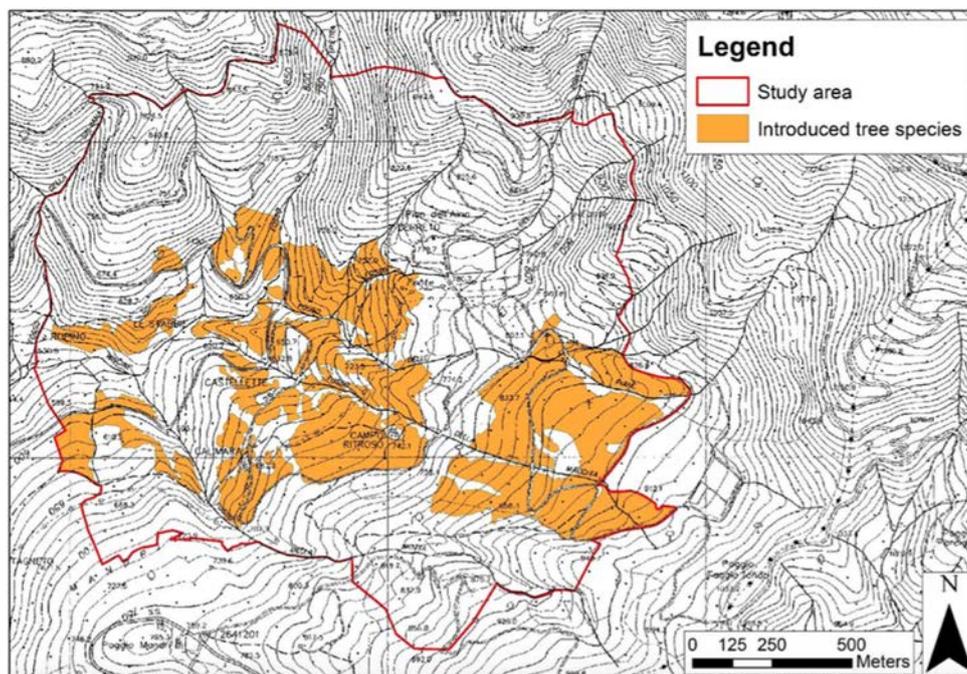


Figura 14 - Mappa dell'indicatore relativo alle specie non autoctone (aliene) per l'area dimostrativa di Rincine.

