



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI

**SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA
Scienze e Biotecnologie
dei Sistemi Agrari e Forestali
e delle Produzioni Alimentari**



Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi forestali in Ambiente
Mediterraneo

Ciclo XXVII

Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio,
l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale

dr. Marco Mura

*Direttore della
Scuola
Referente di
Indirizzo
Docente Guida
Correlatore*

prof. Alba Pusino
prof. Ignazio Floris
prof. Roberto Scotti
prof. Massimo d'Angelo

Anno accademico 2013 - 2014



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI



SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN
SCIENZE E BIOTECNOLOGIE DEI SISTEMI AGRARI E
FORESTALI E DELLE PRODUZIONI ALIMENTARI
DIPARTIMENTO DI AGRARIA

**MONITORAGGIO E CONTROLLO DEGLI ECOSISTEMI FORESTALI
IN AMBIENTE MEDITERRANEO
XXVII CICLO**

TEMA DI RICERCA

***TECNICHE INNOVATIVE PER L'INVENTARIAZIONE E IL MONITORAGGIO,
L'IMPLEMENTAZIONE DELL'APPROCCIO SISTEMICO NELLA GESTIONE
FORESTALE***

***ADVANCEMENTS IN MONITORING METHODOLOGIES, SUPPORTING THE
IMPLEMENTATION OF SYSTEMIC FORESTRY***

Dottorando: Marco Mura
Docente guida: prof. Roberto Scotti
Correlatore: prof. Massimo d'Angelo

Anno Accademico 2013/2014

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

INDICE GENERALE

1. Introduzione.....	5
2. Obbiettivi.....	20
3. Materiali e metodi.....	24
3.1. Area di studio.....	24
3.2. Fonte e caratteristiche dei dati utilizzati.....	26
3.2.1. Scaricamento del dato ALS.....	27
3.3. Rilievi a terra.....	30
3.4. Metodi di stima dell'altezza della vegetazione (CHM).....	32
3.5. Metodi di stima della densità dei popolamenti.....	32
3.5.1. Valori di densità tramite rilievi per aree di saggio consuetudinarie (plot o UC areali).....	32
3.5.2. Valori di densità dai rilievi lineari (UC lineari).....	33
3.5.3. Elaborazione sulla densità a partire dai dati ALS.....	35
3.6. Metodi di stima dell'area basimetrica per plot tradizionali e UC lineari.....	37
3.7. Metodi di stima dell'altezza media.....	39
3.8. Metodi di stima del volume.....	40
4. Risultati e Discussione.....	43
4.1. Analisi della quantificazione dei filari prodotta con iRow da Intelescope.....	43
4.2. Analisi della densità dei popolamenti.....	47
4.2.1. Stima della densità dai rilievi basati sulle aree di saggio e sui rilievi lineari....	47
4.2.2. Stima sfruttando i dati ALS.....	49
4.2.2.a. Prova di identificazione dei vertici utilizzando l'algoritmo Top Hat.....	54
4.3. Analisi dell'area basimetrica.....	57
4.4. Analisi dell'altezza media.....	58
4.5. Analisi del volume.....	66
5. Conclusioni.....	68
5.1. Stima utilizzando le Unità di Campionamento lineari.....	69
5.1.1. Densità.....	69

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

5.1.2. Area basimetrica.....	70
5.1.3. Volume.....	71
5.2. Stima utilizzando i dati LiDAR.....	72
5.2.1. Densità.....	72
5.2.2. Altezza.....	73
5.2.3. Volume.....	75
6. Bibliografia.....	77

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Ringraziamenti

Mi sento in dovere di ringraziare il mio docente guida prof. Roberto Scotti per la costanza e la competenza con cui mi ha seguito durante i tre anni ed il prof. Massimo d'Angelo per i consigli e suggerimenti indispensabili allo sviluppo del lavoro.

Un particolare ringraziamento ai miei colleghi Sergio ed Irene, sempre pronti ad accompagnarmi in campo per i rilievi e a Mario e Gianmario con i quali avuto la fortuna di confrontarmi in questi anni.

Un grazie anche a Matteo per chiarimenti inerenti le tematiche trattate.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

1. INTRODUZIONE

Il passaggio dal XX al XXI secolo del pianeta Terra è caratterizzato dal dilagare apparentemente inarrestabile della “crisi ambientale”. Il progresso della situazione di benessere di una parte dell'umanità si realizza infatti alimentando se stesso senza tenere adeguatamente conto degli impatti sugli ecosistemi dovuti a tale progresso (MEA, 2005). La scienza ha contribuito in misura notevole alle azioni che hanno determinato e/o favorito l'insorgere di questa crisi. La comunità scientifica è quindi tenuta, oltre che all'osservazione ed al tentativo di comprendere i fenomeni in corso, anche ad approfondire le riflessioni in merito ai presupposti ed agli assunti che hanno fornito le basi per lo sviluppo di un percorso con tali esiti. La scienza si pone infatti su vari fronti critici ad indagare, cercare di rimediare e trarre insegnamento dagli errori del passato. Il tema dei cambiamenti climatici, ad esempio, sta acquistando sempre maggior peso (Cubasch et al., 2013). La gestione forestale, operando nell'ambiente a livelli di massima sensibilità, deve porsi in prima linea in questa riflessione.

Per gran parte del XX secolo, gli interventi eseguiti dai professionisti in campo ambientale e forestale, raramente sono stati oggetto di critiche da istituzioni, da pari colleghi e dalla pubblica opinione (Puettmann et al., 2009), nonostante si sia attuato spesso un approccio di tipo riduzionistico nella forma e nei contenuti. Molto spesso il fine del perseguimento di un utile da parte del proprietario forestale, metteva in secondo piano la salvaguardia degli aspetti più strettamente legati all'ecologia e al valore intrinseco del bosco. I metodi e le tecniche che la selvicoltura ha acquisito nel corso degli anni sono oggi oggetto di valutazione e di revisione, sia dal mondo scientifico sia dalla collettività. Quest'ultima, rappresentata da residenti e portatori di interesse, è sempre più coinvolta a partecipare alla pianificazione del territorio, con proposte, critiche ed osservazioni (FAO-ECE-ILO, 2000; Paletto et al., 2011; Cantiani, 2012), mostrando un interesse sempre maggiore verso gli aspetti più naturalistici e ricreazionali che le foreste possono offrire (Smith et al., 2012). A questi cambiamenti il mondo scientifico forestale ha preso parte

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

pienamente e sta affrontando una profonda e complessa introspezione che spesso crea dei contrasti ideologici all'interno della comunità forestale stessa. La questione è più che mai sentita, stimolando la nascita di nuove teorie e accendendo numerosi dibattiti (Mori, 2011), i quali fanno risaltare dissidenze che nascono il più delle volte da esperienze, contesti, provenienze e ruoli ricoperti nel settore, i più diversi.

Un fondamento di questa nuova “ristrutturazione” della Scienza Forestale, consiste nel vedere ed agire in bosco in maniera diversa rispetto al passato, attraverso un approccio di tipo olistico. L'olismo implica l'osservazione e lo studio del sistema bosco nella sua complessità dovuta all'interazione delle numerose componenti, non riducendosi all'osservazione di ciascuna singolarmente. Questo nuovo modo di agire ed interagire verso il bosco nasce ed inizia ad affermarsi quasi contemporaneamente in diversi contesti del pianeta, con dei forti sostenitori in Italia e in altre parti del mondo, come in nord America, segno evidente che si tratta di un cambiamento profondo e globale. In Italia trova la sua culla e la spinta maggiore nella scuola forestale fiorentina, guidata dal prof. Ciancio che, negli anni novanta, introduce la teoria della selvicoltura sistemica (Ciancio e Nocentini, 1996a e 1996b). Nel 2008, le linee guida della nuova teoria, vengono approvate nella mozione finale del Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura svoltosi a Taormina (Ciancio, 2009). Nonostante l'approvazione, alla fine del congresso il dibattito tra sostenitori e contrari si è mantenuto vivo, stimolando il confronto sul piano scientifico di numerosi studiosi (Anfodillo, 2009; Nocentini, 2009; Corona e Scotti, 2011; Mori, 2011).

In nord America, tra la costa nord occidentale e il Canada tre ricercatori, Klaus Puettman, Christian Messier e David Coates, rispettivamente della Oregon State University, Université du Québec à Montréal e Ministry of Forests and Range in Smithers nella Colombia Britannica, espongono il loro pensiero in libri e articoli scientifici (Puettmann et al., 2009; Messier e Puettmann, 2011), con non pochi scambi e confronti ideologici con la scuola forestale italiana. Nel loro libro *A critique of silviculture – Managing for Complexity*, riportano alcune tradizioni delle scienze forestali che si sono consolidate nel tempo ma che ora, alla luce dei cambiamenti globali, necessitano di una rivisitazione.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

La prima riguarda la pratica di mettere al centro dello studio forestale l'albero senza studiarne le relazioni con l'ambiente in cui si trova. Questa pratica, fortemente legata alla selvicoltura produttiva, comporta degli interventi tesi a controllare e indirizzare i fattori della produzione per ottenere "alberi da vendere". Per cui, tutto ciò che non è direttamente ed in senso economico positivamente influente sull'ottenimento di assortimenti di qualità in quantità, veniva visto come limitatore della produzione e veniva eliminato, come erbe, arbusti, specie arboree meno pregiate, legno morto e altro. L'uso di queste pratiche intensive e le utilizzazioni di fusti di qualità in quantità, è stato per molto tempo il parametro di riferimento per la valutazione del contesto forestale di una determinata area.

Il cercare di contenere e guidare le leggi naturali dentro un ordine artificiale, ha portato molti studiosi a concentrarsi su predicibilità della produzione e simulazione dell'evoluzione del sistema bosco. Tale fine è stato ricercato tramite la selvicoltura, impostata come strumento in grado di contenere il più possibile l'aleatorietà intrinseca nelle complesse interazioni tra le componenti del sistema bosco al fine di ridurre il campo di variabilità di risposta dell'ecosistema.

Un'altra critica è rivolta alla gestione finalizzata al mantenimento o costituzione di parti di foresta omogenei per struttura, composizione e trattamento. La base di questa pratica è connessa, oltre che con la selvicoltura produttiva, con la nascita del concetto di *stand*. Questo viene definito come la più piccola unità gestionale di base, in cui gli alberi presenti sono sufficientemente uniformi per età, struttura e composizione e crescono in un'area sufficientemente omogenea sotto il profilo della fertilità (Burley et al., 2004). Dimensioni e caratteristiche dello stand sono anche dipendenti da fattori morfologici e di tipo logistico. Le pratiche sono volte a conservare questa uniformità, senza tener conto delle problematiche di tipo biotico e abiotico conseguenti all'abbassamento della complessità e quindi della resilienza, definita come la capacità di un sistema di tornare alle condizioni originali in seguito a dei disturbi (Paci, 2011). La conservazione ed il miglioramento di questa caratteristica, per far fronte ai cambiamenti globali, è una delle sfide più importanti che la gestione forestale attuale deve portare avanti.

La sperimentazione, sviluppo e applicazione di nuove tecniche selvicolturali, nel più recente passato, non è stata diversa rispetto alla prassi adottata e consolidatasi in

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

agricoltura. Lo schema generale prevede l'implementazione di piccole aree campione (o plot), che presentino la massima uniformità su tutte le possibili (e controllabili) variabili che possono influenzare l'unica fonte di variazione che si vuole studiare (produttività di una nuova cultivar, concimazione, trattamento e altro). Tale variazione è poi valutata tenendo conto dell'ipotesi nulla da test statistici tipo ANOVA e simili. Questa procedura in campo agricolo si adatta abbastanza bene: le parcelle sperimentali sono più piccole e si possono disporre a piacimento, si hanno tempi di risposta a breve e medio periodo ed è relativamente semplice tenere sotto controllo le fonti di variabilità. In campo forestale è ben diverso: l'osservazione si protrae nel lungo e lunghissimo periodo durante il quale le condizioni iniziali definite dall'esperimento possono subire modifiche (eventi meteorici, attacchi da parte di patogeni vari ed insetti, incendi e altro), le dimensioni delle parcelle sono ben maggiori con differenze tra le parcelle sperimentali definite e risulta infine impossibile avere sotto controllo le fonti di variazione. Assunto questo, l'applicazione del trattamento o qualsiasi altra pratica studiata nel piccolo, sebbene statisticamente possa risultare accettabile, quando applicata in contesti diversi da quello di studio e riportata su vaste superfici a livello di paesaggio, può non dare gli stessi risultati.

Queste due correnti, italiana e nord americana, essendo molto simili tendono a convergere e a fondersi. Entrambe vedono il bosco come un sistema biologico complesso autopoietico, formato da numerose parti tra loro relazionate su più livelli di scale spaziali e temporali; un sistema adattativo in continua evoluzione (Levin, 1998) che non necessita di input energetici dall'esterno per perpetuarsi. Assunto il bosco come avente tali caratteristiche, la proprietà che lo rende capace di ristabilire la sua funzionalità turbata è la resilienza. La resilienza però non rimane invariata nel tempo, essa è strettamente correlata con la complessità della foresta, nel senso più ampio del termine. Di fatto a maggiore complessità corrisponde maggiore resilienza. Maggiore complessità vuol dire un numero maggiore di componenti, strutture e relazioni che lavorano efficientemente per ristabilire lo stato precedente al disturbo o raggiungere un nuovo equilibrio. La complessità è anche necessaria sia alla funzionalità sia all'efficienza e stabilità del sistema. Un bosco ad elevata complessità a tutti i livelli funziona meglio come mitigatore dei cambiamenti climatici, produttore di ossigeno, ciclo dell'acqua, banca di biodiversità e quant'altro, inoltre

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

presenterà una saturazione maggiore delle nicchie ecologiche con minor probabilità di ingresso di patogeni alloctoni ed una migliore efficienza nell'utilizzo delle risorse disponibili. La foresta ha anche una diversità strutturale e come spesso accade in biologia, essa altro non è che l'adattamento spaziale di organismi (animali e vegetali) al fine di trarre il maggior vantaggio dall'ambiente circostante. Il rapporto tra struttura e funzione è complesso e una parte influenza l'altra in maniera adattativa, ragion per cui è necessaria alla sopravvivenza dell'individuo. Non solo, la struttura (macroscopica, dal singolo albero al paesaggio) è una delle caratteristiche più sensibili e più evidenti che mette in atto un sistema adattativo in risposta a dei disturbi perturbatori esterni all'ambiente nel quale si è evoluto, studiarne il perché molto spesso porta a conoscerne e capirne i processi generativi e ipotizzare quelli in atto. Da quanto esposto risulta fondamentale, per conoscere lo stato attuale e la possibile evoluzione dell'ecosistema bosco, monitorarne continuamente ed efficacemente la struttura.

In sintesi, alla luce di quanto appena detto, viene da sé affermare che è impellente un cambio di approccio verso il modello sistemico. Questo implica un notevole sforzo per aumentare le capacità di osservare il bosco e la sua adattatività ai cambiamenti. Di conseguenza, oggi servono delle conoscenze strutturali del bosco di gran lunga maggiori di quelle che sono servite fino ad ora, sia sotto il profilo qualitativo sia di frequenza di rilievo e quindi del monitoraggio.

A tale scopo, per gestire e catturare al meglio il carattere della complessità, è imperativo mettere in gioco tutti i diversi aspetti a cui possiamo accedere attraverso delle misure, sia che si tratti di misurazioni a terra sia di dati telerilevati.

Per quanto la capacità di valutare in modo sufficientemente dettagliato le variazioni dello stato del sistema, del sistema bosco in particolare, sia evidentemente importante ai fini di una efficace gestione del territorio, in realtà tale capacità non viene assolutamente incrementata. Di fatto metodi e tecniche a disposizione dei servizi forestali, nonostante i progressi in ambito tecnologico, sono al contempo molto dispendiose e poco informative. Sono infatti ancora imperanti approcci al rilievo derivati da concezioni produttivistiche del bosco. Il focus è incentrato sulla individuazione (empirica o tecnica, poco cambia) di pochi valori medi “rappresentativi”. Per quanto il ricorso a telerilevamento e localizzazione a

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

terra via GPS possa aiutare a migliorare l'efficienza del rilievo, in realtà la misurazione in bosco del diametro dei fusti, su piccole aree, rimane il fulcro del sistema. Le misure, effettuate in questo modo, comportano tempi di lavoro notevoli (e quindi alti costi) e al contempo non consentono di mettere a fuoco gli aspetti strutturali e funzionali del bosco considerato: non colgono appieno la variabilità interna, nemmeno per la componente legnosa principale e non consentono di approfondire efficientemente la conoscenza delle altre componenti, degli aspetti strutturali in particolare. A causa degli alti costi, nella pratica dei servizi forestali, almeno in Sardegna, l'effettuazione di rilievi risulta saltuaria e disorganica. I singoli eventi di rilievo, vengono sfruttati per la causa contingente che li ha motivati e poi vengono abbandonati. Ogni volta si adottano specifiche variazioni ed adattamenti. In conclusione, i diversi eventi non sono raccolti ed organizzati, non sono nemmeno confrontabili tra loro, dopo poco, non sono nemmeno più comprensibili ed identificabili. È di conseguenza impossibile generare un flusso informativo tra i diversi soggetti sia pubblici che privati che effettuano le misure. Queste misure tuttavia, pur non avendo un protocollo comune, hanno un comune riferimento concettuale.

Con l'obiettivo di riuscire almeno a contenere lo spreco di risorse dovuto all'incapacità/impossibilità di accumulare i pochi rilievi effettuati in regione, è stata sviluppata la proposta di ricerca denominata Ricerca Dendrometrica in Sardegna (RiDendroSard, 2009). Tra gli obiettivi del progetto di ricerca c'è quello di creare una cooperazione tra tutti gli operatori forestali sardi, in modo che dall'applicazione di un protocollo comune e dal lavoro congiunto, si arrivi alla creazione di una banca dati comune, che sia di supporto per esempio per l'elaborazione delle tavole di cubatura della provvigione, biomassa e carbonio dei boschi dell'isola. RiDendroSar mira alla cooperazione tra i diversi attori che in Sardegna operano in campo forestale per cui, quando si sarà raggiunta un certo livello di cooperazione e concertazione tra i diversi enti, il progetto potrà prendere piede e produrre un quantità di dati molto elevata.

Nota l'onerosità dei rilievi e l'impossibilità di effettuarli sull'intera superficie forestale di interesse per via dell'elevata estensione, quasi sempre bisogna concentrare il lavoro su porzioni ridotte, individuate vuoi soggettivamente, vuoi secondo procedure probabilistiche.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Generalmente in dendrometria operativa la nomenclatura *area di saggio* si riferisce a delle aree scelte soggettivamente, senza riferimento ad uno schema di campionamento probabilistico. La scelta si basa su un sopralluogo preliminare con l'individuazione delle aree ritenute visivamente più rappresentative del complesso per fertilità e struttura.

Operando con procedimenti probabilistici (Avery e Burkhart, 2002; Corona, 2000), l'adozione del campionamento opportunamente calibrato e studiato, permette di ottimizzare le risorse, di ottenere delle stime affidabili delle variabili di interesse e di quantificare l'errore di stima ad esse legate. Per decidere come distribuire nello spazio i punti campione, è di indubbia utilità avere una caratterizzazione generale dell'intera area (Kangas e Maltamo, 2006). Una volta individuato il luogo dove effettuare il rilievo, per via campionaria o soggettiva, si possono seguire diversi approcci per la determinazione delle piante da misurare: per aree, strisce (o linee) e punti campione. L'approccio tramite le aree, che possono essere di forma diversa, si basa sulla misura delle grandezze di interesse che ricadono entro quella determinata superficie. Il centro, nel caso di plot circolari, o comunque il riferimento iniziale dell'area, può essere di tipo puntuale. Nell'approccio tramite strisce campione, seppur basato sempre su riferimenti areali, la superficie soggetta a misura assume la forma di bande continue a larghezza uniforme e distribuite parallelamente tra di loro a distanze prestabilite (Avery e Burkhart, 2002). Per quanto riguarda i rilievi basati sulle linee, qui detti *campionamento per linee* o *per filari*, non si trova riscontro nella letteratura consultata. Il campionamento per punti è invece un metodo di selezione degli alberi da misurare basato sulla *dimensione* degli alberi stessi, sulla distanza dall'operatore che rimane fisso sul punto e su un fattore di numerazione angolare e ricade nel ramo della dendrometria relascopica (Avery e Burkhart, 2002; la Marca, 2004).

La possibilità di avere delle conoscenze a priori sullo stato del sistema è offerta dalla disponibilità e relativa facilità di acquisizione di dati telerilevati. Nel tempo sono state date diverse definizioni di telerilevamento, ma tutte si riconducono a intendere il telerilevamento come “la pratica di ottenere informazioni sulla superficie delle terre emerse e dei mari, da piattaforme aeree o orbitanti di diverso tipo, utilizzando la radiazione elettromagnetica in uno o più regioni dello spettro elettromagnetico, riflessa o emessa dalla superficie” (Campbell e Wynne, 2011). Sono quindi dati misurati in remoto da diverse

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

piattaforme (satellite, aerei, elicotteri, droni e altro). Il tipo di acquisizione determina il prodotto finale che può essere di diversa natura: da dati di tipo immagine con misure a diverse lunghezze d'onda, a rilievi che tramite laser registrano delle coordinate tridimensionali della superficie interessata dal rilevamento, fino al dato radar. Questi metodi di misura si differenziano per l'origine della fonte di energia registrata dal sensore: nel telerilevamento attivo il sensore assorbe la radiazione riflessa dalla superficie degli oggetti da lui emessa, in quello passivo il sensore si limita solo a misurare la radiazione solare prima assorbita e poi emessa dagli oggetti (Gomasasca, 2009).

