

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2021/2022



Tesi di Laurea Magistrale

Analisi e valutazione della biomassa riparia con l'ausilio delle tecniche di remote sensing

Caso studio del torrente Orco

Relatori

Prof. Carlo Camporeale
Ing. Melissa Latella

Candidato

Tommaso Raimondo

Marzo 2022

Non ci si bagna mai due volte nello stesso fiume.

Abstract

La vegetazione riparia assume un ruolo chiave nel supportare l'ecosistema in cui si inserisce ed influisce direttamente ed indirettamente sul comportamento morfologico dei corsi d'acqua. L'*eco-morfodinamica*, cioè la scienza che studia l'interazione fra la vegetazione riparia ed i componenti abiotici dell'ambiente fluviale (es. i sedimenti e l'acqua), ha recentemente iniziato a promuovere il monitoraggio della biomassa ripariale e della distribuzione spaziale delle specie come importante fonte di informazioni per la gestione di questi ecosistemi.

Le indagini di campo sono di supporto all'attività di monitoraggio, ma richiedono tempo, strumenti adeguati e non sempre sono facilmente attuabili logisticamente. Il *remote sensing* si è rivelato negli ultimi anni uno strumento innovativo e indispensabile laddove si necessiti di grandi quantità di dati su aree estese, abbattendo così i tempi ed i costi legati all'acquisizione in campo. Tuttavia, nonostante il grande avanzamento delle tecniche di analisi dei dati di remote sensing per monitorare le foreste e le risorse idriche, l'applicazione di tali tecniche in ambito fluviale deve ancora essere del tutto esplorato. Infatti, le tradizionali tecniche di identificazione di alberi non possono essere applicate dove la frequenza di inondazione è tale da prevenire il raggiungimento di uno stadio maturo da parte delle piante presenti e la vegetazione è principalmente arbustiva.

Nel presente lavoro di tesi si propone una metodologia che possa essere di aiuto nella valutazione della biomassa fuori terra in ambito ripariale. Lo studio è stato condotto su un segmento del torrente Orco (in Piemonte). La tecnica remote sensing di riferimento è il Light Detection and Ranging (LiDAR). I dati LiDAR utilizzati sono stati acquisiti con Airborne Laser Scanner (ALS) e Terrestrial Laser Scanner (TLS) con la collaborazione di *CNR-IRPI* e *Politecnico di Torino*. Durante il lavoro, sono state effettuate misure dirette in campo grazie alle quali è stata calibrata e testata una tecnica volta alla ricostruzione della geometria di specie arbustive a partire da una nuvola di punti georiferita, come quella fornita dal LiDAR. Comparando i risultati ottenuti considerando sia i dati ALS che TLS, si è osservato come i primi portino ad un'accuratezza minore nella stima della geometria dell'arbusto, ma siano comunque indispensabili per rilievi su ampia scala, mentre i secondi portano a risultati più robusti, ma consentono solamente indagini puntuali.

Una volta calibrata la tecnica di ricostruzione del volume di una singola pianta, la metodologia è stata allargata includendo la localizzazione degli individui arborei e il riconoscimento di cluster arbustivi tramite ortofoto, in modo da poter analizzare aree

estese. Come esempio applicativo, la metodologia è stata implementata su una barra fluviale all'interno del sito di studio, per il quale sono disponibili dati ALS relativi agli anni 2019 e 2021. Il confronto fra le mappe ottenute per i due diversi anni ha sottolineato il cambiamento subito dalla vegetazione ed i processi antropici e naturali che si sono verificati, difficilmente individuabili tramite le sole osservazioni in campo o l'analisi visiva delle ortofoto disponibili.

Nonostante il presente lavoro di tesi si inserisca nell'ambito dell'ecomorfodinamica fluviale, la metodologia sviluppata può trovare applicazione anche in altri ambiti, ad esempio nel monitoraggio delle emissioni di carbonio o nel settore selvicolturale.

Indice

1	Introduzione	1
2	Remote Sensing e vegetazione	4
2.1	Tecnologie e fondamenti di Remote Sensing	4
2.1.1	Airborne Laser Scanner	5
2.1.2	Terrestrial Laser Scanner	8
2.2	Stato dell'arte	9
I	Metodologia e taratura del modello per il calcolo della biomassa di un singolo arbusto	15
3	Inquadramento geomorfologico dell'area studio	16
3.1	Area di studio - segmento finale del torrente Orco	16
3.2	Sub-area di studio - una barra stabile	18
4	Reperimento dei dati	21
4.1	Misure in Campo (FM - Field Measurements)	21
4.2	Airborne Laser Scanner (ALS)	23
4.3	Terrestrial Laser Scanner (TLS)	26
5	Metodologia	29
5.1	Calcolo del volume con <i>Concave Hull Slicing Method Algorithm</i>	29
5.2	La funzione <i>ConcaveHull</i>	31
5.3	Confronto tra volumi ottenuti e volumi misurati	33
6	Risultati	35
6.1	Confronto tra le grandezze di rilievo	35
6.2	Valutazione degli errori sulle grandezze di interesse	37
7	Discussione	42
7.1	Stima delle dimensioni geometriche degli arbusti e della biomassa	42
7.2	Influenza delle caratteristiche dei dati di input	45
7.3	Analisi sensitiva (influenza dei parametri di settaggio)	48

7.4	Coefficiente di correzione per il volume da ALS	49
7.5	Confronto con le formule di letteratura	51
7.6	Correlazione fra la densità di biomassa e densità di punti della nuvola LiDAR	53
7.7	Potenzialità e limitazioni dell'approccio	56
II	Metodologia su ampia scala	58
8	Estensione dell'algoritmo per l'analisi su ampia scala	59
8.1	<i>Extensive Biomass Estimation</i> Algorithm (EBE)	59
8.1.1	Ricerca della vegetazione in alveo	61
8.1.2	Calcolo della biomassa arbustiva e arborea	65
8.2	Output di EBE	68
8.2.1	Stima dell'incertezza della biomassa areale	70
9	Stima della biomassa sulla barra	72
9.1	Propagazione degli errori sui valori di biomassa areale	76
9.2	Potenzialità e limitazioni dell'approccio esteso ad ampia scala	78
10	Conclusioni	85

Elenco delle tabelle

4.1	Tabella riassuntiva delle misure ottenute in campo, per ciascun arbusto e densità valutata su tali misure.	24
6.1	Valori di altezza massima, massima proiezione areale e volume per ciascun arbusto studiato e per le tre tipologie di rilievo adottate: Field Measurements (FM), Terrestrial Laser Scanner (TLS) e Airborne Laser Scanner(ALS). A questo si aggiungono i valori di volume valutati attraverso formulazioni di letteratura fornite rispettivamente da Brown (1981) e Fernandes and Pereira (1993); Pereira et al. (1995).	36
6.2	Analisi degli errori percentuali (PE) sui valori di volume, altezza e massima area proiettata derivanti dalle nuvole di punti ottenute con Laser Scanner Terrestre (TLS) degli arbusti presi in considerazione nel presente caso studio.	39
6.3	Analisi degli errori percentuali (PE) sui valori di volume, altezza e massima area proiettata derivanti dalle nuvole di punti ottenute con Airborne Laser Scanner (ALS) degli arbusti presi in considerazione nel presente caso studio.	40
6.4	Tabella riassuntiva delle statistiche di errore calcolate per le tre grandezze analizzate e per entrambe le tecniche adottate (ALS e TLS). Si precisa che tali errori sono riferiti a una procedura che adotta un'altezza di strato iniziale pari a 0.3 metri.	41
7.1	Statistiche di errore valutate sulla grandezza volumetrica ottenute considerando una correzione sull'altezza pari a 1.0 m e l'altezza originale. . . .	43
7.2	Statistiche di errore a confronto valutate sulla grandezza volumetrica ottenuta da ALS prima e dopo la correzione attraverso la l'equazione 7.1.	51
7.3	Valori di densità volumetrica ottenuti dalle misurazioni in campo attraverso il metodo descritto in 4.2 a confronto con i valori di densità valutati attraverso le formule proposte da Brown (1981) e Pereira et al. (1995). . .	52
8.1	Tabella riassunti dei parametri in input relativi al presente caso studio. . .	62
8.2	Tabella riassuntiva dei parametri utilizzati per la relazione allometrica e la densità del legno fresco (gwd) per ciascuna specie presente.	66