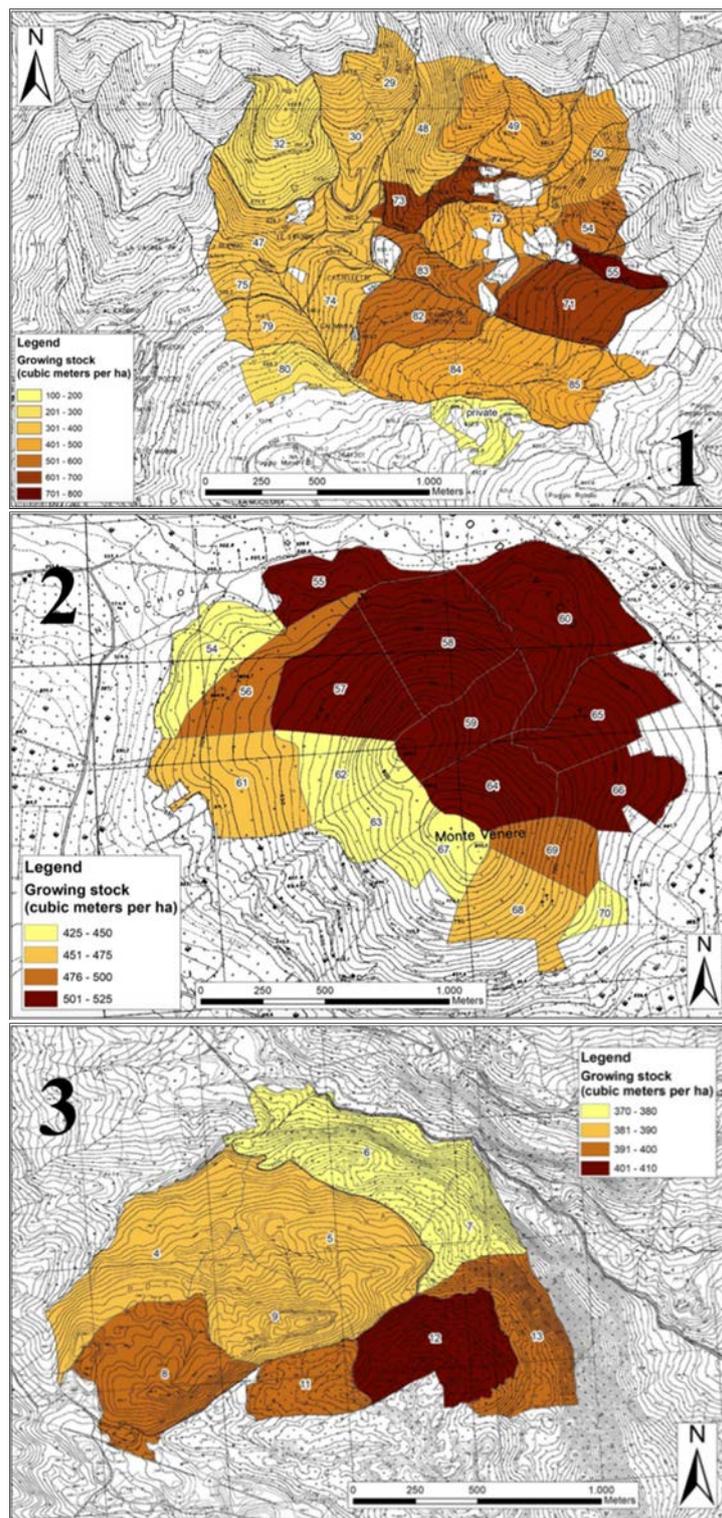


Figura 15 - Mappe della stima della provvigione legnosa per le tre aree dimostrative riportata a scala di singola unità colturale (1 - Rincine; 2 - Caprarola; 3 - Bosco Pennataro).