La tecnologia laser a cui si fa riferimento per rilievi tridimensionali di elevata precisione è quella LiDAR, *Light Detection And Ranging*. Il rilievo LiDAR si basa sull'emissione da parte di un sensore di impulsi laser (luce monocromatica in coerenza di fase) verso la superficie terrestre. Il sensore misura il tempo impiegato dall'impulso per tornare indietro. Durante il viaggio l'impulso incontrerà diversi oggetti (per esempio le chiome degli alberi) fino alla superficie del suolo, il tempo impiegato dall'impulso per tornare al sensore consente di calcolare, con accuratezza sub-centimetrica, la distanza tra lo strumento e l'oggetto intercettato che, in caso di rilievi aerei, è associato alla quota. Il sensore può registrare l'impulso di ritorno in maniera continua (in realtà a piccolissimi intervalli di tempo) e viene chiamato *full waveform*, oppure ad intervalli di tempo più ampi, registrando solo quattro o cinque impulsi di ritorno, detto *discrete return* (Campbell e Wynne, 2011). La posizione spaziale dei punti che l'impulso ha rilevato, è fornita dal sistema GPS integrato al rilevatore e dall'unità di misura inerziale (IMU). Questa tecnologia comprende tre tipologie di rilievo: il *ranging*, che serve alla misura delle distanze; il *profiling*, per la misura di profili verticali lineari; lo *scanning*, per la misura tridimensionale delle superfici (Petrie e Toth, 2009). Al fine di caratterizzare la struttura tridimensionale di un soprassuolo forestale, i dati di tipo ALS, *Airborne Laser Scanning*, sono oggi quelli maggiormente usati e vedono il sistema LiDAR montato frequentemente su piattaforme aeree.

In realtà il processamento del rilievo LiDAR grezzo è oneroso e complesso. Per facilitare l'utilizzo di questo tipo di rilievi vengono spesso messi a disposizione prodotti di utilizzo più immediato e diretto, ovvero file immagine con caratteristiche strutturali analoghe a quelle delle ortofoto. Suddividendo lo spazio topografico in celle regolari, a

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

seconda dei casi, l'elaborazione consiste nell'individuare, tra i punti la cui proiezione cade in una certa cella, quello di quota corrispondente al terreno nudo o all'opposto quello di quota maggiore.

Il dato pre-elaborato, a fronte della facilità di utilizzo comporta ovviamente una significativa perdita di informazione rispetto a quello grezzo. I programmi di elaborazione dei dati laser per applicazione nel campo forestale, come FUSION (McGaughey, 2013) o lastools (Isenburg, 2013), utilizzando i dati grezzi e le informazioni ausiliarie associate calcolano molte altre metriche (statistiche descrittive o indici strutturali valutati sulla nuvola di punti originata dal rilievo, Hudak et al., 2009; White et al. 2013), oltre ai valori di quota estremi. A partire da queste è possibile sviluppare studi più approfonditi rispetto a quanto non sia possibile con un'immagine (Petrie e Toth, 2009; El-Ashmawy e Shaker, 2014). D'altra parte, questi formati grezzi richiedono uno spazio di archiviazione relativamente maggiore rispetto a quello necessario alle immagini, maggiore potenza di calcolo e maggiore competenza e conoscenza nel settore del rilievo laser.

Il supporto al rilievo che i dati ALS forniscono, permette di utilizzare diversi approcci nell'inventariazione e nello studio delle risorse forestali e ambientali. Specie nel campo degli inventari forestali, è possibile avvalersi dei dati ausiliari in diversi modi. Esistono principalmente due scuole di inferenza nella teoria del campionamento: quella classica (o *design-based*, DB) e l'approccio *model-based* (MB); tra i due estremi trova parte il metodo *model-assisted* (MA). Il rilievo campionario è solitamente costituito da tre fasi: i) scelta dello schema di campionamento per l'acquisizione dei dati, ii) stima dei parametri di interesse, iii) inferenza dal campione alla popolazione studiata. I modelli, intesi come modelli matematici, possono essere utilizzati in tutte e tre queste fasi. Nella prima fase sono di supporto per la scelta dello schema di campionamento più efficiente, nella seconda per la stima delle grandezze in esame e nella terza nel calcolo della varianza associata allo schema di campionamento. In accordo con Kangas e Maltamo (2006), si fa riferimento all'approccio MB quando l'uso dei modelli è implementato nella terza fase, quella di inferenza, del rilievo campionario.

La differenza principale tra il MB e il DB risiede nel modo in cui è introdotta la casualità nella selezione delle unità campionarie. In un campionamento DB classico, la fonte di

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

casualità è la probabilità introdotta dal disegno campionario nella scelta dei vari sottoinsiemi della popolazione, gli stimatori della varianza sono strettamente dipendenti dalla struttura di questo schema. In un campionamento MB, i valori y_i osservati (parametro y della variabile i -esima) sono assunti come casuali, non fissi come nel DB e sono considerati come il risultato realizzato di una variabile Y_i avente una distribuzione ξ descritta da un modello. Il modello che descrive la superpopolazione ξ (infinita) contiene tutte le informazioni per la descrizione della popolazione dell'universo campionario (finita e generata da ξ). Supponiamo che esista un modello in ambito forestale, che descriva la relazione tra altezza della vegetazione e volume legnoso, quindi $V_{(y_i)} = f(h_{tot_i})$ e che la superpopolazione (ξ) è descritta da questa relazione. Il valore del volume di una singola osservazione y_i (albero, particella forestale, insieme di pixel, ...), è considerato come un risultato casuale realizzato della relazione $V_{(y_i)} = f(h_{tot_i})$. Ne deriva che mentre l'inferenza dipende solo dalla validità e capacità del modello di descrivere la realtà, la casualità del sottoinsieme delle unità campionarie osservate dipende solamente dalla popolazione e non rappresenta un assunto inviolabile anzi, in rari casi, l'opzione migliore è rappresentata dalla scelta oggettiva delle unità campionarie (Kangas, 1994; Gregoire, 1998; Kangas e Maltamo, 2006).

L'approccio MA è una prassi ben nota per incorporare informazioni ausiliarie in un contesto DB e si pone tra le due metodologie MB e DB. Anche in questo caso si parte dall'assunto che esista un modello di superpopolazione che descrive la relazione tra la variabile di interesse e la variabile ausiliaria. Il modello di superpopolazione deve essere lineare o comunque di forma nota (Opsomer et al., 2007). Gli stimatori MA si basano sulla relazione tra le due variabili per migliorare la precisione di stima, pur essendo l'inferenza sempre dipendente dalla probabilità associata al disegno campionario; questo a differenza del MB puro, per i quali non è possibile nessun tipo di inferenza DB, essendo le unità campionarie prive del vincolo della casualità (Opsomer et al., 2007; McRoberts et al., 2013). In questo studio alcune stime, che hanno visto l'utilizzo di variabili ancillari, sono state condotte tramite MA.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

In particolare si è fatto riferimento ai metodi di stima per rapporto e regressione (Corona, 2000).

Secondo il metodi di stima per rapporto, estraendo casualmente n strisce campione ciascuna di superficie a_i , il valore totale dell'attributo x oggetto di interesse è calcolato con lo stimatore (1).

$$X_R = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n a_i} A = R * A \quad (1)$$

Dove A è la superficie totale, nota senza errore, dell'universo campionario. Per la stima della varianza è possibile utilizzare gli stimatori del campionamento casuale se le strisce campione hanno tutte la stessa ampiezza, altrimenti si ricorre alla formula (2).

$$S_{X_R}^2 = N - (N - n) \frac{(s_x^2 - 2R s_{ax} + R^2 s_a^2)}{n} = \frac{A}{\bar{a}} \left(\frac{A}{\bar{a}} - n \right) \frac{(s_x^2 - 2R s_{ax} + R^2 s_a^2)}{n} \quad (2)$$

In questo caso \bar{a} è la superficie media delle strisce campione e s_{ax} è la covarianza dell'attributo x e della superficie a nelle strisce campione, calcolata con l'espressione (3).

$$s_{lx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(a_i - \bar{a})}{n - 1} \quad (3)$$

La stima dell'attributo oggetto di indagine attraverso i metodi della regressione lineare prevede il calcolo dei coefficienti b_0 e b_1 dell'equazione $x = b_0 + b_1 q$, che possono essere stimati con il metodo dei *minimi quadrati ordinari* (Draper e Smith, 1998).

Se è nota la vera media della variabile ausiliaria μ_q a livello dell'intera popolazione, la stima della media dell'attributo oggetto di interesse risulta pari alla (4).

$$\bar{x}_{RL} = b_0 + b_1 \mu_q \quad (4)$$

La varianza di \bar{x}_{RL} è invece stimata tramite la (5).

$$s_{\bar{x}_{RL}}^2 = \left(\frac{N - n}{N} \right) s_{x,q}^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{(\bar{q} - \mu_q)^2}{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2} \right) \quad (5)$$

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Nella (5) $s_{x,q}^2$ è la varianza dei valori predetti di x calcolata come $s_{x,q}^2 = s_x^2(1-r_{x,q}^2)$, $r_{x,q}^2$ è lo stimatore del coefficiente di correlazione tra x e q e s_x^2 è la varianza di x . Il valore totale X_{RL} e la sua varianza, sono calcolati rispettivamente con la (6) e la (7).

$$X_{RL} = N \bar{x}_{RL} = N \bar{x}_{RL} - b_1 (N \bar{q} - \Theta) \quad (6)$$

$$s_{X_{RL}}^2 = N^2 s_{\bar{x}_{RL}}^2 \quad (7)$$

In cui Θ è il valore totale della variabile ancillare q nella popolazione.

Le metriche derivanti dalle elaborazioni di dati ALS che rappresentano le variabili ausiliarie, come l'altezza della vegetazione, l'area di insidenza delle chiome e quant'altro, possono essere messe in relazione e modellizzate con parametri rilevati in campo (Mora et al., 2013; Kankare et al., 2013; Wallace, 2014).

La Regione Sardegna (RAS), ai fini del monitoraggio, della gestione e della salvaguardia del territorio ha effettuato numerose indagini estensive e rilievi di dettaglio, rendendo disponibile sul Geoportale (RAS, 2014), oltre alla cartografia di base, una estesa gamma di coperture relative a molte tematiche diverse. Il geoserver offre la possibilità di usufruire gratuitamente, per la fascia costiera, di dati LiDAR-ALS. Questi dati liberi sono scarsamente utilizzati anche nella gestione forestale, lo scopo è approfondire se e quale supporto questi dati possono dare al monitoraggio e all'inventariazione delle risorse forestali, in particolare come possono essere integrati e con quali risultati ai rilievi dendrometrici a terra.

I dati presenti, come affermato, si riferiscono in particolare al territorio costiero, ovviamente soggetto a impatto molto più rilevante rispetto all'entroterra. Per queste aree la RAS ha messo a disposizione due elaborazioni parallele di rilievi ALS. Si tratta di due mappe al discreto (raster) con risoluzione di un metro al suolo, di cui la prima rappresenta la quota stimata per il livello del suolo (*Digital Terrain Model*, DTM), la seconda la quota stimata per il livello superiore della copertura vegetale (*Digital Surface Model*, DSM). Solitamente i dati LiDAR-ALS sono forniti come nuvola di punti con le tre coordinate spaziali su cui è possibile calcolare diverse metriche. In questo caso però l'elaborazione parziale ne ha ridotto il potere informativo rispetto ai dati di origine.

La differenza tra le due superfici, la quota stimata della vegetazione e quella del terreno, consente, almeno in teoria, di stimare un valore di volume apparente della vegetazione e

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

una sua altezza, dando la possibilità di effettuare valutazioni di diversa natura in merito alla sua struttura e potenziando notevolmente lo spettro di risultati che l'inventario forestale può fornire, sia sul versante ecologico-ambientale sia nella capacità di contenere i costi di rilievo e aumentare la precisione di stima per determinate formazioni forestali (Opsomer et al., 2007; Weiskittel et al., 2011).

Parallelamente alle elaborazione dei dati ALS, si è portato avanti un altro progetto sempre finalizzato al miglioramento delle metodologie di rilievo inventariale. Questo studio è stato svolto collaborando con una compagnia Israeliana con sedi sparse tra Israele, Stati Uniti e Brasile, chiamata *Intelescope* (Intelescope, 2014). Questa offre servizi per diversi settori ambientali basati sull'analisi di immagini (tipo ortofoto aeree e da satellite) a medio-alta risoluzione. In generale l'analisi si basa sui valori cromatici dei pixel e su questi valori, attraverso trasformazioni e/o filtri, lavora l'algoritmo. Intelescope ha sviluppato diversi di questi algoritmi, di cui alcuni di potenziale interesse nel fornire supporto ai rilievi in bosco ed alle successive elaborazioni. Tra i vari ci sono quelli studiati per identificare porzioni di soprassuolo che appaiono, al visivo, omogenei per composizione specifica e per struttura sia verticale che orizzontale, distinguendosi dal pattern del paesaggio circostante. L'output finale è rappresentato dalla geometria di questi poligoni che racchiudono le porzioni di soprassuolo. Altri algoritmi consentono di individuare le chiome delle singole piante o interi filari, adattandosi molto bene ai rimboschimenti trattati in questo studio.

Nell'ambito della collaborazione intrapresa con l'Ente Foreste della Sardegna (EFS) in merito al loro programma riguardante le pinete, denominato "*Programma per il recupero e ripristino della funzionalità dei sistemi forestali litoranei*" si è colta l'opportunità di sperimentare alcune proposte. Il programma è teso al recupero ed al miglioramento della funzionalità delle pinete litoranee, riconoscendo a questi sistemi forestali, anche se artificiali, una valenza sia protettiva che paesaggistica e culturale. La completa mancanza di cure colturali passate, la pressione antropica dovuta sia ai ripetuti incendi sia alla fruizione priva di norme, hanno portato ad una semplificazione del sistema tale da ridurre la funzionalità. All'attualità si osserva un deperimento generale degli impianti, con conseguente rallentamento dei processi naturali (rinnovazione) e riduzione di biodiversità.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

In impianti dove con le conifere sono state messe a dimora anche latifoglie queste ultime, per errori progettuali o gestionali, spesso non hanno potuto svilupparsi. Il programma intende contrastare la riduzione della biomassa e della complessità strutturale e compositiva, che incidono sulla capacità di protezione del suolo, funzione prima a cui devono assolvere. Note le problematiche e l'orientamento delle azioni per il ripristino della funzionalità di queste formazioni, questo programma è inquadrabile secondo l'UNCCD (2012), nell'ottica della lotta alla desertificazione.

Più in dettaglio, gli indirizzi gestionali degli oltre 8700 ha di pinete sotto pianificazione, si riconducono a tre grandi categorie: i) conservazione e miglioramento; ii) rinaturalizzazione; iii) preservazione.

Le azioni volte alla conservazione e al miglioramento, sono quelle previste per i soprassuoli in condizioni migliori sotto l'aspetto di funzionalità e di vigoria, in cui si sono già spontaneamente avviate dinamiche evolutive che portano ad un aumento della complessità sia compositiva sia strutturale; gli interventi sono mirati a supportare e rafforzare queste dinamiche.

La prospettiva di rinaturalizzazione è invece mirata all'attivazione di processi evolutivi che senza un input esterno stentano a partire. Si tratta di sistemi invecchiati, dove la componente conifera è in fase di deperimento. In tali condizioni si necessita di interventi per favorire l'inserimento della vegetazione autoctona o la sua affermazione se già presente, pur preservando le parti più vigorose dell'impianto di conifere originario.

La preservazione prevede primariamente azioni basate sulla regolamentazione della gestione degli ambienti più fragili e critici, in cui sono presenti habitat di particolare interesse, presenti di frequente negli ambienti umidi litoranei.

Altri interventi previsti, che verranno applicati nella quasi totalità delle formazioni, sono di carattere più generale. Questi ultimi comprendono interventi a carattere fitosanitario, di riduzione del rischio incendi, di ingegneria naturalistica e manutenzioni varie.

L'area scelta per la valutazione e la sperimentazione del contributo di dati telerilevati ed ausiliari al programma in questione, è situata nella costa centro orientale della Sardegna. Si tratta precisamente di una pineta litoranea in agro di Siniscola (NU), dove la diversità

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

strutturale e compositiva di quest'area, rappresentano un buon campo di studio per l'applicazione e la valutazione di queste tecniche ancora poco utilizzate in Sardegna.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

2. *OBBIETTIVI*

L'affermarsi della teoria della selvicoltura sistemica pone il mondo forestale di fronte ad una serie di considerazioni e riflessioni sul piano operativo. Questo approccio alla gestione, innovativa frontiera nel campo forestale, riconoscendo e facendo tesoro della complessità del sistema ecologico, richiede un flusso di informazioni maggiore e più approfondito rispetto a quanto richiedeva la pianificazione e la gestione secondo i canoni precedenti (Portoghesi et al., 2014). Anche in ambito regionale i progetti relativi alla pianificazione, gestione e salvaguardia degli ambiti territoriali a connotazione forestale significativa, essendo fondati su tale approccio, richiedono un forte supporto da parte della ricerca. I rilievi tradizionali infatti, pur sempre utili, non bastano a colmare il gap qualitativo e quantitativo creatosi, per cui si rende incalzante l'esigenza di una loro rivisitazione o integrazione con altri sistemi di rilevamento. Se per aumentare la quantità di misurazioni ci si concentra su aspetti quantitativi, anche in termini di frequenza mirata al monitoraggio, senza modificare l'efficienza dei metodi adottati, ne conseguirebbe un incremento dei tempi richiesti e quindi dei costi, riuscendo a cogliere, con poca efficienza, solo un aspetto del miglioramento atteso, non progredendo sul piano dell'espandibilità dell'informazione producibile dal dato.

In relazione alla sostenibilità del rapporto tra costi di rilievo e qualità dell'informazione prodotta, occorre ripensare a come questi sono condotti, cercando di convergere sulla massimizzazione del secondo termine e sulla ricerca del giusto compromesso tra metodi, costi e qualità del dato. Le variabili misurabili in foresta sono potenzialmente illimitate, tuttavia esse presentano gradi di utilità molto differenziati in relazione al problema gestionale considerato. Cominciando dalle variabili fondative della caratterizzazione del popolamento (densità numerica e massale -area basimetrica, volume- e altezza media) la ricerca è tesa a proporre e sperimentare approcci alternativi per la quantificazione accurata e speditiva dei parametri e funzionali alla qualificazione della struttura.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

In questo lavoro si sviluppano e si testano degli approcci atti alla ottimizzazione della fase di acquisizione dei dati in campo. Infatti le riflessioni che stanno alla base del lavoro, essendo guidate dal contenuto informativo di interesse ai fini del monitoraggio, possono comportare anche una revisione critica dei procedimenti consuetudinari.

Inoltre, data la grande diversità strutturale tra i popolamenti da considerare e le diverse caratteristiche dei parametri dendrometrici di interesse, è probabilmente opportuno ed utile disporre di diversi metodi di acquisizione tra cui, di volta in volta, scegliere.

Se in passato il livello tecnologico non era sufficientemente avanzato da offrire l'occasione di esplorare nuove frontiere nel campo delle misurazioni in foresta, ad oggi le opportunità offerte e quelle sviluppabili sono in forte crescita.

L'innovazione ha riguardato tutte le fasi e gli strumenti dell'acquisizione dei dati, nonostante alcuni siano ancora poco accessibili, se non ad enti con buone disponibilità economiche. Ad oggi l'uscita per la misura in campo è sempre preceduta e pianificata osservando l'area tramite immagini telerilevate di diversa tipologia e funzionali a diversi scopi. I sensori montati su piattaforme aeree o satellitari sono in grado di utilizzare tutte le lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico, consentendo e migliorando l'analisi sia nella banda che l'occhio umano percepisce sia in quelle non percepite (Gomasca, 2009). Il progresso nel campo della tecnologia laser e di quella del posizionamento globale, permettono ora il rilevamento tridimensionale delle formazioni forestali sia a terra sia da piattaforma aviotrasportata o orbitante, aprendo la ricerca a numerose prospettive di studio. Queste immagini contengono molta informazione qualitativamente evidente, spesso difficile da isolare quantitativamente. Algoritmi e metodi sviluppati per la loro elaborazione, rappresentano il salto di qualità necessario. Il compito di alcuni algoritmi è quello di simulare il processo cognitivo del cervello umano moltiplicando la velocità di produzione delle informazioni e stabilizzandone la qualità. Queste elaborazioni possono essere utili in ogni fase dei rilievi, dall'inquadramento generale a priori fino al loro utilizzo nei calcoli finali. In realtà, come la ricerca mette in evidenza, l'interazione tra l'informazione ricercata, dato elementare e metodo di rilievo, se opportunamente presa in considerazione, offre opportunità di ottimizzazione ancora poco esplorate.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Gli obiettivi del lavoro si articolano su diversi livelli, uno di carattere generale ed uno più specifico. L'obiettivo generale è focalizzato sull'esplorazione delle possibilità offerte dalle nuove tecnologie nel campo dell'inventariazione delle risorse forestali trattate nel caso di studio.

Quello più specifico, tratterà del contributo attuale e reale che questo lavoro ha da offrire al programma di recupero delle pinete litoranee condotto dall'Ente Foreste della Sardegna.

L'obiettivo generale si focalizza sui tempi di acquisizione, sull'accuratezza dei risultati e sulla loro effettiva rappresentatività nella stima dei principali parametri dendrometrici: numero di fusti, area basimetrica e volume per unità di superficie e altezza media.

In relazione al costo base di accesso ai dati telerilevati si osserva che in misura significativa le campagne di rilievo sono finanziate da istituzioni e motivazioni di carattere pubblico. In prospettiva il costo di accesso dovrebbe diventare minimo se non addirittura essere annullato. Sono già presenti numerosi esempi in questo senso (D.L. n.82 del 7 marzo 2005. Codice Amministrazione Digitale – CAD) ma, ad oggi, solo un esiguo numero di professionisti ha utilizzato questi dati nell'ambito della pianificazione forestale e, se non si supportano gli enti pubblici per facilitarne l'uso, rischia di restare nella routine di lavoro di pochi. Raramente i tecnici di questi enti hanno avuto l'opportunità di apprendere o aggiornarsi sulle metodiche sviluppate in questo nuovo settore, per cui non hanno le competenze per sfruttare o valutare le potenzialità del dato liberamente offerto. È quindi opportuno, nell'ambito di questo lavoro, operare per la valorizzazione di tali fonti. Un altro aspetto che è utile rimarcare è la possibilità di svolgere l'intero processo di elaborazione tramite software libero a codice aperto, oltre che per la parte GIS anche per i calcoli statistici, dove si è utilizzato CRAN R (R Core Team, 2012).