Elenco delle figure

2.1	(A) Schema esemplificativo dell'acquisizione attraverso tecnologia LiDAR aerotrasportata; (B) Acquisizione di un elemento vegetale in elevazione; (C) Geometria equivalente dell'impronta. Fonte: Lemmens (2011).	7
2.2	(A) Nuvola di punti a seguito dell'acquisizione; (B) Modellazione della nuvola di punti attraverso AMS3D method; (C,D) Canopy Density Model normalizzato dell'area di interesse. Fonte: Ferraz et al. (2016).	11
2.3	(A) Procedimento utilizzato per le misure in campo; (B) Mesh definita attraverso la funzione <i>boundary</i> di <i>Matlab</i> ; (C) Variazione della mesh in funzione dello <i>Shrink Factor</i> . Fonte: Patrick and Li (2017).	13
2.4	(A) 3D Convex Hull method; (B) 3D Alpha Shape method; (C) 3D Convex Hull by Slices; (D) Voxel-Based method. Fonte: Yan et al. (2012)	14
3.1	Bacino idrografico del torrente Orco (B) ubicato nell'area alpina nordoccidentale dell'Italia (A).	17
3.2	(A) Segmento oggetto di studio su ambia scala; (B) Inquadramento dell'area studio per la taratura del modello, una barra stabile ubicata sul torrente Orco in località San Benigno Canavese [45°14'45.97"N - 7°48'29.67"E]; (C) Arbusti oggetto delle misurazioni in campo.	19
3.3	I dati idrometrici sono relativi alla stazione presente in località San Benigno Canavese sull'attraversamento della SP40. L'idrogramma (B) mostra la serie storica delle portate medie giornaliere tra il 28 Febbraio del 2019 e il 20 Marzo del 2021 periodo intercorso tra le due acquisizioni LiDAR.	20
3.4	Esempio di due arbusti (<i>Populus tremula</i> L.) soggetti a fenomeno di inondazione nel tempo e caratterizzati da una crescita sviluppata secondo la direzione del flusso. In basso si osserva la presenza di un marker posizionato durante i rilievi con TLS per la geo-localizzazione con sistema GPS stand-alone.	20
4.1	Esempio di due arbusti analizzati in sito appartenenti alle specie <i>Populus tremula</i> L. (A) e <i>Salix alba</i> L. (B) opportunamente marcati con nastro durante i rilievi.	22

4.2	Schema esemplificativo della metodologia adottata in sito per la misurazione del volume complessivo di un singolo arbusto. Partendo dal basso e muovendosi verso l'alto, si individuano strati omogenei in larghezza, di altezza dH variabile, approssimando la geometria ad una circonferenza costante. Questo metodo ricalca quanto operato dall'algoritmo utilizzato per le analisi delle nuvole ALS e TLS.	23
4.3	In (A) viene mostrato il materiale ligneo estratto dall'arbusto prossimo a essere pesato; in (B), lo strumento utilizzato per la valutazione della massa (bilancia con sensibilità = 1 g); in (C), preparazione del fogliame su teli, pronto per essere pesato.	24
4.4	Campagna di acquisizione LiDAR effettuata in data 23 Marzo 2021; in figura viene mostrata una porzione della macro area soggetta a telerilevamento contenente l'area di studio.	25
4.5	Laser scanner terrestre Riegl VZ-400i equipaggiato con una camera Nikon D800 (A); rilievi in campo relativi al 20 Maggio 2021 (B).	27
5.1	Nuvola di punti rappresentativa dell'arbusto PT08 ottenuta attraverso ALS (A) e TLS (B). Entrambe le nuvole sono mostrate a seguito del processamento attraverso il codice di calcolo con metodologia <i>Concave Hull Slicing Method</i> ; gli strati definitivi identificati dall'algoritmo sono rappresentati da colori diversi.	31
5.2	(A) La funzione <i>ConcaveHull</i> individua il punto di partenza (<i>FirstPoint</i>) come quello avente coordinata y minore; successivamente, seleziona fra i k punti più vicini, quello con l'angolo maggiore misurato in senso antiorario (<i>CurrentPoint</i>). (B) Il contorno della nuvola viene progressivamente definito fino a quando (C) il punto di partenza risulta essere il nuovo <i>CurrentPoint</i> (Moreira and Santos, 2007).	33
6.1	(A) Confronto tra le altezze misurate in sito e i valori ottenuti attraverso le due tecniche di remote sensing. (B) Confronto tra le aree massime calcolate e misurate. (C) Confronto tra i volumi ottenuti da codice e misurati in campo. (D) Confronto tra biomassa misurata in campo e numero di punti caratterizzanti la nuvola. In questa figura, i salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolari pieno e triangolare, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde, calcolo con formula di Brown (1981) in giallo).	37
6.2	(A) Rappresentazione dell'andamento della densità di biomassa calcolata attraverso le misure in campo in relazione alla densità di punti su unità di volume restituita dalle due tecniche ALS e TLS per entrambe le specie. (B) Andamento della biomassa direttamente calcolata in sito in relazione al numero di punti costituente la nuvola rappresentativa dell'arbusto in esame. I salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolare pieno e triangolare, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde)	38

7.1	Confronto tra volume calcolato da ALS e volume <i>corretto</i> per <i>Salix alba</i> L. (A) e per <i>Populus tremula</i> L. (B).	43
7.2	In (A) si ricerca una correlazione lineare sui volumi per gli arbusti di <i>Salix alba</i> L. presi in esame per TLS e ALS; in (B) si ricerca una correlazione lineare sui volumi per gli arbusti di <i>Populus tremula</i> L.; in (C) si ricerca una correlazione lineare considerando entrambe le specie. I salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolari e triangolari, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde).	44
7.3	In (A) si ricerca una correlazione lineare sulla biomassa per gli arbusti di <i>Salix alba</i> L. presi in esame per TLS e ALS; in (B) si ricerca una correlazione lineare sulla biomassa per gli arbusti di <i>Populus tremula</i> L.; in (C) si ricerca una correlazione lineare considerando entrambe le specie. I salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolare pieno e triangolare, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde).	46
7.4	Relazione fra il numero di punti e l'errore percentuale valutato per ciascun arbusto prendendo in considerazione l'altezza (A), la massima area proiettata (B), il volume (C) e la biomassa stimata (D) e non tenendo in conto la correzione sul volume definita in 7.4. I salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolari e triangolari, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde).	47
7.5	In (A) si mostra la variazione delle metriche di errore adottando un' altezza del layer di suddivisione iniziale (dH) della nuvola crescente; in (B) si osserva l' andamento della variazione percentuale degli errori metrici MBE, MAE e RMSE, calcolati rispetto a dH=0.1 m, in relazione alla variazione di altezza iniziale (dH) scelta per l'i-esimo strato, valutati per le due tecniche di acquisizione; in (D) invece si osserva l' andamento della variazione percentuale, rispetto a dH=0.1 metri, del tempo di computazione al variare del valore di dH scelto, per le due tecniche di acquisizione. Anche in questo caso, in verde ALS e in rosso TLS.	49
7.6	In figura si osserva la distribuzione dei volumi valutati dal codice di calcolo per le nuvole ALS e successivamente corretti con la relazione descritta dall'equazione 7.1. La retta di correlazione risulta circa equivalente alla retta di well fitting stabilità rispetto alle misure in campo, riportando una valore di R^2 pari a 0.84.	50
7.7	Correlazione tra densità di biomassa e numero di punti su unità di volume con valutazione del valore di adjusted R^2 per <i>Salix Alba</i> L. e <i>Populus Tremula</i> L. attraverso l'utilizzo delle due tecniche ALS e TLS. I salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolare pieno e triangolare, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde).	55
8.1	Flow Chart relativo all'algorithmo EBE (<i>Extensive Biomass Estimation</i>).	60

8.2	Ortofoto dell'area studio relative all'anno 2019 (A) e 2021 (B) a seguito di <i>image - processing</i> per aumentare il contrasto tra aree vegetate e non vegetate.	63
8.3	(A) Ortofoto dell'area di interesse con delimitazione del canale attivo e dell'alveo riattivabile; (B) Dettaglio della Logical Matrix dove le celle bianche indicano le aree rispettose dei valori RGB ricercati. Si osserva come vi è stato preso in considerazione solo l'alveo al netto dei canali attivi (canali interessati dal deflusso) al momento del volo.	64
8.4	(A) Attraverso la funzione "bwboundery" si individuano i poligoni sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi RGB; (B) i poligoni vengono corretti con un buffer circolare di raggio 1 metro (valore medio osservato attraverso le misure in campo); (C) attraverso un unione si ottengono le maschere poligonali di progetto (i poligoni in evoluzione sono evidenziati dal tratto continuo di colore verde).	65
8.5	In (A) si mostra la carta Forestale estratta per il segmento del torrente Orco in esame oggetto di telerilevamento. Nella sotto area studio (B) si osserva la presenza abbondante di boschi di robinie miste a pioppi e una piccola area di querce miste a carpini relativamente lontane dall'alveo. . .	67
8.6	In (A) si mostra una area ristretta esemplificativa della barra scelta come caso studio; (B) mostra l'output del file ITDM per l'individuazione degli alberi maturi esclusi dalla matrice logica; in (C) si osserva l'output delle due procedure adottate per l'individuazione degli alberi maturi all'interno ed all'esterno dell'alveo; infine in (D) si mostra la matrice logica ottenuta in EBE al netto delle superfici occupate dagli individui maturi.	68
9.1	In (A) si mostra la configurazione della barra stabile nell'anno 2019 e l'area di interesse (AOI) considerata per lo studio mentre in (B) lo scenario relativo all'anno 2021. In (C) si evidenziano i processi evolutivi in atto sulla barra, osservati anche durante le indagini in sito.	72
9.2	In (A) si osserva la distribuzione delle specie mature sull'area studio in corrispondenza dello scenario presente nell'anno 2019 mentre in (B) in corrispondenza dello scenario presente nell'anno 2021.	75
9.3	In (A) si osserva la distribuzione delle specie arbustive sull'area studio, in corrispondenza dello scenario presente nell'anno 2019 e in corrispondenza dello scenario presente nell'anno 2021 (B).	77
9.4	Mappa della distribuzione della biomassa areale [kg/m ²] corrispondente all'anno 2019.	80
9.5	Mappa della distribuzione della biomassa areale [kg/m ²] corrispondente all'anno 2021.	81
9.6	Mappa della distribuzione della biomassa areale [kg/m ²] corrispondente alle differenze intercorse tra i due anni oggetto di rilievo.	82
9.7	Mappa della distribuzione del coefficiente di variazione ($\sigma(B)/E[B]$) associato alla biomassa areale corrispondente all'anno 2019.	83