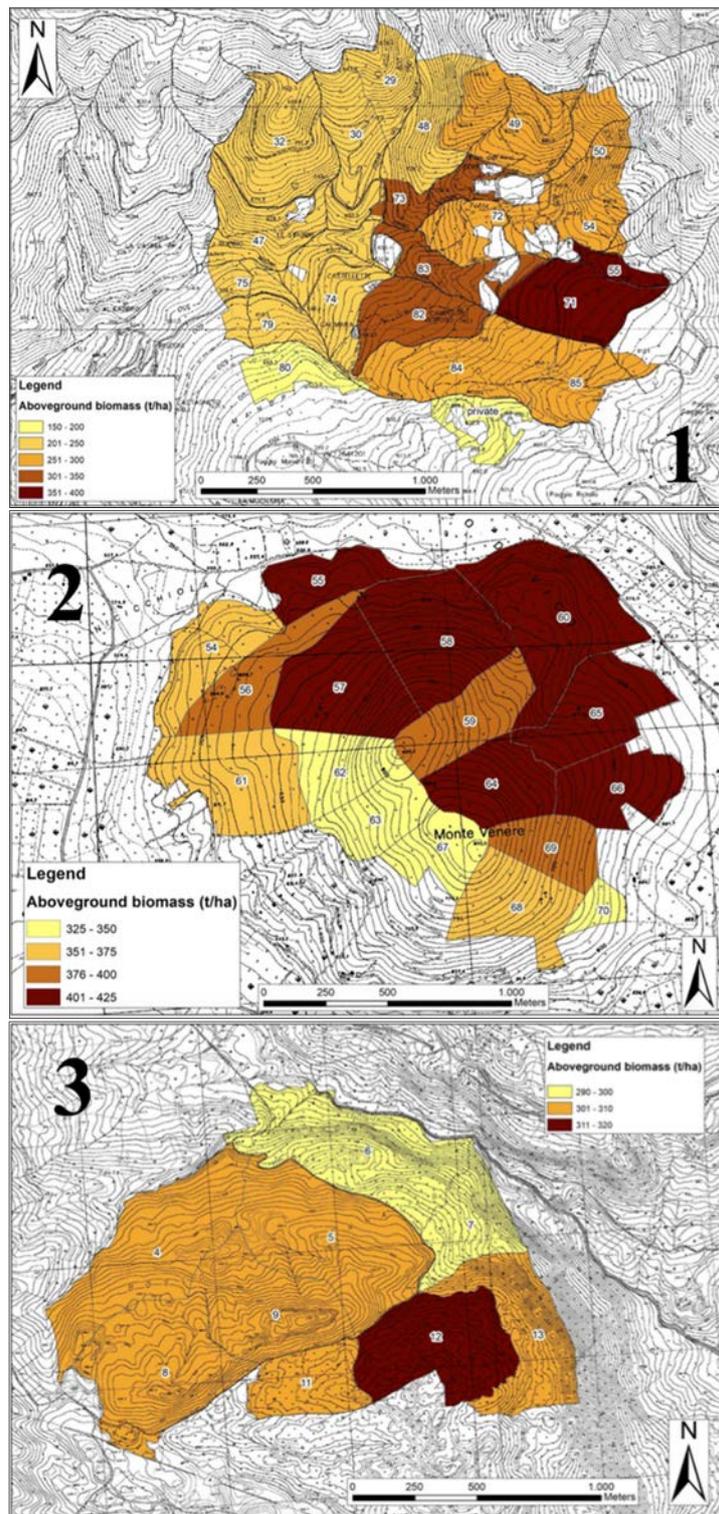


Figura 16 - Mappe della stima della biomassa per le tre aree dimostrative riportata a scala di singola unità culturale (1 - Rincine; 2 - Caprarola; 3 - Bosco Pennataro).

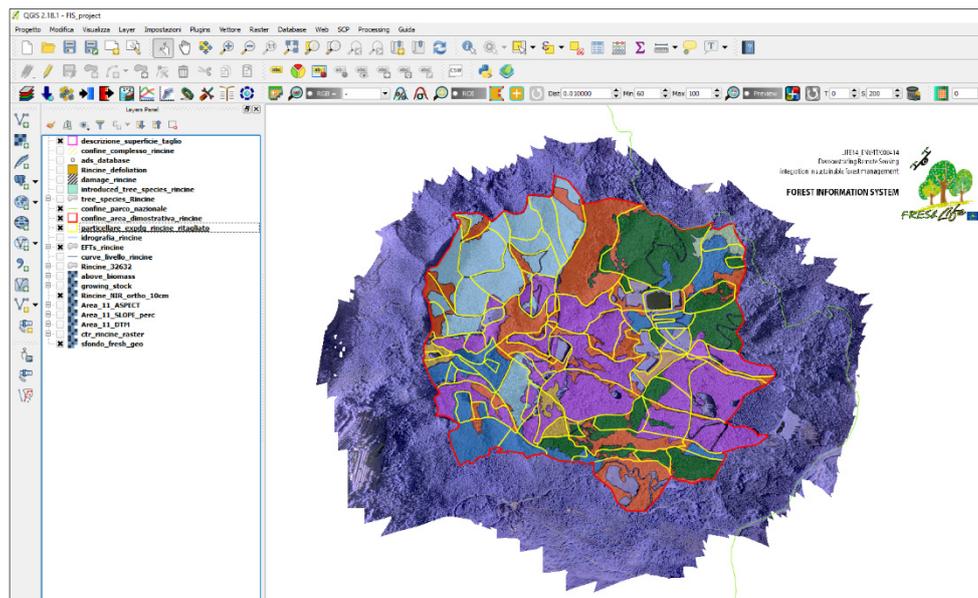


Figura 17 - Esempio di schermata acquisita dal FIS dell'area dimostrativa di Rincine.