D'altra parte invece, è sul fronte degli algoritmi di elaborazione digitale che si osserva uno sviluppo sempre più rapido, correlato anche al potenziale che esse presentano ai fini dello sfruttamento commerciale ed alla competizione che tale potenziale genera. In certi casi, in realtà, la pretesa efficacia di complesse soluzioni proposte non trova riscontro nell'applicazione, risultando queste non convenienti rispetto ad alternative più elementari e

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

stabili. È quindi opportuno, per la ricerca sviluppata, valutare ciascuna alternativa e cercare di trarre vantaggio dalle opportunità riscontrate.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

3. MATERIALI E METODI

3.1. AREA DI STUDIO

Le aree di studio utilizzate a titolo di esempio nel contesto della ricerca svolta sono localizzate in una pineta di impianto artificiale della fascia costiera della Sardegna centro-orientale, nella parte più settentrionale del territorio comunale di Siniscola (NU). Si tratta della pineta litoranea del Complesso Forestale Baronie Mare, gestito da EFS. Questo complesso si estende su una superficie di 4396 ha interessando il territorio comunale di Loculi, Irgoli, Siniscola, Orosei, Onifai e Galtelli. Le aree considerate ricadono nell'Unità Gestionale di Base Berchida (Fig. 1). L'area di questa Unità si estende longitudinalmente da nord a sud, seguendo la costa, per circa 970 ha.

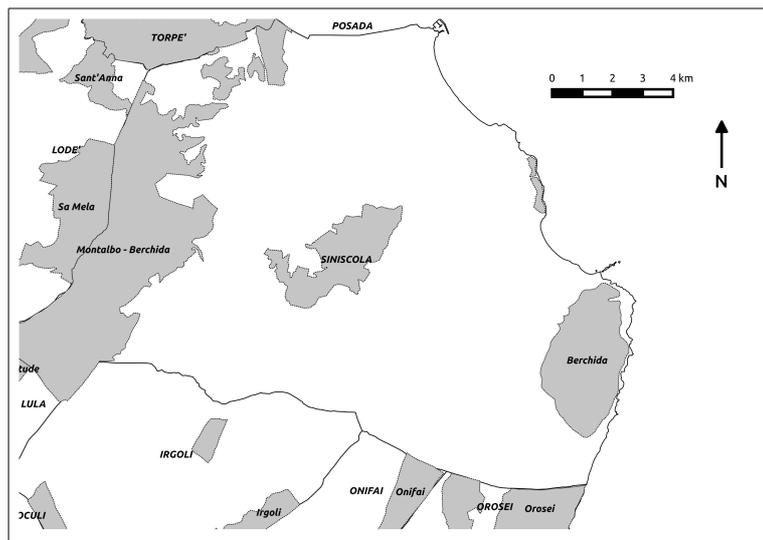


Fig 1: Localizzazione delle U.G.B. del complesso Baronie Mare circostanti Berchida nel comune di Siniscola (NU) e limitrofi.

La geopedologia dell'area è quella comune a gran parte del Nuorese, costituita da graniti fortemente acidi, duri e di scarsa alterabilità. I suoli sono la risultante dell'alterazione di queste rocce. Sono costituiti per oltre il 70% da sabbia, la restante frazione si divide in parti uguali tra limo ed argilla. La morfologia è tipica dei paesaggi sulle rocce granitiche,

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

con notevoli affioramenti rocciosi e versanti ripidi che, a causa dell'erosione, sono privi o quasi privi di suolo. Nelle parti più pianeggianti o comunque meno aspre, si trovano suoli più profondi, ma sempre pietrosi. L'erosione, quando localizzata ed incanalata, crea problemi alla viabilità, rendendo necessario frequenti interventi di ripristino delle piste forestali. L'azione erosiva è accentuata anche dai continui fattori di disturbo: incendi, pascolo e taglio di specie arboree ed arbustive non regolamentato, specie in passato (EFS, 2014). Questo porta alla rapida mineralizzazione ed alla scomparsa della parte più superficiale e ricca di sostanza organica del suolo, facilitando la diffusione del cisto.

All'interno dell'U.G.B. non si trovano corsi d'acqua permanenti. Il Rio Berchida e gli altri torrenti stagionali che nascono dai rilievi dell'entroterra, se non affluiscono, sfociano direttamente a mare.

L'andamento climatico è quello tipico costiero del mediterraneo, con estati calde e aride ed inverni miti. Le precipitazioni si concentrano nei mesi più freschi ed in primavera, con valori di 600-800 mm annui. Le temperature raramente scendono sotto lo zero perché mitigate dalla vicinanza del mare, con una escursione termica annua intorno ai 15° C.

L'andamento climatico descritto, classifica quest'area nella sottozona calda del Lauretum secondo la definizione del Pavari e l'attribuisce all'orizzonte delle boscaglie e delle macchie termoxerofile litoranee, secondo Arrigoni (1968). La serie descritta dall'Arrigoni è caratterizzata da estati calde con forte deficit idrico, ma mai temperature troppo elevate per via dell'effetto mitigatore del mare, periodo freddo quasi inesistente.

Nella parte più orientale dell'U.G.B., in una fascia che segue la linea di costa, gli interventi di rimboschimento per circa 500 ha furono finanziati dalla Cassa per il Mezzogiorno. La realizzazione fu affidata alla SARFOR S.p.A., che li completò nel 1986. Il rimboschimento di quest'area si era resa necessaria per tentarne il recupero, dopo che incendi e sovra-pascolamento avevano fortemente degradato sia il suolo sia la vegetazione residua, al tempo rappresentata dal cisteto. L'impianto fu realizzato mettendo a dimora conifere (*Pinus pinea* e *Pinus halepensis*) e latifoglie (*Quercus suber*), in rapporto di tre a uno e con sesto di tre metri per due, rispettivamente tra i filari e lungo i filari. Il lavoro svolto dalla SARFOR, oltre all'impianto, ha riguardato anche la realizzazione di recinzioni per contenere il pascolamento e la realizzazione di fasce parafuoco e di vasconi per la

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

difesa dagli incendi. La stessa SARFOR ha provveduto alle cure colturali giovanili dei soprassuoli fino al 2003, anno in cui la gestione è passata all'EFS. I nuovi gestori, da allora, hanno proceduto diradando 20-30 ettari all'anno. Ad oggi però, alcune parti non sono state ancora interessate dagli interventi.

A questi interventi occorre ora far seguire una mirata pianificazione per mettere l'intero sistema nelle migliori condizioni vegetative, assicurando la perpetuità dei soprassuoli ed ottimizzando la produzione legnosa.

Nella restante parte del cantiere, non interessata dal rimboschimento, si trovano terreni poveri con elevata rocciosità affiorante. Qui la vegetazione è costituita da specie della macchia mediterranea, principalmente olivastro, corbezzolo, fillirea, erica, cisto, citiso e altre. Da notare anche la sporadica presenza di ceppaie di leccio e sughera o la presenza di gariga e macchia bassa dove le condizioni del suolo e la topologia non consentono uno sviluppo vegetativo maggiore e più evoluto.

In sintesi, i lavori previsti nel cantiere di Berchida contemplan: rimboschimenti, previa lavorazione e sistemazione del terreno con la realizzazione di gradoni; interventi selvicolturali a favore di impianti misti ben affermati; quantificazione e studio delle potenzialità della componente sughera con censimento e demaschiatura degli individui; manutenzione delle chiudende, delle opere infrastrutturali e servizio per la lotta e prevenzione degli incendi.

3.2. FONTE E CARATTERISTICHE DEL DATI UTILIZZATI

I dati LiDAR e la cartografia utilizzati per questo lavoro sono resi disponibili dal servizio *webgis* del geoportale della Regione Sardegna. Il servizio mette a disposizione dati completi della scheda tecnica (metadato), con la descrizione dei contenuti e delle pre-elaborazioni che il dato grezzo ha subito (RAS, 2011a e 2011b).

In particolare i rilievi LiDAR utilizzati sono stati acquisiti tra l'aprile del 2008 ed il gennaio del 2009 attraverso il sensore Optech Gemini ALTM della Optech Inc. (www.geo-matching.com) con un'accuratezza posizionale di 0,25 m. Non si hanno invece informazioni sulla densità di punti per unità di superficie, sul tipo di piattaforma aerea

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

utilizzata, sulla velocità di crociera durante l'acquisizione, angolo di acquisizione, quota e footprint. Il servizio webgis mette a disposizione immagini derivate da elaborazioni dei rilievi ALS. Sono disponibili diverse elaborazioni: oltre al “*Digital Terrain Model*” (DTM), che si riferisce alla quota del terreno nudo, sono presenti due elaborazioni “*Digital Surface Model*” (DSM), una è riferita alla quota di copertura delle costruzioni, l'altra è riferita alla sola vegetazione (DSM_VEG). Tutte le immagini sono caratterizzate da una risoluzione spaziale orizzontale di 1 m. La risoluzione verticale non è specificata, le quote sono espresse in metri con tre decimali.

I layer DTM e DSM disponibili nel geoportale sono organizzati in formato GRID (*Uniform Gridded Data*) in file di testo ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*).

```
NCOLS 1446
NROWS 1151
CELLSIZE 1.000
XLLCENTER 567665.000
YLLCENTER 4485655.000
NODATA_VALUE -9999.000
13.123 12.984 12.914 12.814 etc...
```

Box 1: Esempio di struttura tipo di un dataset LiDAR in formato ASCII.

In questo formato le prime righe del file rappresentano delle intestazioni: dimensioni dell'immagine (NCOLS e NROWS), le dimensioni delle celle (CELLSIZE), longitudine e latitudine (riferite al sistema UTM WGS84 32N) del centro della cella in alto a sinistra, angolo

nord-ovest (XLLCENTER e YLLCENTER). L'ultima riga di intestazione specifica il codice corrispondente a “dato mancante”. Seguono le righe con i dati relativi alle celle, ordinati per righe, che in questo caso rappresentano la stima della quota derivata dalle diverse elaborazioni del rilievo ALS (box 1).

Il webgis della RAS consente la visualizzazione (ma non il download) delle ortofoto prodotte sulla base di un volo effettuato nel 2008. Le immagini hanno risoluzione di 20 cm e sono corredate da una scheda che le descrive in dettaglio (RAS, 2011c).

3.2.1. Scaricamento del dato ALS

Questi dati sono archiviati nel sito della Regione in formato ZIP. Per scaricare una immagine è necessario scoprire l'indirizzo URL che lo identifica.

Gli indirizzi sono scritti come attributo associato alla mappa vettoriale che rappresenta i limiti di ciascuna immagine e costituisce il catalogo grafico dell'archivio.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Le immagini sono disponibili solo per la fascia costiera, ad esclusione dell'estremo nord-orientale dell'isola. Ogni file copre un superficie pari ad 1/25 di sezione di CTR (microsezioni). Di conseguenza i file presenti sono molto numerosi. Anche per analizzare un'area relativamente ridotta (circa 500 ha) sono necessarie dieci immagini.

Individuare e scaricare uno alla volta ciascuno di questi file avrebbe richiesto una operazione tediosa. Per rendere il lavoro di utilità più generale si è cercato di codificare la procedura e di renderla il più possibile automatica (fig. 2).

Il codice sviluppato lavora all'interno dell'ambiente a riga di comando di GRASS (GRASS Development Team, 2012; Neteler et al., 2012).

In realtà alcuni passaggi non sono efficientemente eseguibili dalla linea di comando. In questi casi è conveniente ricorrere all'interfaccia grafica. Nel seguito si riporta un esempio con il dettaglio del codice utilizzato ed una rappresentazione semplificata dell'intera procedura (in queste figure la parte in grassetto rappresenta il codice, mentre la scrittura senza grassetto rappresenta le parti variabili da adattare al caso specifico).

Si è scaricato come primo passo la griglia vettoriale integrale di tutte le microsezioni della costa dall'indirizzo del geoserver (box 2). La tabella attributi di questo layer ha una riga per ogni microsezione e diverse colonne, tra cui un campo in cui è riportato l'indirizzo a cui scaricare il file ALS che copre la geometria selezionata. A questa si è sovrapposto uno shapefile dell'area di studio per selezionare, tramite l'operazione logica di intersezione, solo i file interessati. Lo strato informativo risultante contiene i riferimenti delle sole microsezioni di interesse con relativo campo URL; in seguito si è proceduto con il loro scaricamento.

```
v.in.wfs --overwrite --verbose  
wfs="http://webgis.regione.sardegna.it/geoserver/ows?  
SERVICE=WFS&VERSION=1.0.0&REQUEST=GetFeature&TYPENAME=dbu:DSM_VEGETAZIONE  
_SER&SRSNAME=EPSG:32632" output=DSM_VEGETAZIONE_SER
```

Box 2: Esempio di comando invocato in GRASS per lo scaricamento del layer vettoriale della copertura ALS. Il modulo "v.in.wfs" permette di scaricare un file vettoriale da un servizio WFS.

Il procedimento appena illustrato è stato eseguito sia per il DSM della vegetazione sia per il DTM.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

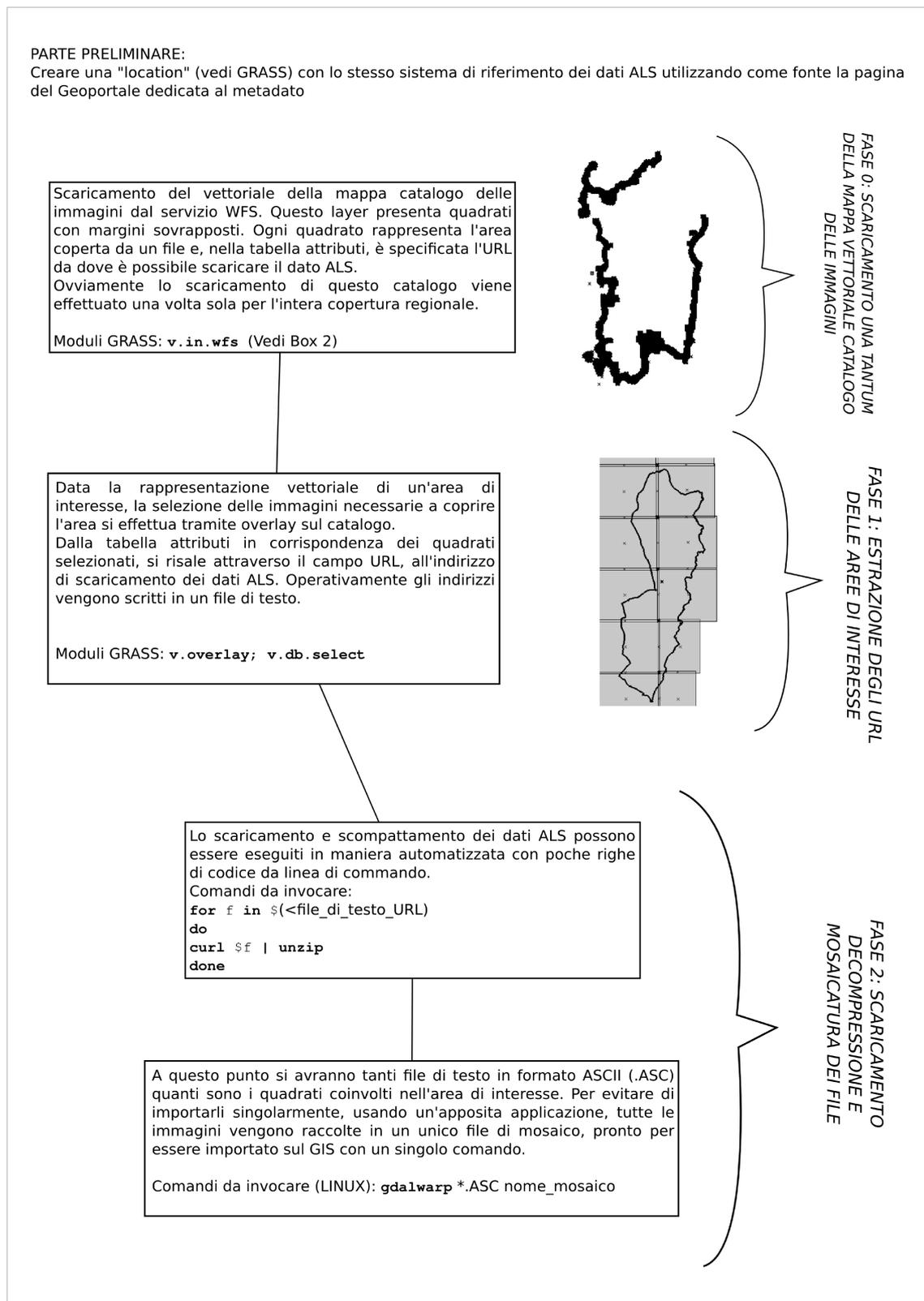


Fig 2: Dettaglio dei vari passaggi necessari per l'acquisizione dei dati LiDAR dal geoportale.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

3.3. RILIEVI A TERRA

La campagna di rilievo a terra è stata svolta principalmente in due momenti: una nel settembre del 2013 e l'altra nel dicembre dello stesso anno.

La fascia interessata dal rimboschimento dell'U.G.B. Berchida si presenta suddivisa in sezioni delimitate da strade e piste. L'orientamento dei filari ed il trattamento selvicolturale è costante nelle sezioni e può essere differenziato tra sezioni contigue.

Intelescope, a partire dalle ortofoto ad alta risoluzione, utilizzando l'algoritmo iRow, ha cercato di produrre una mappa vettoriale composta da linee intese come rappresentazione dei filari e della loro lunghezza. In realtà, per alcune sezioni, il lavoro è risultato insoddisfacente, la ditta non ha quindi fornito la vettorializzazione dei filari per tutta la fascia. A causa delle limitazioni operative della ricerca sviluppata, il rilievo è stato concentrato in sole due sezioni (fig. 3), se pure di dimensioni significative.

La prima campagna di rilievo è stata condotta utilizzando aree di saggio quadrangolari, distribuite nel popolamento come di consuetudine con criterio soggettivo, senza riferimento ad uno schema probabilistico. Le dimensioni delle aree sono state definite in modo da includere nel rilievo sei filari e dieci posizioni lungo il filare. Avendo un numero pari di file la rappresentazione del popolamento è corretta anche nei casi in cui si alternano file con caratteristiche diverse: solo conifere e conifere con latifoglie o file diradate e non diradate. In queste aree di saggio, che chiameremmo anche “aree o plot tradizionali”, sono

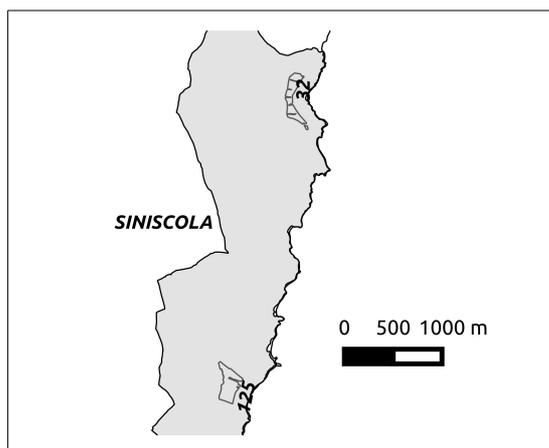


Fig 3: Localizzazione dei due stand di riferimento all'interno del cantiere di Berchida.

stati misurati i diametri a petto d'uomo, la specie e lo stato vegetativo di tutti i fusti, mentre l'altezza è stata rilevata solo su un sotto-campione.

La seconda fase del rilievo è stata organizzata in funzione della collaborazione con Intelescope. In questo quadro la popolazione oggetto di indagine è rappresentata dall'insieme dei

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

filari. Sono note a priori la numerosità e la lunghezza complessiva dei filari della sezione. L'estrazione dei campioni è avvenuta con criterio sistematico, adottando un passo teso a produrre una frazione di campionamento intorno al 3%. Per ottenere una rappresentazione corretta anche in presenza di file con caratteristiche alternate, in realtà le unità campionarie sono state definite accoppiando file contigue. Operando in questo modo si ottengono delle coppie campione che ovviano alle distorsioni potenzialmente derivabili dal rilevare ad esempio un maggior numero di file diradate rispetto a quelle non diradate. Sulle coppie di file, in funzione della loro lunghezza, si è operato adottando un secondo livello di campionamento sistematico. Per quelle relativamente più corte si è proceduto alla misura per intero. Per quelle molto più lunghe di dieci posizioni, si sono rilevati due o tre spezzoni: uno iniziale, uno centrale ed uno finale. Gli spezzoni constano di dieci posizioni rilevate su ognuno dei due filari. Identificata la coppia campione si è proceduto alla misura. A partire dal bordo chioma del primo albero, con lo zero proprio sotto alla perpendicolare della proiezione della chioma esterna, si è stesa la rotella metrica. Quindi per ogni albero si sono misurati: la distanza tra l'inizio del filare (inteso come descritto) e l'asse del fusto, il diametro a 1,3 m, la specie, l'altezza totale, indicazioni sullo stato fitosanitario e di dominanza.

Una volta caricati i dati, le singole posizioni sono state mappate sull'ortofoto. Si è proceduto digitalizzando a mano su QGIS (QGIS Development Team, 2012) i punti dei bordi chioma dei primi alberi (assunti come inizio filare) ed acquisendone le coordinate. A partire da questi, per le posizioni successive, si sono sommate per ogni punto le differenze di distanza dallo zero tra due fusti consecutivi, ottenendo due serie di punti paralleli (fig. 4). Infine, imponendo al disegno una opportuna rotazione, i punti sono stati allineati all'andamento delle file, ottenendo una discreta aderenza con le probabili posizioni del postime all'impianto.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistematico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.



Fig 4: Tratto di filare con le posizioni degli alberi digitalizzati.

3.4. METODI DI STIMA DELL'ALTEZZA DELLA VEGETAZIONE (CHM)

La differenza di quota tra il suolo e una superficie ideale appoggiata alle sommità delle chiome, stima l'altezza della vegetazione ed è frequentemente indicata come “modello digitale delle chiome” o *Canopy Height Model* (CHM). Rappresentando DSM_VEG l'andamento della quota della vegetazione e il DTM l'andamento della quota a livello del suolo, la differenza $DSM - DTM$ fornisce appunto l'altezza della copertura arborea (ed arbustiva). Il calcolo del CHM è uno strato informativo di partenza per successive elaborazioni.