9.8 Mappa della distribuzione del coefficiente di variazione ($\sigma(B)/E[B]$) associato alla biomassa areale corrispondente all'anno 2021. 84

Capitolo 1

Introduzione

Le aree ripariali costituiscono l'insieme degli ecotoni all'interfaccia tra l'alveo fluviale e gli ecosistemi terrestri limitrofi, anche definite zone transizionali acquatiche-terrestri (ATTZ) e rappresentano un elemento importante per lo sviluppo della biodiversità. Lo studio mirato alla gestione di questi corridoi si basa su diverse attività come la modellazione del complesso sistema in cui si inseriscono, la progettazione degli interventi a supporto dell'ecosistema e il monitoraggio.

Negli ultimi decenni, il controllo ed il ripristino dei corsi d'acqua si sono mostrati sempre più necessari per la gestione delle inondazioni, la tutela del paesaggio ed il corretto sviluppo dell'habitat. Questi obiettivi vengono perseguiti da varie normative e programmi nazionali ed internazionali come *European Habitat*, *Water Framework* e *European Biodiversity Strategy for 2030*.

Un ruolo centrale nell'evoluzione ripariale è assunto dalla vegetazione che si accresce e si sviluppa nelle pianure inondabili o nelle immediate vicinanze dell'alveo. Le dinamiche che intercorrono nei pattern di vegetazione sono materia di ricerca dell'ecomorfodinamica fluviale, cioè lo studio dell'insieme dei processi naturali che influiscono sulla variazione morfologica spazio-temporale dei corsi d'acqua.

Tradizionalmente, la vegetazione era vista come un elemento capace di alterare la resistenza al flusso e quindi influire passivamente sulla morfodinamica dei fiumi; al contempo, si identificavano come soli responsabili dell'assetto del corso i fenomeni di erosione, di trasporto e deposito (Corenblit et al., 2009; Camporeale et al., 2013; Bertoldi et al., 2014; Kui et al., 2014).

Negli anni, invece, si è compreso come la vegetazione possa svolgere anche un ruolo attivo. Infatti, la componente apogea della vegetazione può influenzare le caratteristiche idrauliche del flusso e il trasporto di sedimenti, mentre la componente ipogea, costituita dal fitto sistema radicale, può incidere sulle proprietà idrauliche e meccaniche del substrato facendo variare così le caratteristiche di erodibilità (Gurnell, 2014; Solari et al., 2016). Inoltre, i processi vegetativi e quelli idromorfologici hanno mostrato variazioni temporali simili. Come esempio si può osservare che i processi di erosione-sedimentazione e l'insorgere di una copertura vegetale completa hanno scale temporali

paragonabili, quindi la continua interazione tra questi due fenomeni è di cruciale importanza per la comprensione e la predizione di tali processi dinamici (Camporeale et al., 2013).

Come sostenuto da Solari et al. (2016) la vegetazione interagisce con il sistema fluviale circostante secondo quattro modalità:

- effetto della vegetazione sull'idromorfodinamica: include gli effetti legati alla resistenza al flusso, il trasporto di sedimento e l'accrescimento o l'erosione delle arginature;
- effetto dell'idromorfodinamica sulla vegetazione: include l'influenza dei fattori idromorfologici sui diversi stadi evolutivi delle piante, dalla disseminazione, alla crescita, sino alla morte;
- interazione tra la vegetazione e l'idromorfodinamica: porta a determinati processi come la capacità di favorire la stabilità delle arginature e ridurre l'erosione spondale;
- interazione tra vegetazione e deflusso sotterraneo: genera forti legami tra l'accrescimento della vegetazione e la variazione di connettività sub-superficiale.

Oggi, gli ecosistemi ripariali stanno subendo forti minacce dovute all'importante sviluppo antropico, principalmente causato dalla crescita della popolazione e dall'incremento dello sfruttamento delle risorse idriche (Gordon et al., 2018; Vörösmarty et al., 2010; Latella et al., 2020). In tutto ciò l'evoluzione degli ecosistemi ripariali è fortemente influenzata dalle variazioni idrologiche causate dai sempre più evidenti cambiamenti climatici.

A fronte di queste considerazioni, si comprende l'utilità di uno studio dettagliato della vegetazione, il suo censimento e il suo monitoraggio nell'ambito delle scienze fluviali.

Le indagini dirette hanno costituito per lungo tempo l'unico metodo per caratterizzare la vegetazione. Tuttavia, tali indagini risultano strettamente limitanti ed onerose soprattutto se si ha la necessità di avere informazioni su ampia scala o in aree difficilmente accessibili (Michez et al., 2017).

Una soluzione alternativa è emersa recentemente grazie al diffondersi delle tecniche di *remote sensing*. Negli ultimi anni infatti l'utilizzo di strumenti di telerilevamento come LiDAR (*Light Detection And Ranging*) hanno trovato largo impiego in diverse applicazioni nel mondo ingegneristico e della ricerca. L'utilizzo di questa tecnologia ha permesso di abbattere notevolmente il tempo e i costi al quanto onerosi caratteristici delle tradizionali misure in campo e fornire al contempo grandi quantità di dati (Tomsett and Leyland, 2019). In ambito forestale, agrario e selvicolturale si è rivelato estremamente utile per diverse attività quali la mappatura della vegetazione, il monitoraggio delle colture, il censimento e la quantificazione del legname presente in aree boschive, sia per produzione che per prevenzione dagli incendi, oltre che per ricerche e studi sulla quantificazione di emissioni e stoccaggio di CO₂.

Il presente lavoro di tesi si inserisce a supporto della ricerca sul tema dell'ecomorfodinamica fluviale e del ruolo che la vegetazione riparia svolge nei confronti dei complessi fenomeni morfologici che caratterizzano i corsi d'acqua. Mappare la biomassa della vegetazione riparia è un'attività fondamentale per comprendere l'impatto ed il ruolo che le piante hanno in questi ecosistemi. Nei corridoi ripari, la vegetazione non include solo alberi maturi, ma anche individui di dimensioni più contenute classificabili principalmente come arbusti. Pertanto, si è definita una metodologia volta a individuare e quantificare la biomassa vegetale in alveo sia nel caso di alberi maturi che individui più giovani sulla base di dati di *remote sensing*, in particolare derivanti da LiDAR aereo (Airborne Laser Scanner, ALS).

La presente tesi si articola come di seguito. Il Capitolo 2 offre una panoramica sulla tecnica LiDAR e le sue applicazioni in ambito forestale. Il Capitolo 3 inquadra l'area di studio, ovvero un tratto del torrente Orco, ubicato nell'area Nord della regione Piemonte in Italia e caratterizzato da una forte dinamicità planimetrica spazio-temporale. Il Capitolo 4 descrive le misure in campo e i dati LiDAR disponibili. Il Capitolo 5 illustra l'approccio metodologico adottato per stimare la biomassa di un singolo arbusto a partire da dati LiDAR, mentre i Capitoli 6-7 i risultati ottenuti tramite esso e la loro discussione, rispettivamente. Il lavoro si conclude con la definizione di una procedura più generale per l'individuazione automatica delle aree vegetate in alveo e la sua applicazione su una barra all'interno dell'area di studio (Capitoli 8 e 9). Nelle conclusioni (Capitolo 10), si sottolinea come l'obiettivo finale del lavoro sia stato quello di individuare e quantificare la biomassa vegetale a scala di un sottotratto fluviale omogeneo per ottenere una mappa completa della biomassa per gli anni 2019 e 2021. I risultati ottenuti sono propedeutici a più ambiti di studio e ricerca, dalle scienze fluviali a quelle forestali.