4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Grazie al progetto FRESH LIFE è stato possibile dimostrare le potenzialità di mappatura tramite ortofoto acquisite dal drone eBee d'indicatori di GFS legati alle caratteristiche compositive e allo stato di vitalità dei popolamenti forestali. Sono state altresì sperimentate procedure di stima alternative e l'uso combinato di dati laser scanner aereo e terrestre per la mappatura della provvigione legnosa e della biomassa. La trasferibilità e la replicabilità dei metodi adottati nel progetto è stata verificata in molteplici contesti operativi. Ad esempio, sono stati utilizzati dati inventariali e dati LiDAR per stimare la provvigione legnosa delle pinete litoranee di pino domestico in Toscana (D'Amico *et al.*, 2019); sono state applicate metodologie per la stima del volume basate su algoritmi “*individual tree detection*” (Sačkov *et al.*, 2016); è stata valutata la potenzialità di integrazione di dati laser scanner da aereo e da terra per la stima di attributi di singoli alberi come diametro e altezza (Giannetti *et al.*, 2018b); sono state sviluppate procedure innovative come l'utilizzo di metriche “*DTM-independent*” (Giannetti *et al.*, 2018c) estremamente utili in ambito forestale in quanto, basandosi esclusivamente su dati fotogrammetrici, permettono di superare i problemi legati alla normativa vigente che limita il volo dei droni più pesanti capaci di trasportare sensori LiDAR necessari per generare il DTM.

Lo scopo principale dei progetti LIFE resta però è il trasferimento delle conoscenze dal mondo della ricerca a quello operativo; per questo motivo il coinvolgimento dei gestori locali, iniziato con la scelta di includerli all'interno della partnership, è proseguito durante tutte le fasi del progetto e si è inoltre esteso a varie tipologie di stakeholder. Questo ha portato alla creazione di un network

che mette insieme singoli individui e realtà attive su varia scala, tutti accumulati dall'interesse per le tematiche affrontate. L'utilizzo di droni e di metodologie innovative, come ad esempio la modellizzazione 3D, favoriscono un interesse verso il progetto che non si limita al settore forestale ma che ha coinvolto anche realtà legate, ad esempio, al mondo della robotica e della sensoristica.

Durante la fase di acquisizione dei nuovi dati telerilevati ha avuto molto successo l'organizzazione di voli dimostrativi in ciascuna delle aree di studio; gli eventi, organizzati con il supporto dei partner locali, prevedevano un'introduzione alle tematiche e agli obiettivi del progetto seguiti poi dal volo dei droni e dalla successiva elaborazione in diretta dei dati acquisiti fino all'ottenimento dei prodotti finiti. Queste iniziative, veicolate tramite il sito web del progetto e le pagine social dedicate, hanno visto la partecipazione di studenti, ricercatori, amministratori locali, liberi professionisti e istituzioni che hanno costituito la base di contatti su cui poi è proseguita tutta la successiva comunicazione del progetto. Il sito web e i canali social ad esso abbinati sono tenuti costantemente aggiornati con report, foto e video sulle attività del progetto. Parallelamente a queste attività di natura più divulgativa, è stata portata avanti la partecipazione a congressi e convegni di settore, oltre all'organizzazione di seminari, presso le università ed altre sedi, per affrontare aspetti particolari delle tematiche del progetto.

Complessivamente il progetto FRESH LIFE ha permesso ad oggi la pubblicazione di 10 contributi in riviste scientifiche nazionali e internazionali e di oltre 30 comunicazioni a conferenze e congressi sotto forma di poster o presentazioni orali.

RICONOSCIMENTI

Si ringrazia il Comando Stazione dei Carabinieri Forestali di Montedimezzo per il supporto logistico durante la fase dei rilievi in campo e l'ospitalità per la realizzazione dell'evento dimostrativo, l'Associazione Foresta Modello delle Montagne Fiorentine per il contributo nella divulgazione e la partecipazione negli eventi organizzati nell'area dimostrativa di Rincine e la Riserva Naturale Regionale del Lago di Vico per aver ospitato l'evento dimostrativo e aver dato la disponibilità ad accedere al materiale necessario per la raccolta dati preesistenti nell'area di Caprarola.