3.5. METODI DI STIMA DELLA DENSITÀ DEI POPOLAMENTI

3.5.1. Valori di densità tramite rilievi per aree di saggio consuetudinarie (plot o UC areali)

Nei rilievi per aree la densità si calcola rapportando il numero di fusti (numero di sezioni ad 1.3 m che si possono rilevare) alla superficie del plot determinata per via geometrica. In popolamenti caratterizzati da una distribuzione orizzontale assimilabile a quella *poissoniana* questo approccio risulta non distorto. Quando la distribuzione orizzontale presenta accentuate regolarità si rischiano distorsioni. In particolare negli impianti artificiali su filari, l'ampiezza dell'area in direzione perpendicolare a tali strutture

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

lineari è tanto più critica quanto più si discosta da un valore multiplo intero della distanza tra i filari stessi (Corona, 2000 [fig. 5.4]).

In impianti a sesto regolare, la superficie del plot può essere convenientemente determinata a partire dalla misura delle interdistanze tra i fusti. Individuato un valore medio rappresentativo dell'interdistanza tra le posizioni nell'impianto originario, si stima lo spazio a disposizione per ciascuna posizione e si determina il valore dell'area moltiplicando questo per il numero (presunto) di posizioni originarie.

3.5.2. Valori di densità dai rilievi lineari (UC lineari)

Le procedure di *campionamento per linee* (o *per filari campione*) portano naturalmente anche alla valutazione della densità del popolamento (numero di fusti per unità di superficie). Avendo scomposto (possibilmente per calcolo, elaborazione di immagini) il popolamento in "filari", si determina la lunghezza complessiva di tali elementi lineari. Esaminando in dettaglio un campione di filari, o di porzioni di filare, si valuta la densità lineare media (numero di fusti per unità di lunghezza del filare) e si ricava, applicando lo schema campionario della stima per rapporto tra medie (Corona, 2000), la numerosità del popolamento. Nota la superficie occupata, si determina la densità. Kangas e Maltamo (2006) suggeriscono di utilizzare la stima del rapporto tra medie quando

$corr(x, y) > \frac{1}{2} \frac{CV_x}{CV_y}$, in questo caso si ha che $0,97 > 0,40$ per cui questo metodo risulta

adatto. Come accennato il valore totale viene stimato ricorrendo al rapporto tra medie.

$$X_R = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n l_i} L = R * L \quad \text{dove} \quad \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{è la sommatoria dei valori della variabile } dummy \quad 0-1$$

che esprime la presenza-assenza dei fusti nell'i-esima fila campione, $\sum_{i=1}^n l_i$ è la sommatoria delle lunghezze delle file campione e L è la lunghezza totale dei filari

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

nell'area da inventariare. La varianza del totale può essere stimata dalla seguente espressione.

$S_{x_r}^2 = \frac{L}{\bar{l}} \left(\frac{L}{\bar{l}} - n \right) \frac{(s_x^2 - 2R s_{lx} + R^2 s_l^2)}{n}$ dove \bar{l} è il valor medio delle lunghezze delle linee campione e s_{lx} è la covarianza tra il numero di fusti x e la lunghezza della linea campione

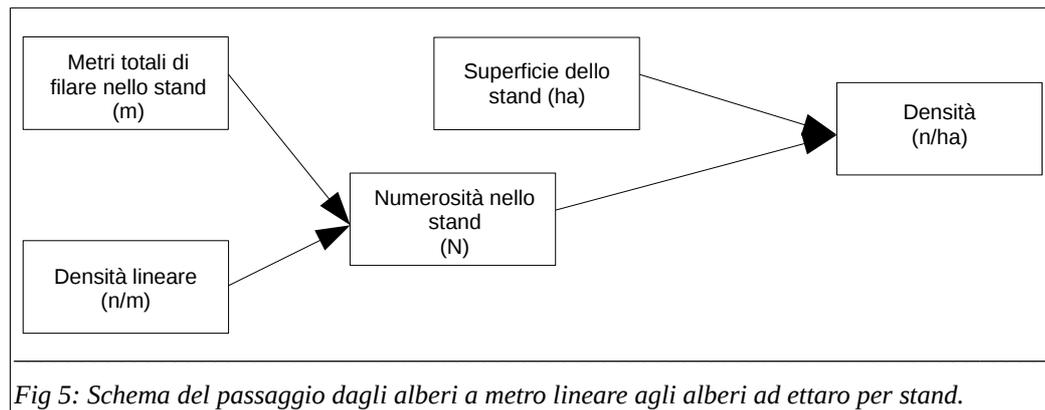
l e si calcola come $s_{lx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(l_i - \bar{l})}{n-1}$.

Questa fase ha visto quindi l'utilizzo dei dati forniti in base ad un accordo di ricerca da una ditta commerciale privata¹, ossia delle linee digitali dei filari. Schematicamente il procedimento è illustrato in fig. 5.

1 *Intelescope*. Il dato è stato fornito nel quadro di un accordo per la valutazione sperimentale dell'utilità dell'algoritmo di row-detection: *iRow*.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale*.

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.



3.5.3. Elaborazione sulla densità a partire dai dati ALS

La stima della densità di un popolamento attraverso i dati ALS implica essenzialmente l'utilizzo di procedure che riescono a individuare e distinguere le singole piante. Poiché questi dati si basano sui valori di altezza registrati dalla scansione, l'elaborazione si appoggia alla capacità di identificare gli apici dei singoli alberi. Si parte dall'analisi della morfologia del CHM e dall'individuazione di punti di massimo e di minimo relativi, di zone concave e convesse, similmente alle analisi idrogeologiche per la definizione dei bacini idrografici. La maggior parte di tali tecniche sono state sviluppate in questo settore e poi estese ad altri campi come quello forestale. Una tra le più utilizzate è quella che utilizza la funzione *Top Hat* (Rodriguez et al., 2002, Schmidt e Hewitt, 2004, Barilotti et al., 2006), utilizzata in campo idrogeologico nell'identificazione di valli e sommità su raster in scala di grigio. Qui i risultati di questa funzione vengono messi a confronto con un algoritmo a finestra mobile realizzato per il caso e di più intuitiva applicazione.

L'algoritmo *Top Hat* lavora su alcune trasformate e funzioni, sinteticamente descritte. Si definisce una matrice di osservazioni di ampiezza λ di $n \times n$ pixel su cui lavorano le funzioni *Opening* e *Closing* (equazioni 8 e 9).

$$\text{Opening: } O_{\lambda} = \max_{\lambda}(\min_{\lambda}(CHM)) \quad (8)$$

$$\text{Closing: } C_{\lambda} = \min_{\lambda}(\max_{\lambda}(CHM)) \quad (9)$$

Queste trasformate identificano le soglie della classificazione morfologica, ossia i punti di massimo delle zone vallive e i punti di minimo delle sommità (fig. 6). In questo caso solo l'opening è di interesse perché consente, tramite la differenza $CHM - O_\lambda$, di ottenere i picchi del raster analizzato.

L'algoritmo pensato per questo studio è più diretto. Si basa sull'analisi sequenziale dei pixel all'interno di una finestra mobile di ampiezza e configurazione variabili (fig. 7).

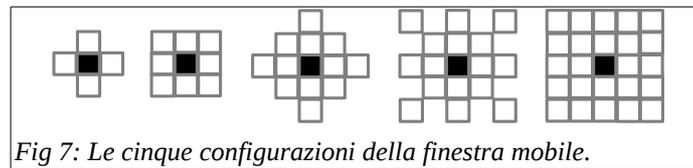


Fig 7: Le cinque configurazioni della finestra mobile.

La finestra estrae dal CHM tutti i picchi locali, i pixel circondati da celle a quota inferiore. Essendo interessati ad individuare picchi corrispondenti ad apici di alberi, il procedimento include un successivo filtraggio in funzione della quota del picco (tabella 1).

Tabella 1: Le discriminazioni di altezza considerate.

Discriminazione altezza	Descrizione
Nessuna	Tutti i vertici rilevati dall'algoritmo
$H > 2$	Solo i vertici (pixel) con valori di altezza maggiore di 2 m
$H > 3$	Solo i vertici con valori di altezza maggiore di 3 m
$H > 4$	Solo i vertici con valori di altezza maggiore di 4 m

In dettaglio l'algoritmo analizza i valori di quota circostanti ogni singolo pixel del CHM e ricadenti nella finestra considerata. L'analisi viene svolta da una funzione scritta in

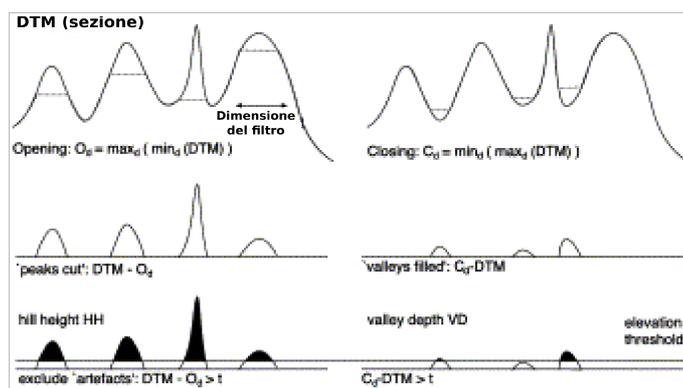


Fig 6: Classificazione di valli e di picchi secondo l'approccio Top Hat (da Schmidt e Hewitt, 2004).

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

GRASS. Per semplicità si riportano solo i passaggi essenziali del codice relativo all'analisi utilizzando la finestra di configurazione 1 riportata nell'equazione (10).

$$\begin{aligned}
 qm &= \max(CHM_{i,j}, CHM_{i-1,j}, CHM_{i+1,j}, CHM_{i,j-1}, CHM_{i,j+1}) \\
 APC_{i,j} &= \text{if}(CHM_{i,j} = qm, CHM_{i,j}, NULL)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

La matrice APC conterrà molti valori NULL oltre ai potenziali apici (vertici) trovati dalla funzione (10). I valori $CHM_{i,j}$ esprimono le altezze relative a al pixel dell'i-esima riga e j-esima colonna.

Come accennato a valle del filtraggio i picchi individuati sono ulteriormente selezionati in base all'altezza, con lo scopo di eliminare il più possibile elementi non arborei che difficilmente raggiungono certe altezze, poiché in questo caso la sola componente di interesse è rappresentata dai pini di 25-30 anni.

Incrociando le cinque configurazioni della finestra mobile con i quattro criteri di selezione per altezza, si ottengono venti stime della distribuzione nello spazio degli alberi. Ad ogni distribuzione corrisponde potenzialmente una diversa densità in termini di numero di fusti per unità di superficie.

Con il rilievo in bosco la densità effettiva è determinabile per ogni tratto (o porzione) di filare (o spezzone). Si è proceduto alla ricerca della combinazione configurazione-selezione ottimale, in riferimento al metodo di stima per regressione (Corona, 2000), al fine di individuare il procedimento meno influenzato dal livello di densità effettiva.

3.6. METODI DI STIMA DELL'AREA BASIMETRICA PER PLOT TRADIZIONALI E UC LINEARI

Si è proceduto alla stima dell'area basimetrica (g) confrontando rilievi per aree (plot tradizionali) e per filari. Non si è proceduto alla stima in relazione ai procedimenti legati ai dati telerilevati per le ragioni di seguito evidenziate.

La stima dell'area basimetrica nei plot tradizionali deriva dalla somma delle aree basimetriche dei singoli fusti rilevati. Il valore ad ettaro si ottiene moltiplicando per il rapporto $S_{AdS}/10000$, con S_{AdS} superficie dell'area di saggio in m^2 .

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Nei rilievi lineari l'area basimetrica è stata stimata con il metodo del rapporto similmente al procedimento utilizzato per la stima della densità. In questo caso la (1)

$$\text{diventa } X_R = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\sum_{i=1}^n l_i} L = R * L, \text{ dove } G_i \text{ è l'area basimetrica complessiva dell'i-esima fila}$$

campione. La (2) e la (3) risultano rispettivamente pari a

$$S_{X_R}^2 = \frac{L}{\bar{l}} \left(\frac{L}{\bar{l}} - n \right) \frac{(s_x^2 - 2 R s_{lg} + R^2 s_l^2)}{n} \text{ e } s_{lg} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(l_i - \bar{l})}{n-1} . \text{ Dove } \bar{l} \text{ è sempre il valor}$$

medio delle lunghezze delle linee campione e s_{lg} è la covarianza tra la somma delle aree basimetriche g e la lunghezza della linea campione l .

La disponibilità di dati LiDAR nell'ambito di rilievi forestali si sta sempre più affermando. Il consolidamento di un simile sviluppo potrebbe radicalmente modificare i metodi di valutazione dendrometrici spostando il fulcro dei rilievi dal piano del “petto d'uomo” alla direzione verticale. In questo caso l'area basimetrica potrebbe non rappresentare più la chiave per la valutazione della densità massale.

La stima dell'area basimetrica a partire da dati di telerilevamento nadirale può fare riferimento a due procedimenti distinti: quello che sfrutta la correlazione tra ampiezza della chioma e area basimetrica e quello che sfrutta la correlazione tra altezza totale e area basimetrica. In letteratura si trovano alcuni casi in cui è stato possibile stimare in maniera sufficientemente attendibile l'area basimetrica a partire dai dati LiDAR, ma i dati in questione o avevano molta più risoluzione di quelli disponibili per questo studio (Chen, 2007; Watt, 2013). Nel contesto della ricerca svolta, la risoluzione spaziale del dato LiDAR disponibile non ha consentito di valutare l'ampiezza delle chiome.

Per quanto riguarda la correlazione con l'altezza totale, come di norma succede nei popolamenti coetanei, specie in quelli di conifere, anche nel caso in esame la curva ipsometrica risulta essere piuttosto piatta (la Marca, 2004). Di conseguenza la variabilità

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

diametrica non risulta efficacemente rappresentata tramite la variabilità delle altezze. Nei rilievi a terra i coefficienti di correlazione con il diametro o con l'area basimetrica risultano molto limitati. La correlazione tra altezza e diametro per singolo fusto è pari a 0,59 mentre quella tra altezza media e area basimetrica è pari a 0,45.

3.7. METODI DI STIMA DELL'ALTEZZA MEDIA

La stima dell'altezza media a partire dalla nuvola di punti generata dalla scansione ALS fornisce generalmente buoni risultati. Gli studi condotti da Ritchie et al. (1993) mostrano una forte correlazione tra i primi echi di ritorno del laser e l'altezza media in popolamenti di pino. Un ulteriore miglioramento nella stima dell'altezza si ritrova invece nel lavoro di Magnussen e Boudewyn (1998), dove si mostra che non c'è significativa differenza tra l'altezza misurata a terra e quella derivante dall'utilizzo del 10% delle altezze ALS più alte (percentile 90-99). Questa osservazione è confermata anche da Næsset e Gobbaen (2008) che hanno utilizzato il percentile 95 perché più stabile dei valori massimi di altezza. Questi risultati si ottengono lavorando sulla nuvola di punti. Il dato ALS messo pubblicamente a disposizione dalla RAS non contiene il dettaglio relativo alla nuvola originaria e in realtà, non specifica la procedura utilizzata per elaborare il DSM.

Date le venti combinazioni di “configurazione della finestra” e “soglia di altezza” provate, per ogni tratto di filare si ottengono venti mappature della stima delle altezze totali. Si ricorda che il dato a disposizione è costituito da valori di quota concettualmente rappresentativi di una media riferita ad una superficie 1 m², con un inevitabile effetto di livellamento.

Per ogni tratto di filare rilevato si è calcolato il valore di altezza tramite la media aritmetica dei valori dei pixel ricadenti nel plot studiato e derivanti dalle venti combinazioni di filtraggio considerate. Per completezza si è effettuato lo stesso calcolo (stima per differenza) anche utilizzando l'intero CHM. I dati così ottenuti sono stati messi in relazione con il valore di altezza media rilevata in campo. La selezione del filtro con il risultato migliore è stata fatta tramite analisi di regressione lineare. È consuetudine in dendrometria considerare come valore di riferimento per questo parametro, il valore di

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

altezza ottenuto per interpolazione della curva ipsometrica in corrispondenza del diametro di area basimetrica media (d_g). Il valore ottenibile invece dalla media aritmetica delle altezze, poiché calcolato come per i dati LiDAR, sembra più appropriato. Per questo si sono confrontati i risultati ottenuti con i due procedimenti diversi. Poiché la differenza tra le due è minima, scarto medio di $0,11 \text{ m} \pm 0,02 \text{ m}$, si è scelto di utilizzare la media aritmetica anche per le altezze rilevate a terra.

3.8. METODI DI STIMA DEL VOLUME

La stima del volume legnoso assunto come riferimento, è stata ottenuta elaborando i dati ipsodiametrici rilevati in bosco. Il volume di ogni fusto misurato è stato calcolato con le tavole a doppia entrata sviluppate per il secondo inventario forestale nazionale INFC-2005 (Gasparini e Tabacchi, 2011; Tabacchi et al. 2011). Per il calcolo dei singoli volumi, eseguito sul software statistico R, ci si è avvalsi del pacchetto ForIT in cui Puletti et al. (2014) hanno implementato e formalizzato su questa piattaforma software le suddette equazioni.

Uno dei parametri più utili e frequentemente stimati tramite i dati LiDAR è quello della provvigione. Utilizzando i dati ALS si ottiene mettendo in relazione volumi misurati a terra e CHM.

La stima del volume è stata effettuata confrontando diversi metodi: i) seguendo il protocollo dei rilievi tramite UC areali, ii) implementando la stima per rapporto sui rilievi per filari (variabile ausiliaria lunghezza filari), infine, sfruttando i dati ALS, iii) sempre utilizzando la stima per rapporto (variabile ausiliaria CHM), iv) seguendo il metodo proposto da Corona e Fattorini (2008) e v) tramite la stima per regressione lineare semplice.

i) Come ricordato, per queste stime nella determinazione della superficie delle UC si utilizza la distanza rilevata in bosco tra posizioni estreme nell'area. Il valore rilevato sull'area di saggio è stato esteso ad ettaro ed al totale, in proporzione alla sua superficie.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

ii) Il metodo di stima adottato in relazione ai rilievi su filari (UC lineari) è quello secondo il rapporto tra medie (Corona, 2000) e segue lo stesso schema seguito nel calcolo dell'area basimetrica, dove la variabile ausiliaria è rappresentata dalla lunghezza dei filari.

iii) Utilizzando come variabile ancillare i dati ALS (rappresentati dalle semplici sommatorie delle altezze), viene riproposto il metodo di stima secondo il rapporto tra medie. In questo caso e nel precedente la varianza è stimata utilizzando l'equazione (2).

iv) Tra i metodi descritti più recentemente si è valutato quello suggerito da Corona e Fattorini (2008). Questo lavoro presenta un adattamento del metodo del rapporto fra medie (Corona, 2000) funzionale alle esigenze dell'assestamento. Il volume totale (T_A) relativo ad una determinata area A , viene stimato dalla (11).

$$\hat{T}_A = \hat{k} T_{xA} \quad (11)$$

Dove $T_{xA} = \sum_{j=1}^N h_j$; h_j = valore di altezza del j-esimo pixel del CHM; N = numero totale

di pixel dell'area A ; $\hat{k} = \bar{T} / \bar{P}$; $\bar{T} = (1/n) \sum_{i=1}^n T_i$, dove T_i è il volume dell'i-esimo plot ed

n il numero di plot; $\bar{P} = (1/n) \sum_{i=1}^n P_i$, dove P_i è la somma dei valori delle altezze dei pixel del CHM appartenenti all'i-esimo plot.

L'errore standard $\hat{e}(\hat{T}_A)$ di \hat{T}_A viene calcolato con l'equazione (12).

$$\hat{e}(\hat{T}_A) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (cT_i - c\hat{k}P_i)^2} \quad (12)$$

In cui $c = A/a$, con a = alla dimensione dei plot (nella stessa unità di misura di A). Gli intervalli di confidenza di tale stima sono ottenuti con la (13).

$$\hat{T}_A \pm z_{1-\alpha/2} \hat{e}(\hat{T}_A) \quad (13)$$

Corona e Fattorini consigliano questo metodo in quanto nei casi esaminati da loro è stata trovata una relazione lineare passante per l'origine a carattere eteroschedastico.

Nel caso in esame non si è riscontrata l'eteroschedasticità che richiede l'applicazione del metodo di stima per rapporto. La verifica è stata effettuata graficamente osservando la distribuzione dei residui (fig. 19) e la distribuzione cumulata con il grafico Q-Q (fig 20).

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

v) Si è di conseguenza proceduto alla stima del volume anche secondo i metodi della regressione (Corona, 2000 e 2008) utilizzando la (6) e la (7) rispettivamente per la stima del totale e della sua varianza. Con tale metodo è possibile seguire due strade. Si possono valorizzare i risultati del filtro che ha conseguito i risultati migliori nella stima del numero di piante ad ettaro o utilizzare, come nel rapporto tra medie, la somma di tutti i pixel del CHM entro il plot. Nel primo caso per ogni tratto rilevato, è stata fatta la somma dei volumi reali dei singoli alberi e la somma dei valori di altezza dei pixel (potenziali apici), individuati dal filtro.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1. ANALISI DELLA QUANTIFICAZIONE DEI FILARI PRODOTTI CON IROW DA INTELESCOPE

Come accennato nell'illustrare i dati a disposizione, la ricerca relativa al campionamento su filari è stata potenziata dal supporto derivato dalla collaborazione con la ditta Intelescope. Il rapporto con questa ditta è teso a valutare il vantaggio conseguibile utilizzando il loro algoritmo proprietario iRow. Usando questo algoritmo la ditta ha prodotto una copertura vettoriale che, analizzando le ortofoto con risoluzione di 20 cm da noi fornite, rappresenta e stima la posizione e l'estensione dei filari dell'impianto di pini, separatamente per (quasi) ogni sezione.