Capitolo 2

Remote Sensing e vegetazione

Il *remote sensing* ha subito un'importante sviluppo dagli ultimi anni dell '800 fino ad oggi divenendo uno strumento sempre più essenziale per il monitoraggio e la diagnostica di oggetti, luoghi e spazi. Costituisce, in piccola parte, il vasto ambito disciplinare della *geoinformazione* nonché la tecnologia attraverso la quale è possibile trarre misure qualitative e quantitative del mondo che ci circonda attraverso l'utilizzo di sensori eliminando così il contatto diretto con l'oggetto.

Nel presente lavoro, il *remote sensing* svolge un ruolo centrale in quanto principale fonte dei dati necessari all'elaborazione e alla stima della biomassa vegetale in alveo, dati sui quali viene costruita la metodologia proposta.

2.1 Tecnologie e fondamenti di Remote Sensing

Il LiDAR (*Light Detection and Ranging*) è una tecnologia di remote sensing che permette di acquisire dati su ampie superfici di suolo attraverso la produzione di una nuvola di punti, ove ciascuno punto è rappresentativo della posizione e della quota dell'impulso riflesso. E' una tecnologia *attiva* in quanto l'energia misurata, ovvero l'onda elettromagnetica emessa e percepita, non è di natura solare, bensì generata da un apposito sensore.

Anche se l'ascesa del LiDAR come strumento di telerilevamento risale agli anni '60, le sue prime applicazioni a livello sperimentale risalgono agli anni '70. L'accuratezza nel posizionamento rimase il principale problema che fu superata solo negli anni '90 quando il *Global Positioning System* (GPS) divenne uno strumento di geolocalizzazione preciso e affidabile. Il repentino sviluppo della tecnologia LiDAR e le sue potenzialità lo hanno portato a diventare protagonista in diversi settori operativi negli anni 2000. Si è rivelato molto vantaggioso dimostrando alte prestazioni nell'acquisizione dei dati e sugli alti livelli di automazione, fino a produrre ricostruzioni 3D del mondo reale.

La tecnologia LiDAR oggi, può essere integrata con una camera ottica così da ottenere simultaneamente anche un'immagine fotogrammetrica georiferita. Questi sistemi integrati sono utili per creare un sistema di ortofoto di dettaglio con costruzione del

modello 3D dell'oggetto rilevato, oltre che per definire una dettagliata documentazione del rilievo eseguito.

2.1.1 Airborne Laser Scanner

Il sistema di telerilevamento LiDAR può essere aerotrasportato (*Airborne Laser Scanner, ALS*), cioè montato a bordo di una piattaforma mobile, ad esempio aerei monomotore o bimotore, elicotteri o droni. Un sistema GPS integrato permette la geolocalizzazione del punto rilevato al suolo grazie all'ausilio di un sistema di georeferenziazione dettato dalle stazioni a terra e letto dallo strumento stesso. Il funzionamento di questa tecnologia si basa sulla misurazione dell'intervallo di tempo che intercorre tra l'emissione di un impulso ottico fornito da un opportuno sensore e l'istante in cui tale impulso ritorna allo strumento a seguito di una riflessione al suolo. Questo intervallo di tempo può essere direttamente convertito, nota la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica nell'atmosfera, nello spazio che intercorre tra lo strumento stesso ed il punto rilevato per ottenerne così la posizione. Il segnale emesso è un impulso elettromagnetico incluso nello spettro tra l'ultravioletto e l'infrarosso (compreso tra $0.1 \mu\text{m}$ a $2.0 \mu\text{m}$ in lunghezza d'onda) e può variare a seconda dell'impiego che ne viene fatto di tale strumento; spesso lunghezze d'onda più ampie, da $1.5 \mu\text{m}$ a $2.0 \mu\text{m}$, vengono impiegate in ambito meteorologico mentre per la mappatura terrestre si utilizzano lunghezze d'onda del vicino infrarosso (circa $1 \mu\text{m}$). Per misure batimetriche solitamente invece l'impiego di lunghezze d'onda ancora più corte è più comune ($0.5 \mu\text{m}$ - $0,6 \mu\text{m}$) in quanto permettono al segnale di non essere assorbito dall'acqua.

Durante l'acquisizione, il tempo impiegato dal segnale per percorrere lo spazio che intercorre tra lo strumento ed il terreno può essere influenzato da condizioni esterne (atmosferiche, di luminosità) e caratteristiche intrinseche dello strumento, quale la quota di volo o l'angolo di inclinazione dello scanner. Oltre a questo è da tenere in considerazione che non tutte le superfici rispondono agli impulsi nello stesso modo. In particolare, gli elementi antropici (come strade ed edifici) riflettono completamente il segnale, mentre gli specchi d'acqua ne assorbono completamente l'energia evitandone il ritorno e, dunque, l'acquisizione di informazioni utili per il rilevamento della superficie in questione. La vegetazione si comporta in modo ancora diverso. Il segnale viene in parte riflesso dalla struttura fogliare della pianta e in parte penetra all'interno della struttura arborea registrando ulteriori riflessioni sino al suolo. La vegetazione produce quindi dei *primi ritorni* rappresentativi della struttura esterna della pianta, mentre sono definiti ulteriori ritorni quelli che ne definiscono talvolta la struttura interna sino al suolo in base alle caratteristiche dello strumento che viene utilizzato. Nelle aree vegetate si può assistere anche a un numero di ritorni compreso tra 1 e 5 dell'impulso emesso (Means et al., 2000).

I sistemi LiDAR possono essere classificati come sistemi *a ritorno discreto* o *a forma d'onda completa*. I primi registrano ritorni singoli o multipli da un dato impulso laser interpretando i picchi dell'onda riflessa come rappresentativi degli oggetti intercettati, fornendo così una nuvola di punti rappresentativa dell'ostacolo, i secondi invece digitalizzano l'intera onda riflessa restituendo un profilo verticale completo dell'elemento. I sistemi a ritorno discreto sono più frequenti, soprattutto per acquisizione di piccole

aree, mentre i sistemi ad onda completa, sino ad oggi di più difficile impiego, stanno cominciando ad entrare nel mercato (Wulder et al., 2012; Flood, 2001). Esiste inoltre un'ulteriore classificazione in sistemi a *profilazione*, se scansionano solo lungo l'asse verticale immaginario che collega il sensore al terreno o a *scansione* se invece l'acquisizione avviene nei limiti di una fascia orizzontale immaginaria sul terreno che corre su entrambi i lati del sensore e vengono acquisiti serie di profili adiacenti tra loro. Infine, un altro fattore discriminante tra gli strumenti LiDAR è la larghezza della banda laser emessa dallo strumento; questa caratteristica permette di classificarli tra sistemi di *piccola impronta* se il diametro varia tra 0.15 e 1 metro e sistemi a *grande impronta* nel caso in cui il diametro sia maggiore di 10 metri.

A seconda della dimensione della strisciata desiderata e della densità dei ritorni, devono essere opportunamente calibrati e progettati diversi parametri relativi alla piattaforma di supporto dello scanner e del sensore al fine di condurre un'indagine accurata. Tra questi parametri, è necessario definire l'altezza e velocità di volo, la frequenza di acquisizione, l'angolo massimo di scansione e la sovrapposizione tra le strisciate. Generalmente, le applicazioni forestali richiedono angoli di scansione minore di 15° (Andersen et al., 2008). Si nota che i valori di larghezza delle strisciate vengono definite sulla base dell'altezza di volo e dell'angolo di scan, solitamente si utilizza una larghezza di 500 o 1000 metri per applicazioni selvicolturali, e le caratteristiche di acquisizione devono essere definite prima di tali grandezze.

Indipendentemente dalla tipologia di strumento adottato, una tecnologia LiDAR aerotrasportata è caratterizzata da tre elementi principali:

- Il **sensore LiDAR** emette e riceve l'impulso elettromagnetico. I sensori utilizzati nella geomatica applicata alla selvicoltura e alle scienze forestali sono solitamente di *piccola impronta* a ritorno *discreto*, caratterizzati da un frequenza di acquisizione di 200.000 impulsi al secondo, dove, a seconda del modello, lo scanner utilizza un prisma rotante o uno specchio oscillante per indirizzare l'impulso verso l'oggetto target. Il movimento del velivolo su il quale è installato permette di definire la strisciata.
- L'**Inertial Navigation System (INS)**, anche definito come *Inertial Measurement Unit (IMU)*, viene utilizzato per il controllo dei principali movimenti del velivolo quali beccheggio, rollio e imbardata con l'obiettivo di correggere le coordinate rilevate dal GPS o GLONASS (*Russian Global Navigation Satellite System*).
- Un **sistema di posizionamento satellitare globale** di tipo cinematico quali *Global Positioning System (GPS)* o *Global Navigation Satellite System (GNSS)*, per registrare la posizione.