Per approfondire le tematiche affrontate dal progetto FRESH LIFE è possibile fare riferimento ai seguenti canali:

- Sito Web del progetto (<https://freshlifeproject.net/>) costantemente aggiornato con tutte le news e gli eventi, comprende una sezione dedicata ai risultati da cui è possibile scaricare tutto il materiale e approfondire metodologie e risultati delle singole azioni.
- Canale YouTube dedicato (<https://www.youtube.com/channel/UCy5FWqBnQBfpz91p4frGoEQ>).
- Pagina FaceBook del progetto (<https://www.facebook.com/freshlifeproject/>).

SUMMARY

Remote Sensing in Sustainable Forest Management. First results from FRESH LIFE project - Demonstrating Remote Sensing Integration in sustainable forest management (LIFE14_ENV/IT/000414)

Climate change is an unprecedented issue in modern times, with significant implications on the status of forest ecosystems and the multiple benefits they provide. Climate change is also a dynamic and complex issue that increases uncertainty about what future forests will look like. Because of these unpredictable effects, forest managers could benefit from monitoring, rather than modelling, tools to assess the effect of management on the status and trends of forest resources. Sustainable Forest Management is based on the principle of maintaining and enhancing the long-term health of forest ecosystems while providing environmental, economic, social, and cultural opportunities for current and future generations. The objective of the FRESH LIFE project is to demonstrate the possible integration of remote sensing technologies, in order to provide high resolution spatial information on selected SFM indicators under Forest Europe process, at the forest management unit scale. In this study we present the activities of the FRESH LIFE project carried out in a Mediterranean study area (Central Italy) to create a Forest Information System (DSS). Forest inventory data and high resolution remote sensing data acquired by drones (UAV) were used to produced maps of SFM Indicators. These maps were implemented in the Forest Information System to support forest managers in the decision making process.

BIBLIOGRAFIA

- Bagaram M.B., Giuliarelli D., Chirici G., Giannetti, F., Barbati A., 2018 - *UAV Remote Sensing for Biodiversity Monitoring: Are Forest Canopy Gaps Good Covariates?* Remote Sens., 10: 1397. <https://doi.org/10.20944/preprints201807.0209.v1>
- Balsi M., Esposito S., Fallavollita P., Gianni C., 2016 - *Airborne lidar scanning for forest biomass estimation, Unmanned Vehicles in Research ENVRIPlus Workshop*. Livorno, 12th-15th October 2016.
- Balsi M., Esposito S., Fallavollita P., Giannetti F., Chirici G., 2017 - *High-Density Aerial LiDAR Survey for the FRESH LIFE Project*. In: Fares S., Alivernini A., Chianucci F., Ferrara C., Marchi M., Sallustio L., Bucci G. (eds), *La foresta che cambia: ricerca, qualità della vita e opportunità*. XI SISEF National Congress, Rome (Italy) 10-13 Sept 2017. Abstract-book, p. 122+134 [online] URL: <http://www.sisef.it/sisef/xi-congresso/>
- Balsi M., Esposito S., Fallavollita P., Nardinocchi C., 2018a - *Single-tree detection in high-density LiDAR data from UAV-based survey*. European Journal of Remote Sensing, 51 (1): 679-692. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474722>
- Balsi M., Esposito S., Fallavollita P., Chirici G., 2018b - *High-Density Aerial LiDAR Survey for the FRESH LIFE Project*. In: AIT2018, IX Conference of the Italian Society of Remote Sensing, Florence 4-6 July 2018, Abstract Book (<https://aitonline.org/ait2018-2/>).
- Barabesi L., Franceschi S., Marcheselli M., 2012 - *Properties of design-based estimation under stratified spatial sampling with application to canopy coverage estimation*. The Annals of Applied Statistics, 6 (1): 210-228. <https://doi.org/10.1214/11-AOAS509>
- Barbati A., Marchetti M., Chirici G., Corona P., 2014 - *European Forest Types and Forest Europe SFM indicators: tools for monitoring progress on forest biodiversity conservation*. Forest Ecology and Management, 321: 145-157. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.004>
- Brus D.J., Spätjens L.E.E.M., de Gruijter J.J., 1999 - *A sampling scheme for estimating the mean extractable phosphorus concentration of fields for environmental regulation*. Geoderma, 89: 129-148.
- Corona P., 2010 - *Integration of forest mapping and inventory to support forest management*. iForest, 3: 59-64. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00123-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00123-2)
- D'Amico G., Del Perugia B., Chirici G., Giannetti F., Travaglini D., 2019 - *Caratterizzazione delle pinete litoranee di pino domestico della Toscana con dati telerilevati a supporto della Gestione Forestale Sostenibile*. In stampa negli Atti del Settimo Simposio "Il Monitoraggio Costiero Mediterraneo: problematiche e tecniche di misura".