L'analisi della sovrapposizione della copertura vettoriale ottenuta sulle immagini di partenza, permette di evidenziare in dettaglio le capacità e il modo di lavorare dell'algoritmo di *row-detection* di Intelescope. L'algoritmo si basa sui valori cromatici dell'ortofoto in entrata e quindi sulla ricerca dei pixel con tonalità tale da presentare maggiore probabilità di essere la parte alta della chioma.

Le tonalità con cui si presentano le diverse parti della chioma dipendono dall'esposizione alla radiazione solare. In generale la parte apicale risulta meglio esposta e quindi presenta tonalità più chiare (Gomarasca, 2009). Semplificando la struttura della chioma ad una calotta emisferica la figura 8 mostra come, quanto più la fonte di illuminazione si allontana dal nadir, tanto più laterale risulta la porzione di chioma meglio esposta. Il fenomeno fisico in questione è descritto dalla *funzione di distribuzione bidirezionale della riflettanza* o BRDF (*bidirectional reflectance distribution function*) in inglese (Campbell e Wynne, 2011). Nel caso pratico, in realtà, sono diversi i fattori che entrano in gioco nel processo fisico. Essi sono dipendenti non solo dagli angoli di illuminazione e di osservazione, ma sono anche strettamente associati alla superficie analizzata, come la forma, la dimensione e l'orientamento delle foglie.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

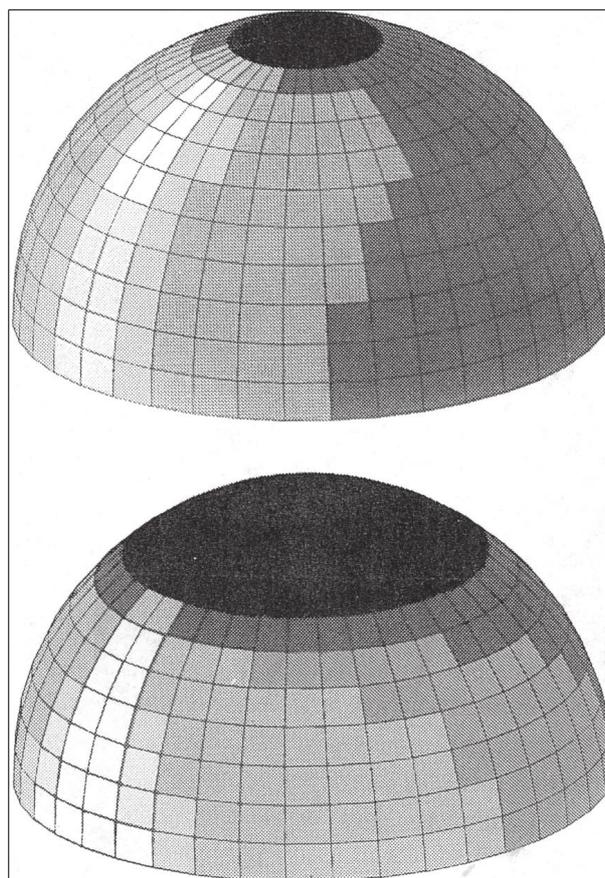


Fig 8: Funzione della distribuzione della riflettanza bi direzionale. Differenti intensità di radiazione osservata di due superfici. (Adattato da Campbell e Wynne, 2002).

Esaminando in sovrapposizione le linee create dall'algorithmo e le immagini di partenza, è possibile vedere dove il risultato del *row-detection* presenta delle imperfezioni.

Le figure 9 e 10 presentano i dettagli della sovrapposizione ad estremità contrapposte della sezione: il lato in ombra e il lato illuminato. Interpretando con accuratezza i singoli dettagli, è stata individuata con una linea rossa la delimitazione dei bordi chioma relativi agli alberi di testa dei filari. Questa linea rappresenta il riferimento concettuale comune per l'algorithmo e per i rilievi in bosco.

Nel lato in ombra spesso l'algorithmo crea dei prolungamenti del filare perché non riesce a cogliere con precisione il bordo della chioma. Questo infatti si confonde e si fonde cromaticamente con l'ombra della pianta stessa (fig. 10).

Nelle parti direttamente illuminate si hanno meno imperfezioni (fig. 9). In generale le linee si chiudono bene sul bordo chioma, solo in alcuni casi vanno oltre.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Complessivamente quindi la lunghezza dei filari individuati da iRow potrebbe risultare, seppure di poco, tendenzialmente sovrastimata.



Fig 10: Risultato dell'algoritmo di row-detection sui tratti finali opposti alla radiazione luminosa.



Fig 9: Risultato dell'algoritmo di row-detection sui tratti finali esposti verso la radiazione luminosa.

In realtà prima di avviare l'algoritmo di *row detection*, Intelescope ridefinisce i confini degli impianti stimando il bordo chioma dei pini ed escludendo quindi ogni spazio interno alla sezione privo di filare (figure 11 e 12). Complessivamente si osserva che la lunghezza dei filari così ottenuti rappresenta con ottima fedeltà la geometria degli impianti. In questi popolamenti la distanza tra i filari è di tre metri quindi, almeno in teoria, si dovrebbe avere circa 3334 metri di filare ad ettaro mentre le densità lineari stimate rispettivamente per gli stand 32 e 125 risultano giustamente inferiori, pari a 3327 e 3318 metri ad ettaro, poiché le tare interne alle singole sezioni sono correttamente computate.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.



Fig 11: Particolare del bordo degli stand (1).



Fig 12: Particolare del bordo degli stand (2).

4.2. ANALISI DELLA DENSITÀ DEI POPOLAMENTI

4.2.1. Stima della densità dai rilievi basati sulle aree di saggio e sui rilievi lineari

La ricerca ha preso in considerazione diverse proposte innovative relative a metodi di rilievo per il monitoraggio in campo forestale: oltre al tradizionale approccio per aree, sono stati testati approcci per linee e approcci che sfruttano come informazione di supporto rilievi ALS.

Come accennato, nella stima tramite aree, la superficie a cui i rilievi vengono riferiti ha un impatto rilevante, particolarmente quando la distribuzione dei soggetti nello spazio non è di tipo poissoniano. Di conseguenza, nell'analisi di popolamenti forestali di origine artificiale a struttura spaziale regolare, spesso si determina per calcolo la superficie di riferimento, moltiplicando il numero di posizioni dell'impianto originario incluse nel rilievo per la superficie unitaria assegnata ad ogni posizione.

É prassi comune approssimare la superficie unitaria utilizzando per il calcolo i valori di progetto. Nel caso il progetto prevedeva un'area unitaria pari a 6 m², 3 m tra le file e 2 m lungo la fila; questo è il valore impiegato nelle stime condotte tramite le aree di saggio tradizionali. Data la ridotta numerosità e la natura non probabilistica, l'affidabilità calcolata, quando è espressa, è puramente indicativa.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Per produrre stime più direttamente confrontabili tra il metodo per aree ed il metodo per filari, si è proceduto alla valutazione della densità con approccio per aree, sfruttando alcuni dei rilievi effettuati in funzione del secondo approccio. Le misure effettuate negli spezzoni di filare rilevati, consentono di determinare un valore che in generale potrebbe essere facilmente e rapidamente misurato con i rilievi in bosco, la distanza tra la prima e l'ultima delle n posizioni considerate su ciascun filare. Dividendo la lunghezza per il numero di spazi ($n-1$) e mediando tra i filari inclusi, si stima una interdistanza media tra le posizioni. Infine, moltiplicando per la distanza tra i filari, si determina l'area unitaria. I valori di distanza media sono risultati leggermente superiori a due metri, precisamente (media \pm errore standard) $2,26 \pm 0,14$ m e $2,74 \pm 0,89$ m, rispettivamente per gli stand 32 e 125. Le stime ottenute tramite questa procedura hanno presentato discreta affidabilità (tabella 2).

Tabella 2: Stima della densità nelle UC_{areali}.

<i>Stand</i>	<i>Numero spezzoni</i>	<i>Numero medio posizioni</i>	<i>Interdistanza media</i>	<i>Superficie</i>	<i>Numero medio fusti</i>	<i>N/ha</i>	<i>ec_{ha}</i>
32	8	38,9	2,18	0,0254	34	1331	123
125	12	17,9	2,57	0,0138	13	931	100

Procedendo infine nell'approccio per linee (o filari) secondo i metodi illustrati nella sezione apposita, si è fatto riferimento alla stima per rapporto tra medie valutate a livello di singolo filare. In realtà, come specificato nella descrizione dei rilievi effettuati, per esigenza di “correttezza” la popolazione è costituita da coppie di filari. Inoltre tali elementi sono stati valutati, a loro volta, adottando un campionamento sistematico: i rilievi sono stati effettuati in genere su tratti (o porzioni) di coppie di filari (spezzoni). In tabella 3 sono riportati i risultati della elaborazione dei rilievi di dettaglio a livello di unità campionaria (UC), coppia di filari selezionata, e nella tabella 4 la stima finale a livello di stand.

Tabella 3: Sintesi dei rilievi a livello di coppie di filari. Calcolo per $UC_{lineari}$.

Stand	UC (coppia)	Lunghezza UC	Lunghezza rilievo	Numero di tratti	Numero pini per metro	Dev. st. (pini/m)	N_{Tot}
32	1	216,5	125,1	3	0,416	$8,83 \cdot 10^{-2}$	90
32	2	142	125,7	2	0,382	$3,62 \cdot 10^{-2}$	54
32	3	161,4	159,3	1	0,402	-	65
32	4	138,8	136,9	1	0,431	-	60
32	5	76*	108,1	1	0,444	-	34
125	1	306,8	148,6	3	0,242	$1,01 \cdot 10^{-1}$	74
125	2	302,4	123,6	3	0,316	$6,04 \cdot 10^{-2}$	95
125	3	367	117,6	3	0,357	$6,69 \cdot 10^{-2}$	131
125	4	217,2	112,4	3	0,329	$5,90 \cdot 10^{-2}$	71

Tabella 4: Stima della densità basata sui filari (metodo del rapporto tra medie).

stand	Superficie stand (ha)	Lunghezza complessiva filari (m)	Lung. media $UC_{lineari}$ (m)	N. medio pini nelle $UC_{lineari}$	N/ha	e_{Ch_a}
32	4,69	15613	146,98	303	1370	101
125	5,62	18650	298,35	400	1112	131

4.2.2. Stima sfruttando i dati ALS

Tramite una prima elaborazione dal CHM si ricava l'insieme dei potenziali apici. Tale elaborazione si presta a numerose varianti: sono state definite cinque configurazioni della finestra mobile per l'individuazione di punti di massimo e quattro livelli di soglia per l'esclusione di punti di massimo troppo bassi per rappresentare apici di pini in queste condizioni (fig. 7 e tabella 1). Ai fini della stima della densità serve ricavare dai dati ALS una grandezza il più possibile correlata alla densità effettiva dei pini.

In figura 13 sono riportate graficamente le relazioni tra vertici e densità effettive per le diverse varianti considerate.

* In questo caso la minor lunghezza del tratto di filare rispetto a quella di rilievo è dovuta al fatto che l'algoritmo iRow si interrompe e non percorre per intero i filari.

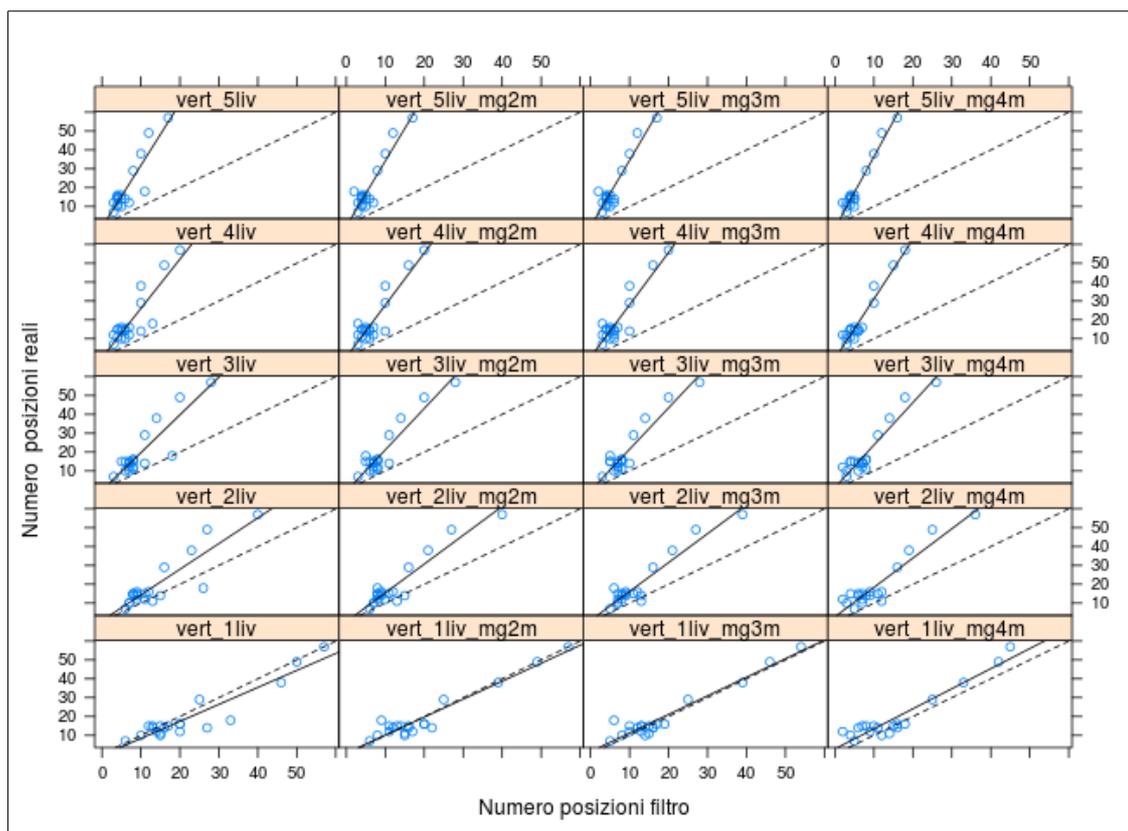


Fig 13: Relazione tra il numero di pini rilevati in campo e il numero di vertici individuati dalle diverse varianti considerate (“liv” indica la configurazione della finestra, “mg” sta per “altezza maggiore di”). La linea continua rappresenta il modello lineare e quella tratteggiata la linea $y=x$. I punti si riferiscono ai valori di densità dei venti spezzoni presi in esame.

Di seguito sono riportate le matrici che riportano i valori di densità ad ettaro e gli errori standard, per i due stand considerati, ricavati dai dati ALS dalle combinazioni finestra-soglia sviluppate. Nelle matrici A e C si trovano i valori centrali della stima, nelle matrici B e D gli errori standard.

Stand 32	A	Configurazione finestra mobile				
		1	2	3	4	5
Soglia altezza	4	1254,464	1352,459	1401,782	1386,249	1281,106
	3	1345,099	1399,262	1430,456	1409,37	1288,254
	2	1377,524	1419,201	1441,209	1413,022	1292,631
	n	1434,383	1451,036	1452,126	1415,845	1301,929

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Stand 32	B	Configurazione finestra mobile				
		1	2	3	4	5
Soglia altezza	4	232,049	216,473	226,122	218,491	230,078
	3	226,466	215,007	225,844	218,087	229,146
	2	225,414	214,774	225,851	218,045	228,990
	n	224,604	214,802	225,929	218,026	228,835

Stand 125	C	Configurazione finestra mobile				
		1	2	3	4	5
Soglia altezza	4	443,375	588,444	587,283	587,547	541,813
	3	1216,099	697,984	677,478	692,156	589,354
	2	1388,209	756,211	718,478	717,914	616,584
	n	1464,324	1278,140	1192,791	1086,537	1025,831

Stand 125	D	Configurazione finestra mobile				
		1	2	3	4	5
Soglia altezza	4	247,151	237,957	236,851	237,828	245,163
	3	165,245	216,181	216,028	223,338	232,613
	2	177,563	208,700	210,037	219,840	229,261
	n	189,093	187,732	178,340	187,236	180,994

L'analisi del grafico si presta a diverse considerazioni. In generale si nota che estendendo l'area della finestra entro cui vengono ricercati gli apici, con questi dati e per queste formazioni, il numero di vertici individuati sottostima sempre più il numero di posizioni occupate dai pini. Questo comportamento è da ascrivere alla relazione tra le

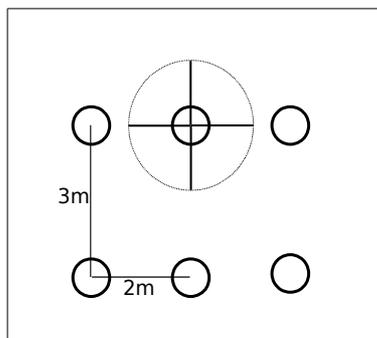


Fig 14: Area di influenza nella selezione dei potenziali apici nella finestra di primo livello. Come si osserva non c'è intersezione tra le aree potenzialmente occupate dalle singole piante.

distanze degli alberi nel sesto di impianto e la dimensione dei pixel. La configurazione della finestra più piccola non potendo includere, quando è centrata su di un primo apice, un secondo apice di pino, individua in genere tutti i pini presenti (fig. 14).

La ricerca è mirata all'individuazione della combinazione finestra-soglia che produce la migliore stima della densità, quindi una stima a minimo errore standard, compatibilmente con un valore centrale accettabile. Come accennato si ha che in questo caso le correlazioni sono tutte abbastanza alte, attestando le

buone capacità dell'algorithmo sviluppato. Nelle matrici A, B, C e D prima esposte sono sintetizzati i risultati ottenuti per ciascuna combinazione finestra-soglia. Si è scelto di approfondire l'analisi della combinazione migliore. Tale livello di filtraggio è quello ottenuto selezionando per un'altezza maggiore di tre metri gli apici individuati con la finestra mobile del primo livello, che presenta una correlazione $r_{lm3}=0,96$. Per questo filtro è stata sviluppata un'analisi di regressione che ha confermato dei buoni risultati di predizione (fig. 15) e di *fitting* (tab. 5).

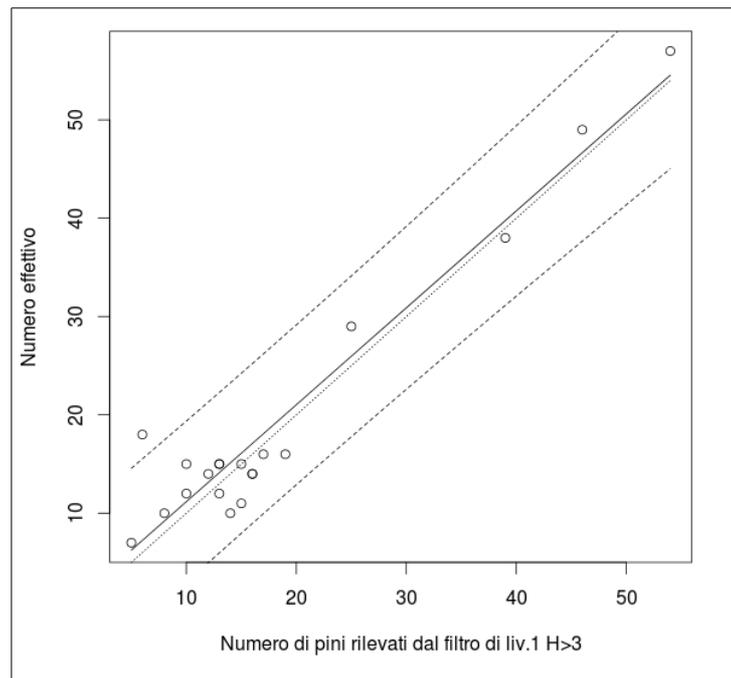


Fig 15: Modello lineare con intervalli di predizione per il filtro della finestra di primo livello e discriminazione di altezza maggiore di 3 m. La linea continua rappresenta la retta di regressione, le linee tratteggiate gli intervalli di predizione e la linea punteggiata è la retta $y=x$.

4.2.2.a. Prova di identificazione dei vertici utilizzando l'algorithmo Top Hat

Seguendo le procedure provate con successo da Barilotti et al. (2005), su popolamenti di conifere di diverse specie ed in diverse condizioni, il CHM è stato processato implementando l'algorithmo Top Hat tramite GRASS e R CRAN. Verosimilmente, i dati LiDAR da cui derivano le immagini rese disponibili dalla RAS, presentano caratteristiche

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

simili a quelle dei rilievi da loro utilizzati: densità di punti medio-bassa (dai due ai quattro punti/m²) da cui è derivato un CHM con una risoluzione a terra di un metro per un metro. Nelle loro analisi è emerso che l' algoritmo *Top Hat* fornisce, nell'individuazione del numero di piante su soprassuoli di conifere, un errore percentuale sotto il 20%. La ricerca svolta non ha confermato tali risultati: gli errori percentuali valutati sulle stime individuali superano il 20% in più della metà dei casi (fig. 16). L'errore assoluto medio è risultato pari a 2,85 con deviazione standard di 0,12 dell'insieme dei plot trovato dal gruppo di lavoro di Barilotti e dati dalla differenza del numero di piante trovate dall'algoritmo ed il numero reale, si attesta intorno a -3, con una deviazione standard di 0,46. Nel Nostro caso lo stesso errore assoluto riscontrato utilizzando il *Top Hat* è pari a 6 con deviazione standard di 0,30. Per contro, l'errore assoluto medio del filtro a risultato migliore (liv.1 H > 3m), è di 2,85 con deviazione standard di 0,12 (tab. 5).