La combinazione di questi strumenti, oltre all'utilizzo di un riferimento temporale accurato (con conseguente riduzione dei bias nella valutazione del tempo che intercorre tra l'emissione e la ricezione di un impulso emesso), permette di georeferenziare correttamente la superficie acquisita.

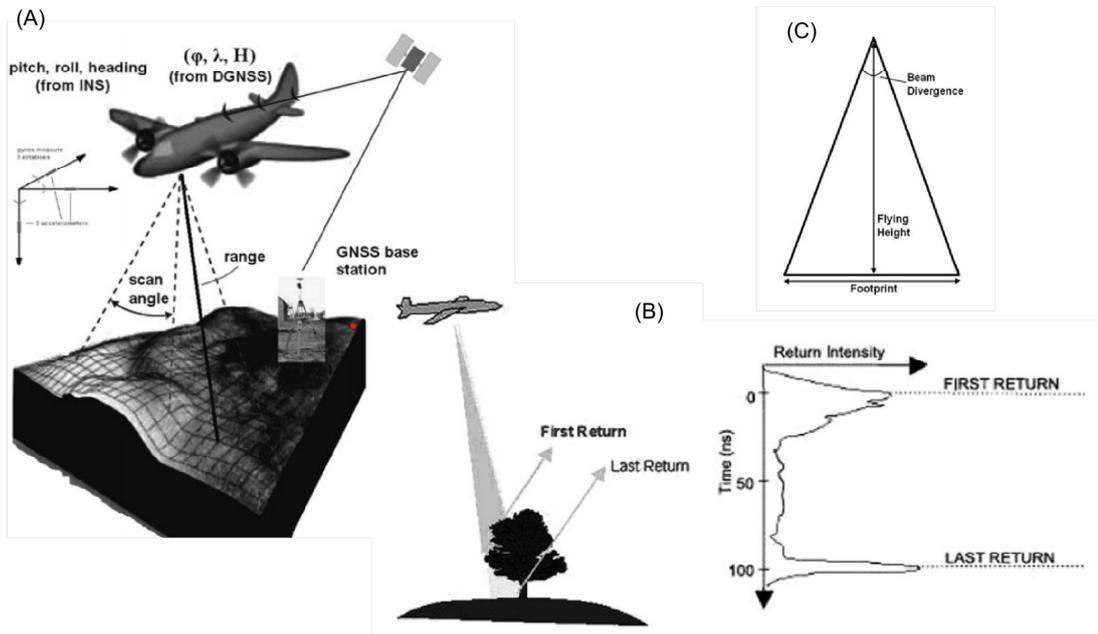


Figura 2.1: (A) Schema esemplificativo dell'acquisizione attraverso tecnologia LiDAR aerotrasportata; (B) Acquisizione di un elemento vegetale in elevazione; (C) Geometria equivalente dell'impronta. Fonte: Lemmens (2011).

Sviluppo e impiego

Il LiDAR aviotrasportato è una delle tecniche più comunemente usate per ricostruire le superfici reali. Le sue numerose applicazioni includono la creazione di accurati modelli digitali di elevazione (DEM) e modelli digitali del terreno (DTM), modelli urbani in 3D per scopi di pianificazione. L'anno 1997 ha visto la nascita del DEM nei Paesi Bassi grazie proprio alla tecnologia LiDAR in volo, sviluppo che ha segnato una svolta per la modellazione, la ricerca sul tema dei cambiamenti climatici e la mappatura delle aree potenzialmente inondabili. La Svezia è stata tra le prime nazioni europee a sviluppare i primi modelli digitali del terreno attraverso acquisizioni LiDAR soprattutto nell'ambito della ricerca sui cambiamenti climatici e tutela del territorio (Lemmens, 2011). Tra gli impieghi commerciali del LiDAR, oggi emergono applicazioni anche in ambito agricolo per lo studio e il monitoraggio della produttività dei campi così come nella selvicoltura per il monitoraggio della crescita, composizione e struttura delle foreste.

2.1.2 Terrestrial Laser Scanner

Il laser scanner terrestre (*Terrestrial Laser Scanner, TLS*) è chiamato tale in quanto montato solitamente su un sostegno appoggiato al suolo quale ad esempio un tre piedi oppure su mezzi di trasporto come auto per riprese cinematiche. A partire dai primi anni 2000, il laser scanner terrestre ha trovato sempre più largo impiego nell'ambito della ricerca e dello sviluppo soprattutto in settori quali topografia, industria, ingegneria, oltre a molteplici applicazioni in ambito territoriale.

Come quanto riportato per il laser scanner aereo, anche il laser scanner terrestre è un sistema di acquisizione attiva emette un impulso elettromagnetico definito monocromatico e consistente a bassissima divergenza, caratterizzato quindi da una ben definita lunghezza d'onda che permane costante. Anche in questo caso, lo strumento è equipaggiato con un sistema di posizionamento globale integrato di tipo statico (GPS o GLONASS) necessario per georeferenziare le acquisizioni secondo un sistema di riferimento locale preventivamente definito.

In generale, la misurazione con sensori laser terrestri può essere basata su quattro principi (Lemmens, 2011):

- *Spostamento di fase*: le onde sono modulate in larghezza o in frequenza; la modulazione della larghezza è sensibile alle discontinuità nette nella forma o nella riflettanza dell'oggetto telerilevato, mentre la modulazione di frequenza fornisce misure affidabili anche quando l'energia di ritorno è bassa. Qui il sensore emette continuamente fasci che sono modulati come onde sinusoidali. La fase della parte riflessa viene misurata e confrontata con la fase di quella in uscita, e la distanza viene calcolata dalla differenza di fase (*spostamento di fase*).
- *Misure a impulsi*, chiamate anche *time-of-flight*: si basano sull'emissione di impulsi dove il tempo che intercorre tra impulso emesso e il suo ritorno viene valutato con l'obiettivo di definire la posizione del punto.
- *Triangolazione ottica*: per applicazioni a corto raggio e su piccoli oggetti.
- *Interferometria*: offre una precisione assai maggiore ed usata spesso nelle applicazioni indoor.

Tra gli elementi principali che caratterizzano le diverse tipologie di laser scanner terrestre, la *portata di misura* è sicuramente discriminante in quanto definisce i campi di applicazione di questi strumenti. La distinzione viene fatta tra laser scanner a *corto raggio*, caratterizzati da una portata di 25 metri, *medio raggio* con portata fino a 250 metri e a *lungo raggio* maggiore di 250 metri. I sistemi a spostamento di fase spesso sono caratterizzati da basse portate accompagnate da una precisione sub-millimetrica o sub-centimetrica e da un'elevata velocità di scansione fino a mezzo milione di punti al secondo, generando così nuvole ad alta densità. Queste vengono solitamente adottate per rilievi di estremo dettaglio. Al contrario invece, strumenti del tipo *time-of-flight* possono acquisire fino a distanza di un 1 km ma con una precisione sub-centimetrica o

addirittura centimetrica e con velocità di scansione assai ridotta, dell'ordine di 10.000 punti al secondo (Lemmens, 2011).

Un altro fattore fondamentale è la *risoluzione spaziale*. Questa determina il livello di dettaglio che può essere ottenuto da un'acquisizione e dipende strettamente dalla portata di acquisizione, dall'intervallo di campionamento e dalla larghezza del raggio laser. In particolare questi ultimi due parametri devono essere adeguatamente calibrati per ottenere la migliore risoluzione (Lemmens, 2011).

Sviluppo e impiego

Negli ultimi decenni il Laser Scanner Terrestre ha subito un'importante evoluzione nella sua tecnologia passando da un impiego in origine legato esclusivamente all'ambito della ricerca e dello sviluppo ad applicazioni nell'ambito tecnico e commerciale. Questo strumento ha permesso di acquisire grandi quantità di dati in poco tempo, fornendo informazioni dettagliate della geometria degli oggetti misurati e consentendo riproduzioni tridimensionali di questi. Viene impiegato per acquisizioni di vario tipo, dal monitoraggio delle infrastrutture e dei beni culturali, all'ambito territoriale e topografico così come in ambito agricolo e selvicolturale. Le acquisizioni da Laser Scanner Terrestre possono essere accompagnate anche da rilievi ortofotografici con l'ausilio di camere. Questo ha permesso di avere una documentazione più dettagliata dell'oggetto misurato, che può portare alla creazione di realtà virtuali molto apprezzate per l'ispezione da remoto di luoghi difficilmente accessibili. Il presente lavoro mostra come questo strumento possa essere di supporto anche per lo studio ed il monitoraggio della vegetazione fornendo informazioni utili per la definizione di modelli geometrici capaci di caratterizzarne la struttura.

2.2 Stato dell'arte

L'impiego della tecnologia LiDAR in ambito ripariale è ascesa notevolmente dall'inizio degli anni 2000. Tuttavia, solo pochi lavori si sono concentrati – e si stanno concentrando – sullo studio e sulla mappatura della struttura della vegetazione e delle caratteristiche fisiche che la descrivono quali, ad esempio, la biomassa vegetale (Latella et al., 2020; Cartisano et al., 2013; Huylenbroeck et al., 2021).