- Del Perugia B., Travaglini D., Barbati A., Barzagli A., Giannetti F., Lasserre B., Nocentini S., Santopuoli G., Chirici G., 2017 - *Classificazione delle specie forestali con dati multispettrali e laser scanning multiplatforma*. In: Fares S., Alivernini A., Chianucci F., Ferrara C., Marchi M., Sallustio L., Bucci G., (eds), *La foresta che cambia: ricerca, qualità della vita e opportunità*. XI SISEF National Congress, Rome (Italy) 10-13 Sept 2017. Abstract-book, p. 122+134 [online] URL: <http://www.sisef.it/sisef/xi-congresso/>
- Del Perugia B., Travaglini D., Barzagli A., Giannetti F., Nocentini S., Chirici G., 2018 - *Classification of dominant forest tree species by multi-source very high spatial resolution remote sensing data*. In: AIT2018, IX Conference of the Italian Society of Remote Sensing, Florence 4-6 July 2018, Abstract Book (<https://aitonline.org/ait2018-2/>).
- EEA (European Environment Agency), 2006 - *European forest types. Categories and types for sustainable forest management and reporting*. EEA, Report No. 9/2006.
- Fattorini L., Corona P., Chirici G., Pagliarella M.C., 2015 - *Design-based strategies for sampling spatial units from regular grids with applications to forest surveys, land use and land cover estimation*. *Environmental Metrics*, 26: 216-228. <https://doi.org/10.1002/env.2332>
- Forest Europe, UNECE and FAO, 2011 - *State of Europe's Forests 2011. Status and Trends in Sustainable Forest Management in Europe*. In: Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, Forest Europe Liaison Unit Oslo.
- Giannetti F., Travaglini D., Chirici G., 2017 - *Use of UAV photogrammetric 3D data for forestry inventory: a case of study*. In: Fares S., Alivernini A., Chianucci F., Ferrara C., Marchi M., Sallustio L., Bucci G. (eds), *La foresta che cambia: ricerca, qualità della vita e opportunità*. XI SISEF National Congress, Rome (Italy) 10-13 Sept 2017. Abstract-book, p. 122+134 [online] URL: <http://www.sisef.it/sisef/xi-congresso/>
- Giannetti F., Travaglini D., Chirici G., 2018a - *Use of UAV photogrammetric 3D data to predict forest structure indices*. In: AIT2018, IX Conference of the Italian Society of Remote Sensing, Florence 4-6 July 2018, Abstract Book (<https://aitonline.org/ait2018-2/>).
- Giannetti F., Puletti N., Quatrini V., Travaglini D., Bottalico F., Corona P., Chirici G., 2018b - *Integrating terrestrial and airborne laser scanning for the assessment of single tree attributes in Mediterranean forest stands*. *European Journal of Remote Sensing*, 51: 795-807. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1482733>
- Giannetti F., Chirici G., Gobakken T., Næsset E., Travaglini D., Puliti S., 2018c - *A new approach with DTM-independent metrics for forest growing stock prediction using UAV photogrammetric data*. *Remote Sensing of Environment*, 213: 195-205. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.016>
- Giuliarelli D., Barbati A., Del Perugia B., Ferrari B., Giannetti F., Lasserre B., Mattioli W., Oreti L., Santopuoli G., Tomao A., Travaglini D., Chirici G., 2017 - *Mappatura degli European Forest Types da drone e applicazioni per la stima di indicatori di biodiversità forestale*. In: Fares S., Alivernini A., Chianucci F., Ferrara C., Marchi M., Sallustio L., Bucci G. (eds), *La foresta che cambia: ricerca, qualità della vita e opportunità*. XI SISEF National Congress, Rome (Italy) 10-13 Sept 2017. Abstract-book, p. 122+134 [online] URL: <http://www.sisef.it/sisef/xi-congresso/>
- Grotti M., Puletti N., Corona P., Chirici G., Giuliarelli D., Dibiasi R.M., Fattorini L., 2018 - *Design-based approaches for the spatial prediction of stand attributes under forest inventory perspectives*. In: AIT2018, IX Conference of the Italian Society of Remote Sensing, Florence 4-6 July 2018, Abstract Book (<https://aitonline.org/ait2018-2/>).
- Maes J., Egoh B., Willems L., Lique C., Vihervaara P., Schägner J.P., Grizzetti B., Drakou E.G., La Notte A., Zulian G., Bouraoui F., Paracchini M.L., Braat L., Bidoglio, G., 2012 - *Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union*. *Ecosystem Services*, 1 (1): 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.06.004>
- Marchetti M., Sallustio L., Ottaviano M., Barbati A., Corona P., Tognetti R., Zattero L., Capotorti G., 2012 - *Carbon sequestration by forests in the national Parks of Italy*. *Plant Biosystems*, 146 (4): 1001-1011. <https://doi.org/10.1080/11263504.2012.738715>
- MCPFE, 2015 - *Background information for Improved Pan-European Indicators for Sustainable Forest Management*. Madrid, Spain.