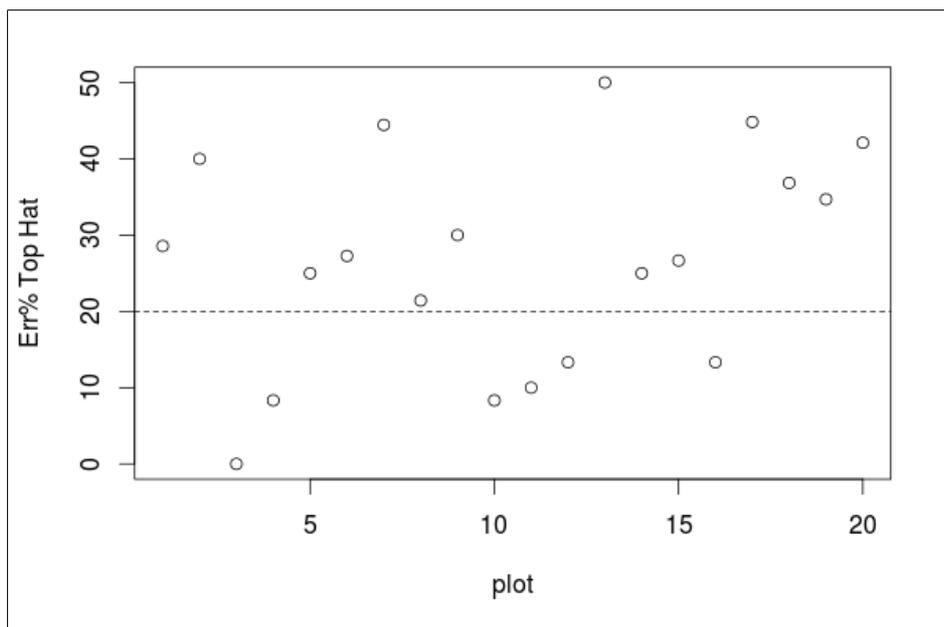


Fig 16: Errore percentuale nell'individuazione del numero di piante dell'algoritmo *Top Hat*. Nella maggior parte dei casi l'errore percentuale è superiore al 20%.

Concludendo, l'implementazione dell'algoritmo *Top Hat*, non ha prodotto risultati migliori rispetto a quelli ottenuti analizzando la superficie CHM con una semplice finestra mobile associata al filtraggi in base all'altezza dei vertici individuati.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Tabella 5: Dati dell'analisi di regressione del filtro che ha mostrato il risultato migliore e dell'algoritmo Top Hat.

Modello	$N_{reale} = b_0 + b_1 N_{filtro}$	$N_{reale} = b_0 + b_1 N_{TopHat}$
Filtro	Finestra di primo livello e altezza > 3 m	Algoritmo Top Hat
R^2	0,93	0,78
RSE	3,77	6,36
b_0	1,31	-2,4
b_1	0,99	1,47
r	0,96	0,88
$\overline{Err\%}$	4%	24%

In tabella 6 sono riportate e messe a confronto le diverse stime di densità ottenute.

Tabella 6: Confronto dei valori di densità stimati con le aree di saggio tradizionali (AdS), su tratti di coppie di filari (UC_{areali}), con i rilievi lineari ($UC_{lineari}$) e con i metodi della regressione dai dati ALS. Sono riportati i valori degli errori campionari e l'errore campionario percentuale.

Stand	Metodo	N/ha	ec_{ha}	ecp
32	Ads	1435	287	20%
32	UC_{areali}	1331	123	9%
32	Per rapporto su $UC_{lineari}$	1370	101	7%
32	Per regressione su ALS	1345	226	16%
125	Ads	1204	-	-
125	UC_{areali}	931	100	11%
125	Per rapporto su $UC_{lineari}$	1112	131	12%
125	Per regressione su ALS	1216	165	13%

La stima ottenuta in base ai rilievi consuetudinari appare decisamente meno affidabile, in realtà però occorre tenere conto della natura del rilievo e quindi delle intrinseche carenze qualitative e quantitative. Si tratta infatti di un rilievo su basi soggettive quindi numericamente molto contenuto e inadatto a produrre valutazioni quantitative in merito all'accuratezza delle stime.

Le stime derivate da schemi probabilistici sono tra loro simili e relativamente ben confrontabili. La stima della densità numerica basata sul conteggio degli apici individuati elaborando l'immagine ALS produce valori simili a quelli derivati da stime soggettive e sembra consentire praticamente una stima diretta: i risultati delle regressioni tra conteggi in

bosco e conteggi sull'immagine non differiscono sostanzialmente dalla retta $y=x$, ma i valori appaiono affetti da errori campionari elevati. La stima tramite UC areali, ovvero utilizzando la misurazione delle distanze tra fusti estremi dello stesso filare, a parità di errore campionario, conduce a valutazioni estreme. Nelle condizioni sperimentali disponibili l'approccio per filari appare, tutto sommato, migliore. Infatti in questo caso il valore di densità più contenuto rispetto a quello derivato dalla stima soggettiva è spiegato: internamente al perimetro considerato di impianto sono, come ovvio, presenti piccole tare non cartografabili, l'individuazione delle linee di impianto lascia fuori dalla stima lineare queste aree e produce quindi un valore di densità più vicino a quello effettivo.

4.3. ANALISI DELL'AREA BASIMETRICA

L'area basimetrica rappresenta un altro parametro fondamentale all'atto dello studio e della pianificazione delle risorse forestali. Di consuetudine, analogamente a come avviene per la densità, viene stimata riferendosi alla somma delle aree delle sezioni a 1,3 m dei fusti che ricadono sulla superficie oggetto del rilievo. Da queste si ricava l'incidenza di queste aree sull'unità di superficie. I valori ottenuti dalle stime tramite i diversi metodi sono riportati in tabella 7.

Tabella 7: Valori in m^2 della stima dell'area basimetrica ad ettaro e dell'errore campionario assoluto e percentuale secondo i diversi metodi.

Stand	Metodo	G/ha	ec	ecp
32	AdS	32,9	1,15	3,5%
32	UC _{areali}	31,7	0,6	1,9%
32	Per rapporto su UC _{lineari}	29,2	0,75	2,6%
125	AdS	23,9	-	-
125	UC _{areali}	25,0	0,74	3,0%
125	Per rapporto su UC _{lineari}	22,1	0,74	3,3%

La prima osservazione riguarda la differenza di qualche metro quadro nel valore centrale della stima, dove i rilievi basati sulle aree tendono a restituire valori più elevati. La causa di questa differenza può essere sempre ricondotta alla discrepanza tra la misura teorica, derivata dal sesto originario e utilizzata per il calcolo dell'area di ogni posizione a

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

partire dalle interdistanze tra e lungo i filari e quella reale, leggermente superiore. Adottando questi accorgimenti i valori centrali della stima, seppur di poco, calano a 30,8 e 24,4 m²/ha, rispettivamente per gli stand 32 e 125. La proporzione degli errori campionari è molto simile e non differisce che di qualche punto percentuale, fatto che dimostra la stessa precisione nel cogliere la variabilità dei popolamenti.

Il rilievo per filari, comprensivo delle misure che permettono di mappare i singoli fusti, consente di andare oltre la sola stima numerica. Il grafico di figura 17 mostra la relazione che esiste tra l'area basimetrica delle piante e la loro distanza dall'inizio o dalla fine del filare. La prima considerazione riguarda la distribuzione della variabilità generale delle dimensioni diametriche. In prossimità del bordo, dove c'è minor competizione per luce e risorse, si nota la presenza di una maggiore variabilità dimensionale che diminuisce allontanandosi sempre di più dal bordo, eteroschedasticità statisticamente confermata dal test di Breush-Pagan (p-value = 0,027). La minor competizione che si riscontra nel bordo si riflette anche nelle dimensioni diametriche, infatti a bordo filare nelle prime tre posizioni, si trovano i fusti con diametri maggiori.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

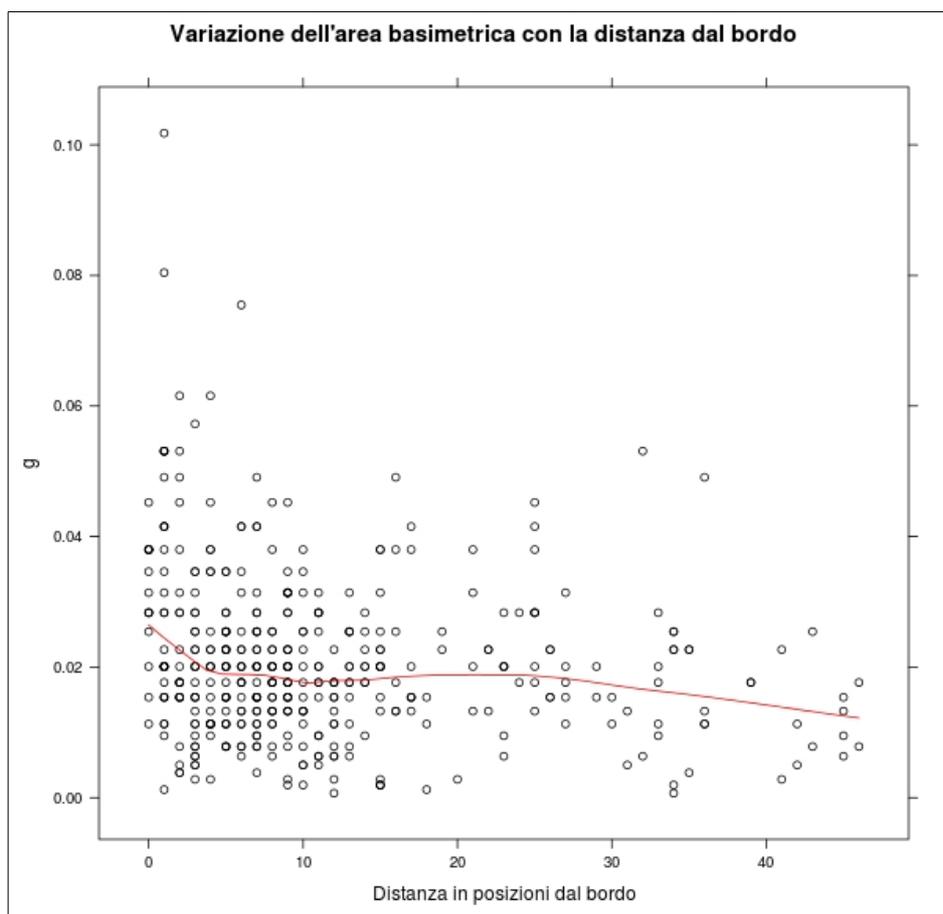


Fig 17: Variazione dell'area basimetrica in funzione della distanza dal bordo del filare. La linea rossa rappresenta un local regression.

4.4. ANALISI DELL'ALTEZZA MEDIA

Come già esposto, il CHM utilizzato per le elaborazioni deriva dalla rasterizzazione in pixel di $1m \times 1m$ dei punti ALS. Data la ridotta densità orizzontale dei punti ALS, è altamente improbabile che i punti a maggiore altezza rappresentino effettivi apici di chioma, inoltre il processo di rasterizzazione comporta un certo smorzamento delle altezze rilevate. La combinazione di questi effetti porta ad una stima necessariamente per difetto rispetto all'altezza reale dei vertici delle chiome. L'analisi dei valori di altezza corrispondenti ai vertici del CHM individuati con diverse configurazioni della finestra mobile, evidenzia tale sottostima. La tabella 8 riporta le differenze ed i rapporti tra valori

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

medi per singolo tratto di filare rilevato. La stima dell'altezza media basata sul CHM è di circa 2,5 m inferiore al valore misurato in bosco.

Tabella 9: Entità delle differenze e dei rapporti tra il dato del DSM e il dato reale.

<i>Configurazione finestra (vedi fig. 7)</i>	<i>Discriminazione di altezza</i>	<i>Differenza media $\pm ds$</i>	<i>Rapporto medio $\pm ds$</i>	<i>Correlazione</i>
<i>Liv. 1</i>	<i>Nessuna</i>	$-3,19 \pm 0,66$	$0,58 \pm 0,11$	0,93
<i>Liv. 1</i>	$H > 2$	$-2,87 \pm 0,78$	$0,63 \pm 0,05$	0,96
<i>Liv. 1</i>	$H > 3$	$-2,72 \pm 0,81$	$0,65 \pm 0,05$	0,96
<i>Liv. 1</i>	$H > 4$	$-2,55 \pm 0,88$	$0,69 \pm 0,06$	0,92
<i>Liv. 2</i>	<i>Nessuna</i>	$-2,83 \pm 0,68$	$0,63 \pm 0,11$	0,89
<i>Liv. 2</i>	$H > 2$	$-2,67 \pm 0,68$	$0,66 \pm 0,05$	0,94
<i>Liv. 2</i>	$H > 3$	$-2,59 \pm 0,74$	$0,67 \pm 0,05$	0,95
<i>Liv. 2</i>	$H > 4$	$-2,45 \pm 0,83$	$0,70 \pm 0,06$	0,91
<i>Liv. 3</i>	<i>Nessuna</i>	$-2,54 \pm 0,81$	$0,66 \pm 0,13$	0,89
<i>Liv. 3</i>	$H > 2$	$-2,43 \pm 0,79$	$0,69 \pm 0,07$	0,94
<i>Liv. 3</i>	$H > 3$	$-2,40 \pm 0,81$	$0,69 \pm 0,08$	0,94
<i>Liv. 3</i>	$H > 4$	$-2,30 \pm 0,89$	$0,72 \pm 0,08$	0,91
<i>Liv. 4</i>	<i>Nessuna</i>	$-2,35 \pm 0,87$	$0,69 \pm 0,15$	0,88
<i>Liv. 4</i>	$H > 2$	$-2,23 \pm 0,81$	$0,71 \pm 0,08$	0,91
<i>Liv. 4</i>	$H > 3$	$-2,22 \pm 0,81$	$0,71 \pm 0,08$	0,91
<i>Liv. 4</i>	$H > 4$	$-2,16 \pm 0,85$	$0,73 \pm 0,08$	0,92
<i>Liv. 5</i>	<i>Nessuna</i>	$-2,21 \pm 0,88$	$0,70 \pm 0,16$	0,89
<i>Liv. 5</i>	$H > 2$	$-2,08 \pm 0,79$	$0,73 \pm 0,08$	0,93
<i>Liv. 5</i>	$H > 3$	$-2,07 \pm 0,78$	$0,73 \pm 0,08$	0,94
<i>Liv. 5</i>	$H > 4$	$-2,07 \pm 0,80$	$0,74 \pm 0,08$	0,92

Queste differenze essendo note e sistematiche, non creano problemi nella stima delle altezze. I diversi filtri sviluppati per l'identificazione dei singoli alberi e qui utilizzati per il calcolo dell'altezza media, assumono comportamenti diversi quando comparati con il valore di altezza media reale (figura 18).

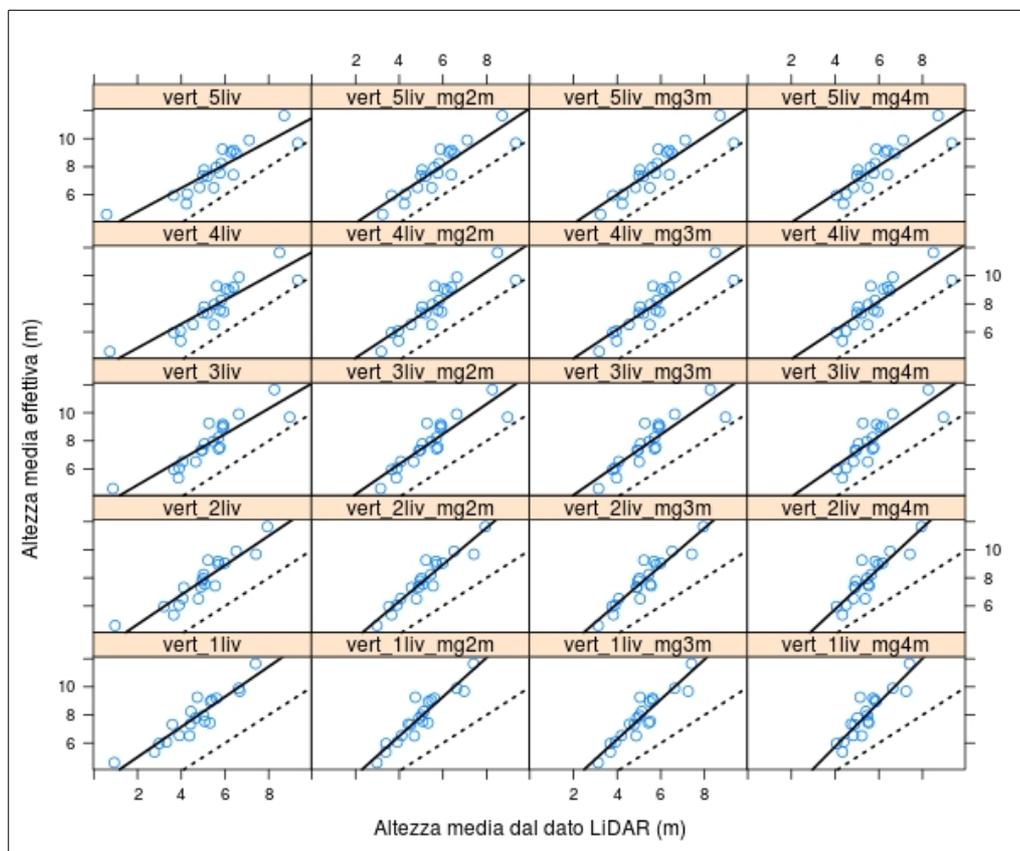


Fig 18: Grafico delle correlazioni esistenti tra le altezze medie reali e le altezze medie dei dati LiDAR per ogni livello di filtraggio. La linea tratteggiata rappresenta la retta $y=x$, quella con linea continua la retta del modello di regressione lineare.

In generale le regressioni lineari semplici sviluppate tra i dati reali e quelli LiDAR per i diversi livelli di filtraggio, presentano tutti un valore di R^2 piuttosto alto ($> 0,75$). Nel grafico sono riportate le rette dei modelli di regressione con una linea continua e le rette $y=x$ con linea tratteggiata. Si nota che all'aumentare del livello di filtraggio la retta di regressione acquista un andamento parallelo alla retta $y=x$. Questo è dovuto al fatto che per bassi livelli si ha, oltre che un maggior numero di individui, anche alberi/punti di massimo relativamente bassi e che contribuiscono a ridurre il valore medio. L'aumento dell'ampiezza della finestra selettiva, unita alle discriminazioni di altezza maggiori, determinano un effetto affine all'uso dei percentili più alti (> 90) nel calcolo dell'altezza media dalla nuvola di punti (Magnussen e Boudewyn, 1998; Næsset e Gobacken, 2008). Questa selettività alta, pur non eliminando le differenze di altezza intrinseche ai dati perché derivanti dal processo di rasterizzazione dei punti, contribuisce a rendere le due rette parallele e più vicine. In questi casi il coefficiente angolare è assimilabile ad 1

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

($b_{1_medio} = 1,006$), per cui risulta che i valori della variabile da stimare sono una approssimazione della variabile predittrice a meno di una costante, in queste condizioni si può operare tramite *stima per differenza* (Corona, 2000). La stima della variabile di interesse è ottenuta calcolando, sia per le varie configurazioni di finestra e di soglia sia per

l'intero CHM, la differenza media come $\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n (h_{mis_i} - hq_i)}{n}$, dove h_{mis_i} sono le medie dei valori di altezza rilevati a terra e hq_i sono le medie dei valori di altezza ALS all'interno delle aree rilevate. Il valore ricercato è stimato come $\bar{h}_D = \mu_{hq} + \bar{d}$ e la varianza tramite

$s_{\bar{x}}^2 = \frac{(N-n)}{N} \frac{s_d^2}{n}$ dove μ_{hq} è la media dei valori di altezza di tutti i pixel dell'area considerata e s_d^2 è lo stimatore della varianza delle differenze $d_i = h_{mis_i} - hq_i$.

Nella tabella 10 sono riportati i coefficienti angolari ed i suoi valori di significatività. La probabilità esprime quanto b_1 non sia significativamente diverso da 1 evidenziando, tranne che per pochi casi, che può essere assimilato all'unità, rendendo la stima per differenza una valida opzione. Nelle configurazioni delle finestre più piccole (livelli 1 e 2, figura 7) i valori si tengono più vicini all'unità quando non si utilizza nessun ulteriore filtraggio per soglia di altezza mentre, a partire dal livello 3, il comportamento si inverte. Infatti in questi casi b_1 si avvicina all'unità all'aumentare della soglia di altezza. L'approssimarsi al parallelismo è dovuto al bilanciamento tra i due coefficienti di regressione, tenendo presente che i livelli più bassi delle finestre trovano un numero di vertici maggiore e che esiste una differenza sistematica (quantificata da b_0) tra le altezze effettive e quelle del CHM. I primi livelli di configurazione delle finestra selezionano anche pixel con bassi valori, facendo spostare verso il basso l'intercetta e facendo aumentare la pendenza. I livelli più alti invece, eliminando i pixel con i valori più bassi, spostano verso l'alto l'intercetta sul valore di differenza media e verso l'unità il coefficiente angolare.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Tabella 10: Valutazione della possibilità di procedere nella stima dell'altezza media secondo il metodo per differenze.

<i>Finestra</i>	<i>Soglia di altezza</i>	b_1	<i>Prob. % che b_1 non sia significativamente diverso da 1</i>
<i>Liv. 1</i>	Nessuna	1,07	49%
<i>Liv. 1</i>	H > 2	1,40	1%
<i>Liv. 1</i>	H > 3	1,42	1%
<i>Liv. 1</i>	H > 4	1,57	1%
<i>Liv. 2</i>	Nessuna	1,05	63%
<i>Liv. 2</i>	H > 2	1,31	1%
<i>Liv. 2</i>	H > 3	1,35	1%
<i>Liv. 2</i>	H > 4	1,45	2%
<i>Liv. 3</i>	Nessuna	0,91	41%
<i>Liv. 3</i>	H > 2	1,07	59%
<i>Liv. 3</i>	H > 3	1,08	57%
<i>Liv. 3</i>	H > 4	1,08	67%
<i>Liv. 4</i>	Nessuna	0,85	21%
<i>Liv. 4</i>	H > 2	1,02	86%
<i>Liv. 4</i>	H > 3	1,03	82%
<i>Liv. 4</i>	H > 4	1,02	88%
<i>Liv. 5</i>	Nessuna	0,83	14%
<i>Liv. 5</i>	H > 2	1,02	85%
<i>Liv. 5</i>	H > 3	1,03	90%
<i>Liv. 5</i>	H > 4	1,01	97%

Come già accennato, il metodo delle stima per differenza dell'altezza media degli stand dai dati ALS, è stato applicato sia alle venti mappature di altezza derivanti dalle configurazioni di finestra e di soglia sia al CHM integrale. La tabella 11 riporta i valori di altezza media per queste venti configurazioni calcolate come descritto.