La vegetazione ripariale è caratterizzata da un'alta eterogeneità di individui. Nei corridoi ripariali è possibile trovare specie erbacee, arbusti o alberi di media altezza e veri e propri alberi maturi; distribuiti in base alle aree con diverso grado di umidità, predisposizione agli intensi flussi di piena periodici e alla disponibilità di nutrimento (Gurnell et al., 2012; Bendix and Hupp, 2000).

Il LiDAR ha dimostrato di essere ben funzionale nella localizzazione e analisi di specie arboree mature sia in foreste ripariali che aggregazioni di specie selvicolturali. Per l'analisi e la localizzazione di conifere attraverso i dati LiDAR, l'utilizzo del modello in elevazione delle chiome (*Canopy Height Model*, CHM) si è rivelato adeguato: la superficie interpolata a partire dallo sviluppo delle chiome ottenute dalla nuvola di punti presenta

massimi locali ben rappresentativi della quota massima del singolo individuo i quali, possono essere accuratamente valutati. Per le specie decidue, invece, si è osservato come la nuvola di punti fornita dal rilievo LiDAR risulti localmente più densa in prossimità dei tronchi degli alberi. Questo è legato strettamente alla presenza di una robusta matrice legnosa che, per la sua composizione, registra un numero di ritorni maggiore rispetto all'apparato fogliare, favorendo l'identificazione degli individui sulla base di analisi della densità areale della nuvola di punti (Latella et al., 2021).

Nel caso di piante giovani e arbustive, invece, le metodologie sopra descritte non si adattano bene a causa delle geometrie ridotte. Le dimensioni più contenute di questi individui fanno sì che il rilievo sia definito da una nuvola di punti più dispersa e meno densa rispetto a specie più mature. Nonostante la loro ridotta biomassa individuale, tali piante sono comunque meritevoli di attenzione in quanto occupano largamente l'alveo e le aree limitrofe.

Nessun lavoro di letteratura ha affrontato la valutazione della biomassa arbustiva e cespugliosa nelle fasce riparie, che quindi è ancora un tema di ricerca aperto. Fino ad ora, infatti, sono stati fatti solamente alcuni tentativi alla scala locale, qui di seguito richiamati.

Estornell et al. (2011)

Estornell et al. (2011) hanno valutato la biomassa secca della vegetazione arbustiva in 83 aree in zona mediterranea, più precisamente a Chiva (Valencia, Spagna) utilizzando misurazioni di campo e LiDAR. La specie dominante è *Quercus coccifera*, L., una delle specie caratteristiche delle foreste mediterranee. La biomassa, l'altezza ed il volume della vegetazione arbustiva sono stati stimati dagli autori attraverso modelli di regressione definiti sulle intere aree, modelli basati sulla distribuzione e le quote dei punti della nuvola acquisita. La densità dei dati LiDAR nei popolamenti analizzati varia da 2 punti/m² a 16 punti/m², con una media di 8 punti/m² e una deviazione standard di 4,5 punti/m². I loro risultati hanno sottolineato come la stima della biomassa arbustiva diventi più precisa all'aumentare della densità di punti acquisiti (maggiore di 8 punti/m²) e al diminuire dell'errore nella modellazione del digital terrain model (DTM) (RMSE inferiore a 0.20 metri).

Ferraz et al. (2016)

L'obiettivo di questo lavoro è stato valutare le metriche dendrometriche di specie arboree senza l'utilizzo diretto di misure in sito. Lo studio è stato condotto in un area localizzata a Nord - Ovest del Portogallo. La biomassa fuori terra è stata stimata utilizzando equazioni allometriche esistenti e grandezze geometriche ottenute con rilievi LiDAR (9.5 punti/m²) a livello di singolo albero o di strato forestale (rispettivamente per lo strato superiore o inferiore). Le caratteristiche geometriche della vegetazione, come la densità degli individui in una data area, l'altezza degli alberi, la larghezza della chioma e l'altezza dello strato vegetale, sono state estratte a partire dai dati LiDAR attraverso un metodo chiamato *Adaptive Mean Shift* (AMS3D) elaborato dall'autore stesso. Tale metodo è

stato applicato direttamente alle nuvole di punti definendo alcuni cluster 3D attorno alle nuvole rappresentative di arbusti o chiome di alberi maturi. In particolare, il metodo ha costruito ellissoidi attorno alla struttura dell'individuo identificato. La mappa risultante delle singole chiome mostrata nella Figura 2.2 fornisce le metriche forestali di un singolo strato: densità degli alberi (numero di ellissoidi all'interno della trama forestale normalizzata per la sua area), altezza dell'albero (coordinata z del punto LiDAR più alto assegnato a un dato cluster 3D), lunghezza della corona individuale (distanza tra l'altezza dell'albero e il punto LiDAR più basso del cluster 3D) e l'altezza media degli strati forestali.

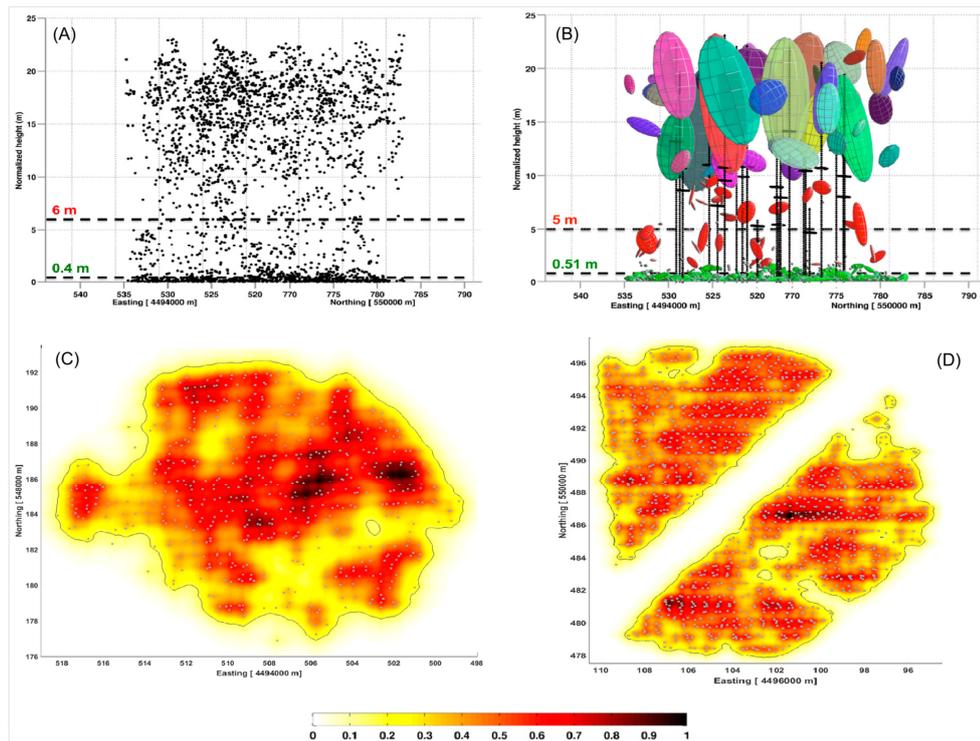


Figura 2.2: (A) Nuvola di punti a seguito dell'acquisizione; (B) Modellazione della nuvola di punti attraverso AMS3D method; (C,D) Canopy Density Model normalizzato dell'area di interesse. Fonte: Ferraz et al. (2016).

Chen et al. (2018)

Questo lavoro si inserisce a supporto della ricerca sulla qualità e sullo sviluppo sostenibile degli ecosistemi definiti vulnerabili conducendo una stima della biomassa arbustiva nelle zone aride di Mu Us tra Cina e Mongolia. L'*Above Ground Biomass* (AGB) è stata stimata utilizzando diversi metodi basati su dati *Landsat Thematic Mapper* (TM), dati topografici ed i dati delle indagini in sito. La stima è stata condotta seguendo modelli di regressione lineare, di regressione multipla graduale, di apprendimento automatico e il

modello ottico geometrico, per confrontare i risultati. I relativi risultati hanno mostrato che l'AGB degli arbusti valutata attraverso un modello di regressione multipla graduale con il *Ratio Vegetation Index* (RVI) e la luminosità dalla trasformazione K-T come variabili di input ha raggiunto la massima precisione, sia per le regioni ad alta che a bassa copertura di arbusti.