- Puletti N., Chirici G., Barbati A., Giannetti F., Grotti M., Morletti A., Ventre T., Corona P., Fattorini L., 2017- *Stima di risorse forestali ad alta risoluzione tramite informazioni telerilevate multi-piattaforma*. In: Fares S., Alivernini A., Chianucci F., Ferrara C., Marchi M., Sallustio L., Bucci G. (eds), *La foresta che cambia: ricerca, qualità della vita e opportunità*. XI SISEF National Congress, Rome (Italy) 10-13 Sept 2017. Abstract-book, p. 122+134 [online] URL: <http://www.sisef.it/sisef/xi-congresso/>
- Sačkov I., Santopuoli G., Bucha T., Lasserre B., Marchetti M., 2016 - *Forest Inventory Attribute Prediction Using Lightweight Aerial Scanner Data in a Selected Type of Multilayered Deciduous Forest*. *Forests*, 7, 307. <https://doi.org/10.3390/f7120307>
- Santopuoli G., Di Febbraro M., Alvites Diaz C., Balsi M., Marchetti M., Lasserre B., 2018a - *ALS data for detecting Habitat Trees in a multi-layered Mediterranean forest*. In: AIT2018, IX Conference of the Italian Society of Remote Sensing, Florence 4-6 July 2018, Abstract Book (<https://aitonline.org/ait2018-2/>)
- Santopuoli G., Antonucci S., Spina P., Marchetti M., Garfi V., 2018b - *Field-Map: riscontri pratici sull'utilizzo in campagne di rilievo. L'esperienza dell'Università del Molise nell'ambito di progetti di ricerca e progetti LIFE*. *Sherwood*, 237: 15-18.
- Santopuoli G., di Cristofaro M., Kraus D., Schuck A., Lasserre B., Marchetti M., 2019 (in stampa) - *Biodiversity conservation and wood production in a Natura 2000 Mediterranean forest. A trade-off evaluation focused on the occurrence of microhabitats*. *iforest*.
- Spina P., Santopuoli G., 2019 (in stampa) - *Valore habitat e valore economico degli alberi. Esempi pratici per la valutazione dei trade-off sulla base dei microhabitat*. *Sherwood*, 238: 11-15.
- Tang L., Shao G., 2015 - *Drone remote sensing for forestry research and practices*. *Journal of Forestry Research*, 26: 791-797. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>