Tabella 11: Valori di altezza media e di errore standard per stand ottenuti dalla stima per differenza sulle venti configurazioni di filtraggio.

<i>Stand</i>	<i>Finestra</i>	<i>Soglia di altezza</i>	<i>Altezza media</i>	<i>Errore standard</i>
32	<i>Liv. 1</i>	Nessuna	8,98	0,25
32	<i>Liv. 1</i>	H > 2	9,00	0,29
32	<i>Liv. 1</i>	H > 3	9,01	0,29
32	<i>Liv. 1</i>	H > 4	9,09	0,32
32	<i>Liv. 2</i>	Nessuna	8,99	0,25
32	<i>Liv. 2</i>	H > 2	9,01	0,26
32	<i>Liv. 2</i>	H > 3	9,01	0,28

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

32	Liv. 2	H > 4	9,05	0,31
32	Liv. 3	Nessuna	8,99	0,35
32	Liv. 3	H > 2	8,99	0,35
32	Liv. 3	H > 3	8,89	0,36
32	Liv. 3	H > 4	8,92	0,39
32	Liv. 4	Nessuna	8,90	0,39
32	Liv. 4	H > 2	8,90	0,39
32	Liv. 4	H > 3	8,90	0,39
32	Liv. 4	H > 4	8,96	0,39
32	Liv. 5	Nessuna	8,91	0,35
32	Liv. 5	H > 2	8,91	0,35
32	Liv. 5	H > 3	8,91	0,35
32	Liv. 5	H > 4	8,94	0,35
125	Liv. 1	Nessuna	6,54	0,14
125	Liv. 1	H > 2	6,91	0,15
125	Liv. 1	H > 3	6,99	0,17
125	Liv. 1	H > 4	7,32	0,19
125	Liv. 2	Nessuna	6,47	0,17
125	Liv. 2	H > 2	6,92	0,15
125	Liv. 2	H > 3	6,96	0,16
125	Liv. 2	H > 4	7,30	0,19
125	Liv. 3	Nessuna	6,45	0,18
125	Liv. 3	H > 2	6,88	0,15
125	Liv. 3	H > 3	6,90	0,15
125	Liv. 3	H > 4	7,25	0,19
125	Liv. 4	Nessuna	6,40	0,19
125	Liv. 4	H > 2	6,84	0,14
125	Liv. 4	H > 3	6,86	0,13
125	Liv. 4	H > 4	7,21	0,16
125	Liv. 5	Nessuna	6,39	0,23
125	Liv. 5	H > 2	6,90	0,16
125	Liv. 5	H > 3	6,93	0,16
125	Liv. 5	H > 4	7,19	0,18

La tabella 12 mostra i risultati dei vari passaggi per la stima dell'altezza media dello stand attraverso il CHM integrale con il metodo delle differenze.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Tabella 12: Valori dell'altezza per stand ottenuti tramite stima per differenza.

Stand	μ_{nq}	\bar{d}	\bar{h}_D	Errore standard
32	3,50	5,34	8,84	0,31
125	1,95	4,42	6,37	0,23

Il confronto tra le altezze misurate a terra e quelle ottenute tramite dalle elaborazioni su ALS (CHM integrale) sono riportati in tabella 13.

Tabella 13: Valori di altezza media ed errore standard ottenuti dalle UC areali e dalla stima per differenza sul CHM integrale.

Stand	Metodo	\bar{h}	Errore standard
32	UC _{areali}	9,16	0,52
32	Per differenza sul CHM integrale	8,84	0,31
125	UC _{areali}	6,93	0,36
125	Per differenza sul CHM integrale	6,37	0,23

I risultati mostrano che la stima dell'altezza media (valore centrale) è molto vicine e statisticamente sovrapposta per tutte le metodologie esposte. Le stime a partire dal CHM danno risultati leggermente inferiori rispetto a quelle condotte dai rilievi a terra e tengono conto dell'intera superficie dello stand, non solo delle UC rilevate. L'utilizzo della variabile ausiliare (CHM) fa abbassare notevolmente gli errori standard, specie se si utilizzano i vari filtri sviluppati. In questo caso infatti gli errori standard, rispetto all'utilizzo integrale del CHM, sono ancora minori. Analizzando bene la tabella 11 si possono fare ulteriori distinzioni per i due stand. Le migliori stime del valore indagato per lo stand 32 si trovano tra le soglie più alte per quanto riguarda il filtraggio in altezza e non raggiungono mai, anche se per poco, i valori stimati con le UC areali. Per lo stand 125 si nota una migliore capacità di stima del valore centrale utilizzando le soglie intermedie e, a differenza di quanto accade per il 32, nelle soglie alte il valore stimato dalle UC areali viene raggiunto e talvolta superato. Questo può essere spiegato dal fatto che le UC areali, in questo stand, potrebbero non aver coperto l'intero spettro di variabilità e di condizioni, non ricadendo quindi in aree dove la statura degli individui raggiunge altezze maggiori.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

4.5. ANALISI DEL VOLUME

La quantificazione della provvigione di un dato soprassuolo forestale rappresenta nella maggior parte dei casi l'elemento principale delle analisi condotte ai fini gestionali. A tale scopo sono stati sviluppati nel tempo numerosi metodi che utilizzano diverse informazioni e ragionamenti (Cantiani, 1985; Corona, 2008). Negli ultimi anni, come conseguenza dell'innovazione tecnologica nell'acquisizione dei dati, è seguita la proposta di nuovi metodi che includessero queste informazioni ausiliarie a supporto di stime potenzialmente migliori (White et al., 2013). In questo caso i valori di massa ottenuti da rilievi areali tradizionali e da rilievi areali che utilizzano i dati ALS come variabili ausiliarie in modi diversi, sono messi a confronto nella tabella 14.

Tabella 14: Valori in m^3 della stima della provvigione legnosa ad ettaro e sul totale dello stand e dell'errore campionario assoluto e percentuale secondo i diversi metodi. La dicitura Regr. Clip CHM si riferisce alla somma dei valori di tutti i pixel del CHM che cadono dentro l'area per cui è stato computato il volume.

Stand	Metodo	V/ha	ec_{ha}	V_{Tot}	ec_{Tot}	ecp
32	UC _{areali}	145,91	25,54	682,35	119,84	18%
32	Per rapporto su UC _{lineari}	133,40	11,52	625,97	54,05	9%
32	ALS (stima per rapporto)	133,20	19,28	625,05	90,46	14%
32	ALS (Corona e Fattorini, 2008)	132,92	9,44	623,76	44,29	7%
32	ALS (stima per regressione)	126,66	11,82	594,34	55,47	9%
125	UC _{areali}	98,01	23,16	550,86	130,15	24%
125	Per rapporto su UC _{lineari}	84,79	24,64	476,57	138,48	29%
125	ALS (stima per rapporto)	84,96	35,87	477,54	201,64	42%
125	ALS (Corona e Fattorini, 2008)	78,37	17,08	440,50	96,01	22%
125	ALS (stima per regressione)	65,11	23,46	365,96	131,86	36%

I diversi metodi utilizzati per la stima della massa legnosa forniscono valori assoluti che sono ben confrontabili, i cui limiti degli intervalli di confidenza sono tra loro abbastanza sovrapposti.

Il metodo tradizionale basato sulle aree è quello che fornisce i valori di massa più elevati per entrambi gli stand. Analizzando gli errori campionari si vede che per lo stand 125 il valore percentuale è più o meno simile a quello ottenuto con tutti gli altri metodi mentre, per lo stand 32, l'ecp è più grande di quello ottenuto con le altre metodologie.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

Utilizzando come variabili ausiliarie il CHM e le linee i risultati cambiano. Da questi dati si nota che la stima utilizzando i dati ancillari a supporto, restituisce valori più bassi rispetto al metodo tradizionale, intervalli di confidenza più stretti ed un errore campionario percentuale poco variabile. Il metodo del rapporto proposto da Corona e Fattorini (2008) che utilizza il CHM come variabile ausiliaria, fornisce valori centrali della stima quasi identici a quelli del metodo per rapporto convenzionale che ha visto invece l'utilizzo delle linee (Corona, 2000).

Pur non avendo trovato riscontro dell'eteroschedasticità nella relazione tra volume e altezza (figure 19 e 20) trovata invece da Corone e Fattorini, i risultati delle regressioni non sembrano migliori degli altri metodi proposti.

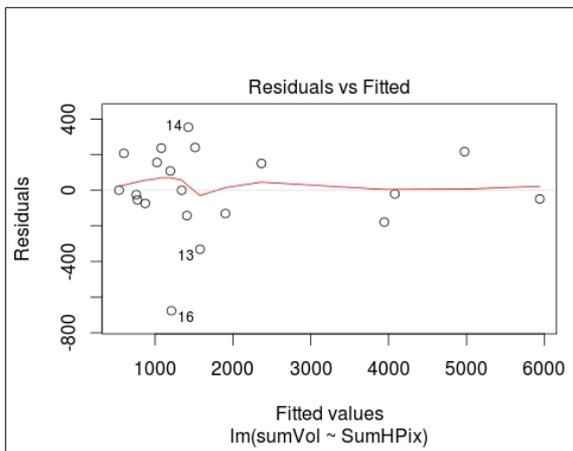


Fig 19: Distribuzione dei residui della relazione tra il volume e la somma de valori dei pixel di una de terminata porzione di soprassuolo.

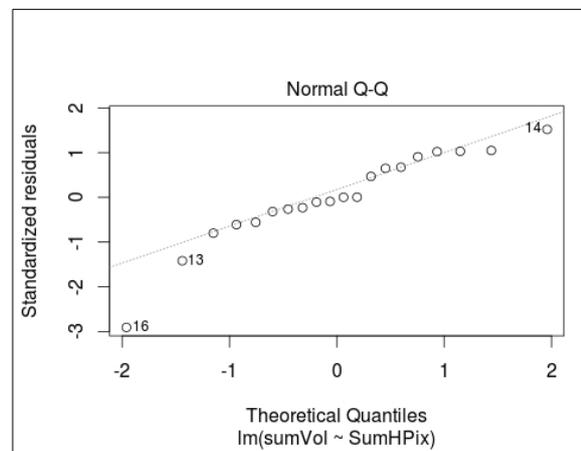


Fig 20: Grafico Q-Q della relazione tra il volume e la somma de valori dei pixel di una determinata por zione di soprassuolo.

È evidente che i risultati ottenuti dall'utilizzo di dati ausiliari secondo diversi metodi convergono tutti verso un valore simile, inferiore a quello ottenuto dall'approccio convenzionale. Questo aspetto, insieme ad intervalli di confidenza tendenzialmente più stretti, fa supporre una maggiore efficienza della stima.

5. CONCLUSIONI

Negli ultimi anni si è vista l'affermazione e l'accettazione della teoria sistemica nella visione e nella gestione del bosco. L'approccio olistico, alla base della selvicoltura sistemica, riconosce nel bosco un sistema biologico complesso in continuo cambiamento che risponde a perturbazioni esterne. Per definizione comprendere e contenere in poche misure un sistema complesso non è possibile. Procedere in questo modo comporta di fatto l'accettazione di compromessi, assunzioni o semplificazioni meccanicistiche, caratteristiche del passato. Per affrontare lo studio della complessità del sistema, del sistema bosco in questo caso, occorre integrare nell'analisi i diversi punti di vista e tutti i dati e le osservazioni a disposizione.

Le variabili ed i parametri in gioco sono molteplici e variano in funzione delle finalità dello studio, alcuni di questi sono più semplici altri più complessi e a maggiore potere informativo. Alcuni parametri sono considerati fondamentali perché vanno oltre il fornire una foto dello stato attuale del sistema; sono importanti perché rendono confrontabile lo stato attuale con le conoscenze e i dati del passato, perché richiesti in ambito pianificatorio e gestionale e perché essi permettono di derivare altri parametri secondari. Questi sono i parametri diametro e altezza media degli alberi, densità e volume legnoso del bosco, da cui se ne possono derivare altri come il contenuto di carbonio e la biomassa totale per citarne alcuni, indispensabili, ad esempio, in relazione agli impegni sulle convenzioni internazionali su foreste e carbonio.

Una delle chiavi per inquadrare l'agire in bosco secondo l'approccio sistemico è strutturare un efficiente piano di monitoraggio (Corona et al., 2011), quindi una serie di rilievi ripetuti nel tempo. Il miglioramento quantitativo e qualitativo che la gestione sistemica ricerca in merito al dato misurato in campo, si scontra con il relativamente basso potere informativo e gli alti costi (dovuti anche ai tempi di acquisizione) del rilievo tradizionale. Parallelamente ad altri lavori (Campus et al., 2014), anche questo si focalizza su entrambi questi aspetti critici, nello specifico verte sull'utilizzo sia di procedure diverse

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

di misure in bosco sia di dati accessori. L'auspicio è quello di rendere note e facilmente utilizzabili queste tecniche su ampia scala ad enti pubblici e privati, incentivandone e incoraggiandone la pratica a seguito delle migliorie qui esposte.

5.1. STIMA UTILIZZANDO LE UNITÀ DI CAMPIONAMENTO LINEARI

In molte situazioni, come è tipicamente il caso nelle piantagioni, la disposizione dei fusti sul terreno crea allineamenti (filari e/o gradoni) estesi a tutta la superficie. In questi casi è possibile procedere al campionamento considerando gli allineamenti come gli elementi della popolazione indagata. Il costo di produzione della mappa di tutte le linee e la riconoscibilità di tali linee in bosco, al momento in cui si effettuano i rilievi sul campione, rappresentano gli aspetti delicati del procedimento.

La metodologia di rilievo per filari, ha in genere ampliato lo spettro delle informazioni ottenibili e migliorato i tempi di rilievo di densità, area basimetrica e volume. Il procedimento offre anche il vantaggio qualitativo di consentire, all'atto della redazione della mappa degli allineamenti, la rappresentazione fedele e dettagliata della presenza di zone, anche piccole, non interessate dal rimboschimento. I valori per unità di superficie risultano quindi, in genere, correttamente più contenuti rispetto a quanto si valuta con procedimenti tradizionali.

5.1.1. Densità

Il campionamento per filari ha mostrato buoni risultati nella stima della densità. Il numero di piante ad ettaro è, opportunamente, inferiore a quello derivato dal rilievo con le aree tradizionali, con il beneficio di un minore tempo di rilievo. Gli errori campionari che derivano dalle linee sono di norma decisamente inferiori a quelli delle aree e i risultati che si ottengono permettono di ampliare lo spettro informativo ottenibile. In piano, dove i filari sono rettilinei, si opera consuetudinariamente tramite aree quadrangolari con i bordi paralleli ai filari a distanza uguale ad un multiplo intero pari alla distanza tra i filari stessi.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

L'adozione di procedimenti di questo tipo in zone montuose o collinari dove i filari seguono le curve di livello, è spesso forzata.

I rilievi su linee, risultano più semplici e veloci e si adattano a tutti i casi di impianti a sesto regolare, prescindendo dal condizionamento dell'irregolarità del filare dovuto alla pendenza del versante. Infatti, partendo dalla conoscenza della lunghezza totale delle linee, contare quanti alberi ci sono in una determinata linea campione, non comporta spostamenti per salire o scendere tra i gradoni rendendo il rilievo più breve, meno faticoso e maggiormente attendibile.

5.1.2. Area basimetrica

Nell'analisi dei risultati ottenuti nella stima dell'area basimetrica ad ettaro tramite i rilievi basati sulle aree ed il campionamento per filari, un semplice confronto quantitativo non è sufficiente per cogliere le effettive potenzialità del rilievo. Sotto l'aspetto numerico infatti il rilievo areale nei plot tradizionali e negli stessi spezzoni di filare, utilizzati anche per il campionamento su UC lineari, non differiscono molto. I valori centrali della stima sono molto simili pur restando, quelli derivati dalla stima sulle linee, leggermente più bassi. Gli errori campionari, attestandosi su valori affini e confrontabili, ma leggermente maggiori per le analisi su UC lineari. In realtà questa caratteristica rappresenta un incremento di informazione essendo questo procedimento capace di cogliere una quota di variabilità maggiore. Il grafico di figura 17 che mostra la variabilità delle dimensioni diametriche in funzione della distanza dal limite dell'impianto, permette una valutazione abbastanza accurata del fenomeno che viene definito come "effetto bordo", apprezzando quale sia la reale influenza dell'ecotone sullo sviluppo del diametro. Questo spiega la differenza nell'ampiezza degli intervalli di confidenza. Solitamente le aree di saggio tradizionali non vengono appoggiate al bordo, ma il loro centro è posizionato quasi sempre verso la parte interna del popolamento, in genere evitando di includere di proposito i margini. In queste aree la variabilità dei diametri è minore. Per contro, i rilievi basati sulle linee, attraversano tutto il gradiente di variabilità e, a differenza di quello che potrebbero fare delle aree che includono il bordo, lo pesano per il suo reale contributo alla variabilità

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

totale fornendo degli intervalli di confidenza “reali”. Questo di fatto ha molteplici risvolti operativi, come può essere una migliore caratterizzazione microstazionale anche in relazione alla localizzazione degli interventi selvicolturali, per esempio l'apertura di una buca in cui far rinnovare il bosco. Questa informazione permette quindi di intervenire con una certa precisione sul target diametrico di interesse. L'incremento nel potere informativo nella stima dell'area basimetrica ed i ridotti tempi di rilievo tenderebbero, almeno in queste formazioni artificiali, a favorire i rilievi sulle linee rispetto a quelli areali.

5.1.3. Volume

L'utilizzo delle linee come variabile ausiliaria nel campionamento per filari, si è dimostrato valido anche nella stima del volume. Il procedimento rappresenta quindi una valida alternativa qualora si non si disponesse di immagini ALS anche perché non richiede, per ogni campione, la determinazione dell'area ma solo il rilievo della lunghezza indagata.

In conclusione, la stima della densità massale e del numero di fusti per unità di superficie attraverso i rilievi lineari, per il tipo di formazioni qui studiate, appare una proposta interessante. Quando le stime non sono nettamente migliori rispetto a quelle dei metodi areali tradizionali, sono comunque paragonabili e statisticamente sovrapposte. Un miglioramento di non poco conto riguarda anche l'ottimizzazione della logica del rilievo: l'utilizzo di linee per effettuare rilievi su entità spaziali in cui, in realtà, la dimensione lunghezza è schiacciante. Si consegue una maggiore rapidità nell'acquisizione del dato, quindi anche il contenimento dei costi delle campagne di rilievo. La maggiore capacità che il *campionamento per linee* offre per l'elaborazione, lo studio e in termini di potere informativo, rendono queste tecniche di specifico interesse per l'approccio sistemico e per tutti quegli studi che vanno oltre il solo aspetto quantitativo del dato; tanto che, anche ipotizzando tempi di rilievo leggermente più lunghi rispetto alle aree, continuerebbe ad essere una scelta preferibile.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

5.2. STIMA UTILIZZANDO I DATI LiDAR

I dati LiDAR a cui si può accedere dal geoportale, che sono stati usati in questo lavoro, non risultano essere stati ancora utilizzati nel contesto della pianificazione forestale, nonostante sia sempre più diffuso il ricorso a campagne di rilevamento LiDAR specifiche. In realtà siamo al corrente del fatto che in Sardegna, da non molto, alcuni professionisti privati hanno iniziato ad utilizzare dati ALS.

L'utilizzo del LiDAR in campo forestale, in alcune regioni, sta diventando una pratica abbastanza comune. quasi ovunque, tuttavia le procedure da seguire per ottenere buoni risultati o non sono chiare o sono relativamente complesse per il personale tecnico che muove i primi passi nel settore ALS. Mostrare come utilizzare tecniche più semplici ma comunque ugualmente efficaci per raggiungere un determinato scopo, fornendo algoritmi di elaborazione comprensibili ed applicabili anche dai meno esperti, darà la possibilità di ampliare la gamma di chi usufruisce e trae beneficio dai dati ALS. L'implementare i test di queste elaborazioni su aree in cui proprio gli enti pubblici stanno attualmente sviluppando dei piani di gestione è stato ottimo in termini di avvio del trasferimento delle conoscenze.

Come già descritto, il percorso da seguire per riuscire a trovare il server da cui scaricare i dati non è intuitivo né semplice; anche una volta che si ha accesso alla pagina, trovare i file che coprono l'area di studio attraverso il nome non è ragionevole e ancor meno sicuro. Qui si è sviluppata una procedura che richiede in entrata solo la mappa vettoriale (shape) di delimitazione dell'area da studiare e, direttamente dal GIS, trova e scarica i file di interesse. Anche quest'algoritmo, come tutti quelli sviluppati, è facilmente ripetibile.

5.2.1. Densità

Nella letteratura scientifica è abbastanza comune trovare metodi per la stima della densità a partire da dati ALS, ma molto spesso questi o sono adattati a specifiche tipologie di dati o sono comunque abbastanza complessi da ripetere per chi non ha una buona pratica nel settore.

Un certo numero di queste metodologie, è derivato da funzioni proprie delle analisi idrologiche che sono state sviluppate per l'identificazione di bacini idrografici e di punti (o

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

zone) di minimo e di massimo, estese ed adattate in seguito al campo forestale nell'individuazione delle chiome. Una di queste è l'algoritmo *Top Hat*, utilizzato anche da alcuni ricercatori italiani (Barilotti, 2005). L'utilizzo della trasformata *Top Hat*, su questi dati (rasterizzazione ad 1 m) e su questi popolamenti, non ha dato risultati migliori della finestra mobile qui sviluppata. In questo caso è il filtro più piccolo e meno restrittivo che ha fornito i risultati migliori ma, anche per questo, valgono le considerazioni fatte per il *Top Hat* rispetto al dato su cui viene applicato l'algoritmo e alla formazione forestale. La capacità di questi algoritmi di trovare una potenziale pianta è molto dipendente sia dalle caratteristiche originarie del dato grezzo e dalle successive elaborazioni (densità di punti, rasterizzazione), sia dalla struttura dei popolamenti (età, sesto di impianto, specie e altro).