Patrick and Li (2017)

In questo lavoro è stata validata l'accuratezza di una metodologia volta alla caratterizzazione morfologica di cespugli di mirtillo attraverso rilievi fotogrammetrici. Questi vengono svolti con un *quadcopter* (drone a quattro eliche di largamente impiegato per acquisizioni di piccole superfici), il quale acquisisce immagini ad alta risoluzione per poi derivarne nuvole di punti tridimensionali. Attraverso le nuvole rappresentative dei diversi cespugli gli autori hanno ricavato le caratteristiche geometrie di ciascuno di essi per poi confrontarle con le misure dirette in campo. In particolare, per la valutazione del volume gli autori hanno utilizzato in ambiente *MatLab* la funzione *boundary* che si è rivelata poi particolarmente interessante anche nel presente lavoro di tesi. L'uso di questa funzione ha portato a condurre un'analisi di sensibilità nei confronti di uno dei parametri di settaggio definito *Shrink Factor* (SF), il quale determina le caratteristiche della mesh 3D che la funzione stessa crea attorno alla nuvola di punti in input (Figura 2.4). Si è visto che all'aumentare del valore di SF il volume diminuisce riducendo la robustezza della correlazione con le misure svolte in campo (R^2 varia da un valore maggiore di 0.9 a un valore minore di 0.8 modificando SF da 0 a 1). Questo è strettamente legato al fatto che le misure dirette prevedono forti approssimazioni nella geometria dell'arbusto spesso non prendendo in considerazione la reale sovrapposizione o disposizione dei rami.

Ulteriori metodologie per il calcolo del volume da una nuvola di punti

Il volume svolge un ruolo importante nella valutazione della biomassa arbustiva a partire da una nuvola di punti. Diverse sono le metodologie proposte negli anni per la stima di questa grandezza, ma non tutte si adattano adeguatamente alle diverse esigenze anche in relazione alle caratteristiche dei dati disponibili.

Tra le tecniche presenti in letteratura emergono le seguenti:

- **3D Convex Hull Method:** è un metodo simile a quanto svolto dalla funzione *boundary* in ambiente *Matlab* e genera una superficie convessa attorno alla nuvola di punti in input (Gupta et al., 2010). Può essere applicato anche a seguito di una segmentazione della nuvola per interpretare al meglio i vuoti ricreati dalla geometria degli alberi, prendendo il nome di *Convex Hull by slices* (Fernández-Sarría et al., 2013). Nonostante la semplicità di questo procedimento, gli studi in letteratura hanno constatato una sovrastima dei valori per geometrie particolari, come quelle degli arbusti (Jiang et al., 2019). Questo accade perché non si considera adeguatamente la presenza di rami che originano vuoti all'interno del volume.

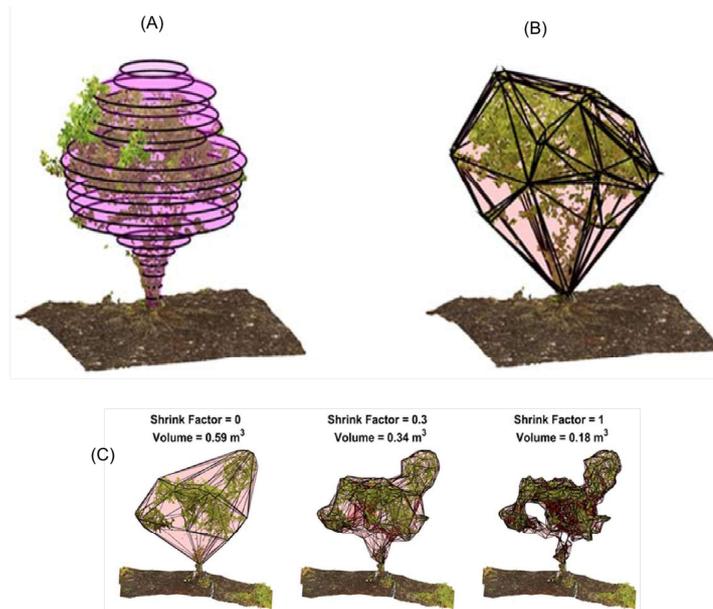


Figura 2.3: (A) Procedimento utilizzato per le misure in campo; (B) Mesh definita attraverso la funzione *boundary* di *Matlab*; (C) Variazione della mesh in funzione dello *Shrink Factor*. Fonte: Patrick and Li (2017).

- Alpha Shape Method:** la geometria viene ricostruita a partire da un insieme di punti (2D o 3D) non ordinati. La forma *alfa* di un insieme finito di punti S è un poliedro chiuso determinato unicamente dai punti appartenenti a S e ad α , parametro che determina il livello di dettaglio del poliedro. Il principio che sta alla base della definizione di questo poliedro può essere immaginato come un cerchio di raggio α che rotola lungo l'esterno di S . Per un valore sufficientemente grande di α , il percorso del cerchio sarà limitato a rimanere tangente ai punti esterni dell'insieme S , mentre un valore basso di α permetterà di definire un contorno concavo più dettagliato (Yan et al., 2019; Korhonen et al., 2013; Vauhkonen et al., 2009). Questo metodo può essere adottato su individui di grosse dimensioni mentre su arbusti o piante giovani la taratura del parametro α risulta più difficile in quanto, se non accuratamente definito, può portare a notevoli sovrastime o sottostime del volume coinvolto.
- Voxel-Based Method:** questo metodo si basa sulla discretizzazione della nuvola in geometrie cubiche di uguali dimensioni sulla base della massima larghezza della nuvola nelle direzioni X e Y e della massima altezza Z . I volumi dei cubi che contengono almeno un punto della nuvola vengono sommati per ottenere il volume coinvolto dalla struttura (Wang et al., 2016; Lecigne et al., 2018; Wu et al., 2013). Gli arbusti o piante di piccole dimensioni sono generalmente rappresentate da nuvole a bassa densità di punti, dunque il presente metodo può portare a notevoli

sottostime. Tra gli svantaggi emerge anche l'alto onere computazionale soprattutto se tale metodologia viene applicata per la stima del volume di specie arboree su ampia scala. Mentre, l'algoritmo risulta più accurato se applicato a nuvole con numero di punti elevato ottenute ad esempio attraverso rilievi TLS.

- **Concave Hull Slicing Method:** in questo metodo, proposto da Yan et al. (2019), viene valutato il volume dell'intera nuvola suddividendola in strati di altezza variabile. Il volume dei singoli strati viene poi sommato per ottenere il volume complessivo coinvolto. Il nome deriva dall'approccio usato per la valutazione dell'area generata dalla proiezione dei punti appartenenti al singolo strato su di un piano orizzontale fittizio come definito da Moreira and Santos (2007). Questa metodologia ha dimostrato un'accuratezza migliore anche su specie di piccola taglia in quanto permette di approssimare più dettagliatamente l'andamento del perimetro dell'arbusto, considerando anche le complesse geometrie definite dai rami spesso sovrapposti. Tale metodo è protagonista del presente lavoro di ricerca per la definizione dei volumi coinvolti nelle nuvole di punti rappresentative degli arbusti acquisiti con strumentazione LiDAR.

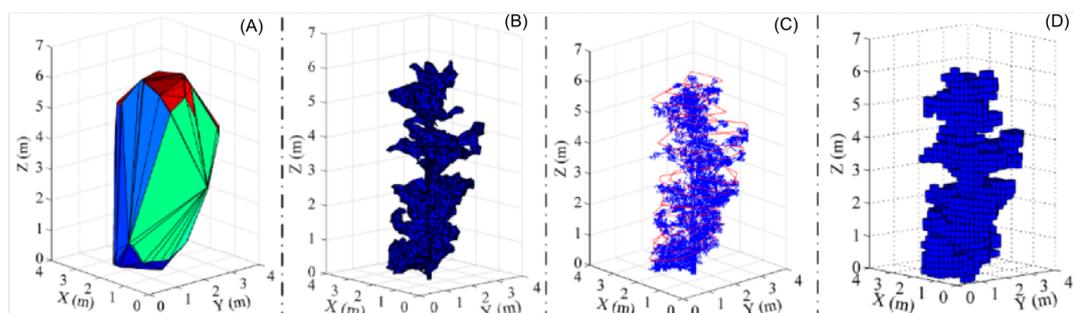


Figura 2.4: (A) 3D Convex Hull method; (B) 3D Alpha Shape method; (C) 3D Convex Hull by Slices; (D) Voxel-Based method. Fonte: Yan et al. (2012)

Parte I

Metodologia e taratura del modello per il calcolo della biomassa di un singolo arbusto

Capitolo 3

Inquadramento geomorfologico dell'area studio

3.1 Area di studio - segmento finale del torrente Orco

Il torrente Orco è lungo 89.57 km e sottende un bacino di circa 930 km² confinato a Nord dal Parco Nazionale del Gran Paradiso, dalla valle della Stura di Lanzo a Sud, dal Parco Nazionale del Vanoise a Ovest e dalla valle Canavese a Est sviluppandosi trasversalmente da Nord - Ovest verso Sud - Est (Figura 3.1C).

Nasce dal Lago Rossett e scorre sul versante meridionale del Gran Paradiso, in direzione Ovest - Est, raccogliendo i primi deflussi.