Etichettare come definitivo qualsiasi tipo di algoritmo dedito ad una determinata funzione non è plausibile. L'implementazione della trasformata *Top Hat*, che ha dato buoni risultati comprovati da più studi e che in questo caso specifico non è stato superiore ad una prassi più semplice, porta a ragionare su alcune considerazioni. In particolare è di supporto nell'affermare che non esistono metodologie ed algoritmi precisi e definitivi di stima per cui, siccome alcuni sono relativamente complessi, è meglio che ci sia la disponibilità di altri che siano più semplici da applicare e che abbiano una flessibilità maggiore. La finestra mobile qui sviluppata, con le diverse configurazioni e soglia di altezza proposte, ne è un esempio. Infatti, pur essendo un unico algoritmo, è molto flessibile, adattabile e modificabile permettendo di esplorare, in un'unica fase e con semplici analisi pilota, tutte le casistiche. Di conseguenza si sceglie quale fornisce il risultato migliore. I valori di densità ottenibili sono molto vicini a quelli stimati con le altre metodologie, ma è opportuno esplorare, attraverso ulteriori analisi, cosa influenza gli errori che si riscontrano.

5.2.2. Altezza

La stima della variabile altezza rappresenta, essendo in sostanza i dati ALS valori di quota, il parametro più diretto ottenibile dalla loro analisi. Alla luce di questo è sufficiente fare delle semplici indagini atte a studiare come altezza reale e altezza LiDAR sono rapportate tra di loro e, in funzione di questa indagine, applicare il metodo di stima

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

relativamente più corretto. Alcuni, come la stima secondo i metodi della regressione o la stima per differenza, sono tra quelli più utilizzati. La robustezza di questi metodi, se usati quando i loro assunti sono correttamente verificati, assicura una buona qualità delle stime. Nel caso in esame, l'analisi delle regressioni e delle correlazioni, ha confermato che il metodo della stima per differenza fosse il più adatto. Come già accennato, l'entità di questa differenza è dipendente dalla qualità dato (modo di acquisizione) e dalle successive pre-elaborazioni. La misura delle altezze degli alberi è sempre una delle componenti che richiede maggior tempo nei rilievi ipsodiametrici ordinari, tanto che viene effettuata quasi sempre solo su un sotto-campione di fusti rilevati. La disponibilità dei dati ALS permette, rispetto alle UC areali, di rilevare l'intera superficie oggetto di indagine, migliorando notevolmente le stime e l'affidabilità del dato. Come già esposto, il parametro altezza è relativamente dispendioso da rilevare in termini di tempo, inoltre in determinate condizioni (boschi densi dove è difficile individuare il cimale) la sua accuratezza può essere molto limitata. Il ricorso al rilievo laser se disponibile, rappresenta una scelta importante, sia perché permette di risparmiare sui tempi delle campagne di misura, sia perché consente di integrare e verificare il dato acquisito in bosco. L'incrocio tra le altezze e altri tipi di dati come quelli pedologici, morfologici e fisiografici, può fornire indicazioni su quali siano le parti a maggior fertilità; di fatto queste aree non sempre sono distinguibili da semplici ortofoto o non sono confermate dalla maggiore crescita della vegetazione nel caso del solo utilizzo di mappe pedologiche. Una conoscenza delle altezze, anche indicativa, permette di sviluppare dei ragionamenti su quali possono essere le dimensioni dei tagli. È noto che nel caso si vogliano aprire buche per favorire o stimolare la rinnovazione, a maggiore altezza degli alberi che formano la corona di questa buca, corrispondono tagli di diametri maggiori, tali che il gap formato consenta una adeguata irradiazione solare. La conoscenza dell'altezza del soprassuolo su cui si interviene, oltre a fornire una prima quantificazione anche approssimativa degli interventi, consente anche di dislocare la forza lavoro in maniera più efficiente, distribuendo gli le risorse lavorative dove è prevista maggiore richiesta.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

5.2.3. Volume

Il volume della massa legnosa presente in una determinata porzione di bosco è una variabile a tre dimensioni. La sua modellizzazione con la variabile altezza derivante dalla scansione laser, non sempre è immediata. Sono possibili diversi approcci, sia parametrici (Woods et al., 2001; Næsset, 2002; Hudak et al., 2006) sia non parametrici (Packalén e Maltamo, 2007; Hudak et al., 2008; Vastaranta et al., 2012) per la sua quantificazione. Per i metodi parametrici, differentemente da quelli non parametrici, è necessaria la verifica a priori di diversi assunti (per esempio gli errori sono indipendenti e normalmente distribuiti e la varianza è costante). Diverso è il caso in cui si utilizza il metodo del campionamento per filari. In questo secondo metodo il volume non si mette direttamente in relazione con altre variabili ausiliarie, la sua quantificazione quindi, non passa attraverso l'attendibilità della stima di altri parametri.

Di fatto, i metodi che utilizzano variabili ausiliarie come linee o dati ALS, non si discostano molto per i risultati ottenuti e può essere utilizzato l'uno o l'altro a seconda della disponibilità.

Preciando dal tipo delle variabili ausiliarie che supportano e ampliano le possibilità di studio dei sistemi forestali, il loro utilizzo per migliorare la stima, necessita di un algoritmo di integrazione che racchiude tutte le fasi del rilievo.

Poiché ogni algoritmo lavora su un preciso aspetto, anche gli output di ciascuno di essi avranno forma e possibilità di utilizzo diversi. In questo studio si è evitato di tenere rilievi in bosco e informazioni ausiliarie come due parti separate da legare insieme solo alla fine, sviluppando un metodo di ragionamento generale e funzionale che lega metodi tradizionali e innovativi (fig. 21).

In generale si parte da parametro da stimare per una data formazione forestale. In riferimento a questa formazione possiamo disporre di dati ausiliari grezzi (come per esempio ortofoto). Congiuntamente, il parametro da stimare e, in qualche misura le caratteristiche della formazione forestale, definiscono l'algoritmo da utilizzare per ricavare dal dato ausiliario informazioni a supporto delle operazioni necessarie a produrre le stime richieste. L'algoritmo ed il suo output sono altresì dipendenti anche dal tipo e della qualità

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

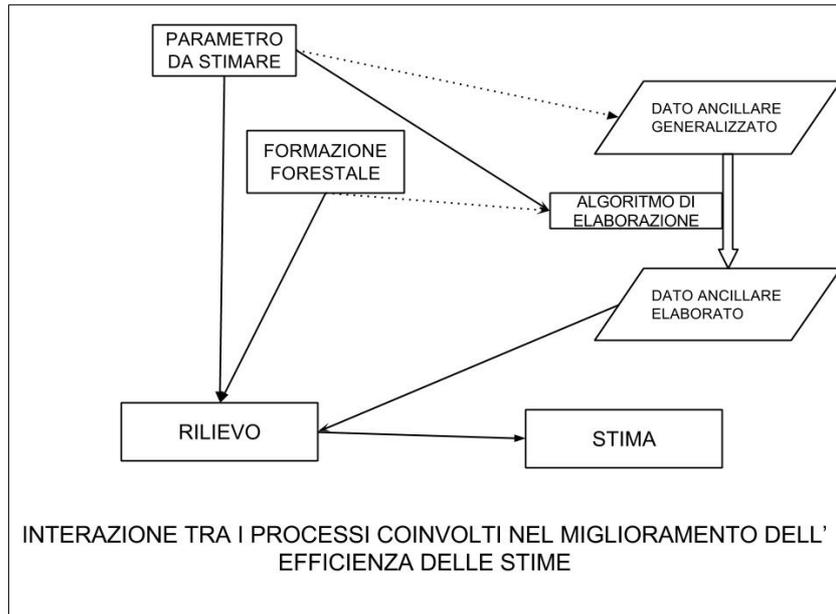


Fig 21: Diagramma logico del processo di ottimizzazione del risultato.

dei dati in entrata. La disponibilità e varietà di dati ancillari, in connessione con la diffusione di algoritmi sempre più performanti, consente l'applicazione di approcci campionari ad efficienza sempre più elevata.

6. BIBLIOGRAFIA

- Anfodillo T., 2009. Le fragili fondamenta della selvicoltura sistemica. *Forest@* 6: 274-276.
- doi: 10.3832/efor0595-0006
- Arrigoni P. V., 1968. Fitoclimatologia della Sardegna. *Webbia*, 23:1-100
- Avery T.E., Burkhart H. E., 2002. *Forest measurements*. 5th edn. McGraw-Hill, New York.
- Barilotti A., Turco S., Ciampalini R., 2005 . Misurazione automatica di singoli alberi attraverso analisi morfologiche su dati laser scanning. Atti della IX Conferenza Nazionale ASITA, 15 - 18 novembre 2005, Catania: pp. 243-248.
- Barilotti A., Turco S., Ciampalini R., 2006 . Analisi morfologica su dati LiDAR in GRASS GIS per l'estrazione automatica dei singoli alberi. Settimo meeting degli utenti italiani di GRASS, 23 - 24 febbraio 2006, Genova.
- Burley J., Evans J., Youngquist J. A., 2004. Glossary. In: *Encyclopedia of Forest Sciences*. Elsevier/Academic Press.
- Campbell J. B., Wynne R. H., 2011. *Introduction to Remote Sensing*. The Guildford Press, New York. 5th Edition.
- Campus S., Scotti R., Mura M., Piredda I., Lovreglio R., d'Angelo M., 2014. Proposta e valutazione di un protocollo di monitoraggio nel quadro delle gestione sistemica: Applicazione in un impianto forestale litoraneo (Arborea, Italia). Atti del Quinto Simposio Internazionale: "Il monitoraggio costiero mediterraneo: problematiche e tecniche di misura". Livorno 17-19 giugno 2014
- Cantiani M., 1985. *Appunti di assestamento forestale*. Coordinati da Luigi Hermanin e Orazio la Marca dalle lezioni del prof. Mario Cantiani, A.A. 1984/85. Edizioni a-Zeta, Firenze.
- Cantiani M. G., 2012. Forest planning and public participation: a possible methodological approach. *IForest* 5: 72-82

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale*.

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

- Chen Q., Gong P., Baldocchi D., Tian Y. Q., 2007. Estimating Basal Area and Stem Volume for Individual Trees from Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 12: 1355-1365
- Ciancio O., 2009. Quale selvicoltura nel XXI secolo? Atti del Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura. Taormina (ME), 16-19 ottobre 2008. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, p. 3-39.
- Ciancio O., Nocentini S., 1996a. Systemic silviculture: scientific and technical consequences. La selvicoltura sistemica: conseguenze scientifiche e tecniche. *L'Italia Forestale e Montana* 51, 112-130
- Ciancio O., Nocentini S., 1996b. Il bosco e l'uomo: l'evoluzione del pensiero forestale dall'umanesimo moderno alla cultura della complessità. La selvicoltura sistemica e la gestione su basi naturali. In: *Il bosco e l'uomo* (a cura di Orazio Ciancio). Firenze, Accademia Italiana di Scienze Forestali, p. 21-115.
- Corona P., 2000. Introduzione al rilevamento campionario delle risorse forestali. Edizioni CUSL, Firenze.
- Corona P., 2008. Metodi di inventariazione delle masse e degli incrementi legnosi in assetto forestale. Dispense didattiche. Aracne editrice, Roma.
- Corona P., Barbati A., Ferrari B., Portoghesi L., 2011. Pianificazione ecologica dei sistemi forestali. *Compagnia delle Foreste*, Arezzo, pp. 206
- Corona P., Fattorini L., 2008. Area-based lidar-assisted estimation of forest standing volume. *Canadian Journal of Forest Research* 38, 2911–2916.
- Corona P., Scotti R., 2011. Systemic silviculture, adaptive management and forest monitoring perspectives. *L'Italia Forestale e Montana*, 66 (3): 219-224. doi: 10.4129/ifm.2011.3.05
- Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J.-G. Winther, 2013: Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Al

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

len, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Draper N. R., Smith H., 1998. Applied Regression Analysis, 3rd Edition. Wiley series in probability and statistics. Wiley.

EFS, 2014. Berchida (Scheda di sintesi). URL: <http://www.sardegnaambiente.it/j/v/152?s=12213&v=2&c=1652&t=1>. Data di accesso: 13 ottobre 2014.

El-Ashmawy N., Shaker A., 2014. Raster vs. point cloud lidar data classification. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7. ISPRS Technical Commission VII Symposium, 29 September – 2 October 2014, Istanbul, Turkey.

FAO-ECE-ILO, 2000. Public participation in forestry in Europe and North America. Report of the FAO/ECE/ILO Joint Committee Team of Specialists on Participation in Forestry. Working paper 163, Sectorial activities department, International labour office, Ginevra, pp. 137.

Gomasasca M. A., 2009. Basics of geomatics. Springer, New York.

GRASS Development Team, 2012. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://grass.osgeo.org>

Gregoire T., 1998. Design-based and model-based inference in survey sampling: appreciating the difference. Canadian Journal of Forest Research 28:1429-1447

Gasparini P., Tabacchi G. (a cura di), 2011. L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC 2005. Secondo inventario forestale nazionale italiano. Metodi e risultati. Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, Corpo Forestale dello Stato; Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Edagricole, Milano, pp. 653.

Hudak, A.T.; Crookston, N.L.; Evans, J.S. Falkowski, M.J. Smith, A.M.S.; Gessler, P.E.; Morgan, P., 2006. Regression modeling and mapping of coniferous forest basal area and tree density from discrete-return ALS and multispectral satellite data. Canadian Journal of Remote Sensing 32(2):126–138.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

- Hudak, A.T.; Crookston, N.L.; Evans, J.S.; Hall, D.E.; Falkowski, M.J., 2008. Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* 112:2232–2245.
- Hudak T. A., Evans S. J., Smith M. S., 2009. LiDAR utility for natural resource managers. *Remote Sensing* 1: 934-951
- Intelescope Solutions, 2014. Overview. URL: <http://www.intelescope.com/en/solutions/solutions/>. Data di accesso: 14 ottobre 2014.
- Isenburg M., 2013. LAStools - efficient tools for LiDAR processing. URL: <http://rapidlasso.com>. Ultimo accesso: 14 ottobre 2014.
- Kangas A., 1994. Classical and model based estimators for forest inventory. *Silva Fennica* 28:3-14.
- Kangas A., Maltamo M., 2006. *Forest inventory. Methodology and applications*. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Kankare V., Vastaranta M., Holopainen M., Rätty M., Yu X., Hyyppä J., Hyyppä H., Alho P., Viitala R., 2013. Retrieval of Forest Aboveground Biomass and Stem Volume with Airborne Scanning LiDAR. *Remote Sensing* 5: 2257-2274.
- la Marca O., 2004. *Elementi di dendrometria*. Pàtron editore.
- Levin S. A., 1998. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems* 1:431-36
- Mcgaughey, R. J. (2014). *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. URL: <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html>. Ultimo accesso: 14 ottobre 2014.
- McRoberts R. E., 2011. Satellite image-based maps: Scientific inference or pretty pictures? *Remote Sensing of Environment* 115-2: 715-724
- McRoberts R. E., Næsset E., Gobakken T., 2013. Inference for lidar-assisted estimation of forest growing stock volume. *Remote Sensing of Environment* 128: 268-275

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale*.

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

- MEA (Millenium Ecosystem Assessment), 2005. Ecosystem and Human Well-Being: Bio diversity Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC. 86 p..
- Magnussen S, Boudewyn P., 1998. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. Cnadian Journal of Forest Research 28: 1016-1031.
- Messier C., Puettmann K.J., 2011. Forests as complex adaptive systems: implications for forest management and modelling. L'Italia Forestale e Montana, 66 (3): 249-258. doi: 10.4129/ ifm.2011.3.11
- Mora B., Wulder M. A., White J. C., Hobart G., 2013. Modeling Stand Height, Volume, and Biomass from Very High Spatial Resolution Satellite Imagery and Samples of Air borne LiDAR. Remote Sensing 5: 2308-2326.
- Mori P., 2011. La babele della selvicoltura. Sherwood n. 171: 4-7
- Næsset E., Gobbaken T., 2008. Estimation of above- and below-ground biomass across re gions of the boreal forest zone using airborne laser. Remote Sensing of Environment: 112 (2008) 3079–3090
- Næsset E., 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. Remote Sensing of Environment 80(1):88–99.
- Neteler, M., Bowman, M.H., Landa, M., Metz, M., 2012. GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. Environ Model Soft 31, 124–130.
- Nocentini S., 2009. Le solide fondamenta della selvicoltura sistemica. Forest@ 6: 337-346. - doi: 10.3832/efor0603-0006
- Opsomer J.D., Breidt F.J., Moisen G.G., Kauermann G., 2007. Model-assisted estimation of forest resources with generalized additive models. Journal of the American Statistical Association, 102, 400-416
- Paci M., 2011. Ecologia forestale - Elementi di conoscenza dei sistemi forestali applicati alla selvicoltura. Edagricole – Sole24ore.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

- Packalén, P.; Maltamo, M., 2007. The k-MSN method in the prediction of species specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment* 109(3):328–341.
- Paletto A., De Meo I., Ferretti F., 2011. Preferenze sociali e preferenze istituzionali a confronto: il caso del distretto forestale dell'Archi-Grighine (Provincia di Oristano). *Forest@8*: 216-227 – doi: 10.3832/efor0680-008
- Petrie G., Toth C. K., 2009. Introduction to laser ranging, profiling, and scanning. In: “Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing” (Shan J, Toth CK eds.). CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 1-28.
- Pirotti F., 2011. Analysis of full-waveform LiDAR data for forestry applications: a review of investigations and methods. *IForest* 4: 100-106
- Portoghesi L., Marchetti M., Scotti R., Corona P., 2014. Monitoraggio come strumento della gestione sistemica. In: Ciancio O., 2014. *Storia del pensiero forestale. Selvicoltura, Filosofia, Etica*. Rubbettino.
- Puettmann, K., Coates, K.D., Messier, C., 2009. *A Critique of Silviculture: Managing for Complexity*. Island Press, Washington DC.
- Puletti N., Mura M., Catsaldi C., Marchi M., Chiavetta U., Scotti R., 2014. ForIT: Functions from the 2nd Italian Forest Inventory (INFC). R package version 1.0
- QGIS Development Team, 2012. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- R Core Team, 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL: <http://www.R-project.org/>.
- RAS, 2011a. Modello Digitale delle Superfici (DSM) - Vegetazione - (WGS84). Regione Autonoma della Sardegna. URL: <http://www.sardegnageoportale.it/webgis/catalogodati/metadatiDC?idMetadato=12415&idEnte=1>. Data di accesso: 14 ottobre 2014.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale*.

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

- RAS, 2011b. Modello Digitale del Terreno (DTM) - (WGS84). Regione Autonoma della Sardegna. URL: <http://www.sardegnaeopoportale.it/webgis/catalogodati/metadatiDC?idMetadato=12416&idEnte=1>. Data di accesso: 14 ottobre 2014.
- RAS, 2011c. Ortofoto 2008 - sezioni Lotto Nord e Sud. Regione Autonoma della Sardegna. URL: <http://www.sardegnaeopoportale.it/webgis/catalogodati/metadatiDC?idMetadato=12724&idEnte=1>. Data di accesso: 14 ottobre 2014.
- Ras, 2014. Sardegna Geoportale. URL: <http://www.sardegnaeopoportale.it/>. Data di accesso: 14 ottobre 2014.
- RiDendroSar, 2012. Strumenti dendrometrici necessari alla gestione forestale sostenibile e alla valorizzazione, anche economica, dei boschi della Sardegna. URL: <https://sites.google.com/site/ridendrosar/home>. Data di accesso: 12 settembre 2014.
- Ritchie J. C., Evans D. L., Jacobs D., Everitt J. H., Weltz M. A., 1993. Measuring canopy structure with an airborne laser altimeter. *Transactions of the ASAE* 36: 1235-1238
- Rodriguez F., Maire E., Courjault-Radé P., Darrozes J. The Black Top Hat function applied to a DEM: A tool to estimate recent incision in a mountainous watershed (Estibère watershed, Central Pyrenees). *Geophysical Research Letters* 29 (6): 9-1-9-4
- Schmidt J., Hewitt A., 2004. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position . *Geoderma* 121: 243-256
- Smith J. W., Siderelis C., Moore R. L., Anderson D. H., 2012. The effects of place meanings and social capital on desired forest management outcomes: A stated preference experiment. *Landscape and Urban Planning* 106: 207-218
- 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. 412 pp.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale.*

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.

- UNCCD, 2012. United Nations Convention to Combat Desertification. Thematic Priorities. URL: <http://www.unccd.int/en/programmes/Thematic-Priorities/Pages/default.aspx>. Data di accesso: 14 ottobre 2014.
- Vastaranta, M.; Kankare, V.; Holopainen, M.; Yu, X.; Hyyppä, J.; Hyyppä, H., 2012. Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67:73–79.
- Wallace L., Musk R., Lucieer A., 2014. An Assessment of the Repeatability of Automatic Forest Inventory Metrics Derived From UAV-Borne Laser Scanning Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52 (11): 7160-7169.
- Watt M. S., Meredith A., Watt P., Gunn A., 2013. Use of LiDAR to estimate stand characteristics for thinning operations in young Douglas-fir plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science* 43:18.
- Weiskittel, Aaron R.; Hann, David W.; Kershaw, John A. Jr; and Vanclay, Jerome K., 2011. *Forest Growth and Yield Modeling*. Wiley and Blackwell, London, UK, pp. 415
- White J. C., Wulder M. A., Varhola A., Vastaranta M., Coops N. C., Cook B. D., Pitt D., Woods M., 2013. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using the area-based approach (version 2.0). Canadian Forest Service, The Canadian Wood Fibre Center, Natural Resources Canada.
- White J. C., Wulder M. A., Vastaranta M., Coops N. C., Pitt D., Woods M., 2013. The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with Airborne Laser Scanning. *Forests* 4: 518-536
- Woods, M.; Pitt, D.; Penner, M.; Lim, K.; Nesbitt, D.; Etheridge, D.; Treitz, P., 2011. Operational implementation of a LiDAR inventory in boreal Ontario. *The Forestry Chronicle* 87(4):512–528.

Marco Mura. *Tecniche innovative per l'inventariazione e il monitoraggio, l'implementazione dell'approccio sistemico nella gestione forestale*.

Tesi di dottorato in Monitoraggio e Controllo degli Ecosistemi Forestali in Ambiente Mediterraneo, Università degli Studi di Sassari.