Il suo bacino è distinto principalmente in due macro unità fisiografiche: un'unità montana e una valliva. La prima caratterizza il territorio dalla sorgente sino alla località di Cuornè, ove immediatamente a monte di tale località l'Orco riceve le acque del torrente Soana, suo principale affluente, mentre a valle riceve le acque del torrente Piova. La seconda unità, invece, accompagna il decorso del torrente sino alla sua confluenza con il fiume Po in località Chivasso. In corrispondenza dell'unità fisiografica montana, caratterizzata da un modellamento di tipo glaciale, il torrente si presenta prevalentemente inciso e confinato tra versanti antichi dei rilievi adiacenti, spesso di natura rocciosa, ed inoltre risulta caratterizzato da forti pendenze che quindi assoggettano il territorio ad eventi di alluvionamento o sovralluvionamento.

A valle del centro abitato di Pont Canavese il corso sfocia nella pianura alluvionale perdendo le sue caratteristiche morfologiche di torrente alpino. Le pendenze si fanno più gradualmente e l'assenza di fianchi montani permette all'alveo di allargarsi. La morfologia del fondovalle è legata principalmente alla dinamica torrentizia caratterizzata da forti fenomeni erosivi ed elevato trasporto di massa. Qui l'alveo ha un andamento pluricursuale con tendenza diffusa alla trasformazione in unicursuale. Tra la fine dell'800 e la metà del '900 la cartografia storica dimostra che l'alveo del torrente Orco raggiungeva localmente anche 800 metri di larghezza sezionale, ma dalla seconda metà del '900, l'aumento dell'antropizzazione ha portato a una brusca riduzione dell'alveo incentivandone l'erosione.

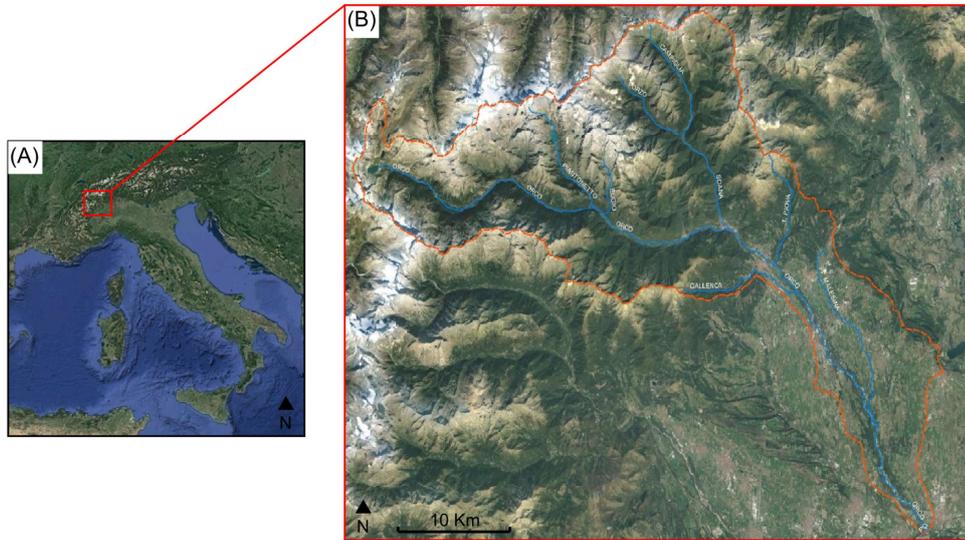


Figura 3.1: Bacino idrografico del torrente Orco (B) ubicato nell'area alpina nordoccidentale dell'Italia (A).

Il segmento del torrente Orco su cui porge l'attenzione il presente lavoro di tesi è compreso tra la località di Courgnè e la confluenza con il Po ed è caratterizzato da una lunghezza di circa 30 km. In questo tratto l'Orco ha un carattere prevalentemente sinuoso, in quanto perde fortemente il confinamento dettato dai rilievi alpini e prealpini, che lo caratterizzavano nei tratti montani, e trova ampio spazio nell'altopiano canavese così da migrare e modificare la sua morfologia. L'alveo si presenta alternato da tratti sub - rettilinei monocursuali e pluricursuali ramificati ed è caratterizzato dall'alternanza di barre laterali e centrali più o meno stabili. La presenza diffusa di canali secondari prevalentemente attivi durante tutto l'anno ha portato alla stabilizzazione di barre centrali le quali si sono fortemente vegetate nel tempo. Tale assetto è il risultato di un processi evolutivo subito negli anni dal corso, con il graduale passaggio da morfologia pluricorsuale a monocorsuale. Infatti, il precedente assetto ramificato del corso è narrato dalla presenza distribuita di rami disattivati, in attuali aree golenali. L'incisione dell'alveo ha portato a un notevole restringimento del canale attivo portando ad abbassamenti locali del thalweg e successiva stabilizzazione delle barre laterali tramite rivegetazione. L'intensa attività morfodinamica del fiume Orco influenza e, a sua volta è influenzata, dalla vegetazione riparia che cresce rigogliosa lungo il suo corso. L'alveo del tratto di fiume investigato è costituito da materiale grossolano con D_{50} di 0.075 m, mediamente assortito, spesso alternato a banchi sabbiosi popolati da vegetazione erbacea.

La pianura Canavese a oggi è soggetta a un basso livello di antropizzazione. Oltre agli insediamenti abitativi, sviluppatasi, in prossimità dell'orlo dei terrazzi antichi del conoide alluvionale, le principali attività di natura antropica riguardano le estrazioni

di inerti, attraverso molteplici cave distribuite lungo l'asta del corso, e pioppiculture insieme a campi ad uso agricolo, che però hanno meno impatto. In questo contesto, il torrente Orco ha sviluppato una forte dinamicità assumendo talvolta anche un andamento meandriforme come si può osservare nei tratti immediatamente a monte della confluenza con il Po e all'altezza delle località di San Benigno Canavese e Foglizzo.

Dal punto di vista idrologico - idraulico, il carattere del corso permane prevalentemente torrentizio in tutto il suo sviluppo essendo comunque caratterizzate da pendenze motrici media di fondo che variano dall'1.03% all'estremo monte fino a circa lo 0.31% a valle. Le precipitazioni intense sono elevate e spesso prive di apporti nevosi consistenti in gran parte del bacino per ampi periodi dell'anno con frequenza maggiore rispetto ai bacini alpini interni. Le precipitazioni medie di lungo periodo che caratterizzano il bacino del torrente Orco vanno dai 900 mm/anno in pianura ai 1800 mm/anno. Le importanti piene autunnali e primaverili, se pur in misura minore alternate a condizioni di magra nei mesi estivi ed invernali, denotano un regime del torrente Orco prevalentemente sublitoraneo/appenninico. L'idrogramma medio annuo si presenta con una portata di circa 21 m³/s, in accordo con la stazione idrometrica di San Benigno Canavese con picchi di portata stagionali variabili da 350 m³/s a 1600 m³/s nei mesi primaverili (Maggio/Giugno) e autunnali (Ottobre/Novembre).

L'area sopraccitata è stata oggetto di telerilevamento con LiDAR aerotrasportato negli anni 2019 e 2021 (Figura 3.2A), operazione condotta dal Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (CNR-IRPI). Questa macro-zona include circa 30 km di asta del torrente Orco da località Cuornè, Piemonte fino alla confluenza con il fiume Po e ha larghezza trasversale di circa 1 km.

3.2 Sub-area di studio - una barra stabile

All'interno dell'area di studio, è stata definita una sub-area costituita da una barra laterale relativamente stabile (Italia nordoccidentale, 45°14'45.97"N - 7°48'29.67"E) distribuita su una superficie di circa 12.6 ha (Figura 3.2B), in località San Benigno Canavese compresa tra l'attraversamento sulla strada SP40 e l'attraversamento sul tratto autostradale E612. La suddetta area è stata scelta in quanto facilmente accessibile con i mezzi e la strumentazione necessaria per i rilievi con laser scanner terrestre, inoltre data la sua stabilità evolutiva ha permesso più misurazioni negli anni.

Pur essendo relativamente stabile, la barra risulta soggetta a forti variazioni morfologiche in relazioni ai regimi idrologici a cui è soggetto il tronco nei diversi periodi dell'anno, presentando anche, in accordo con i rilievi in sito, principi di erosione spondale sia in destra che in sinistra idraulica oltre che a marcata presenza di canali riattivabili nel corso delle piene. La Figura 3.3B mostra la serie storica delle portate medie giornaliere misurate dalla stazione idrometrica in località San Benigno Canavese tra il 2019 ed il 2021, nonché il periodo intercorso tra le due campagne di acquisizione con Airborne Laser Scanner. Si osserva come, in questo arco temporale, l'area di studio sia stata soggetta ad alcune piene di interesse tra i 200 m³/s e 550 m³/s; corrispondenti a eventi con tempo di ritorno compreso tra i 2 e i 5 anni secondo l'analisi condotta e riportata

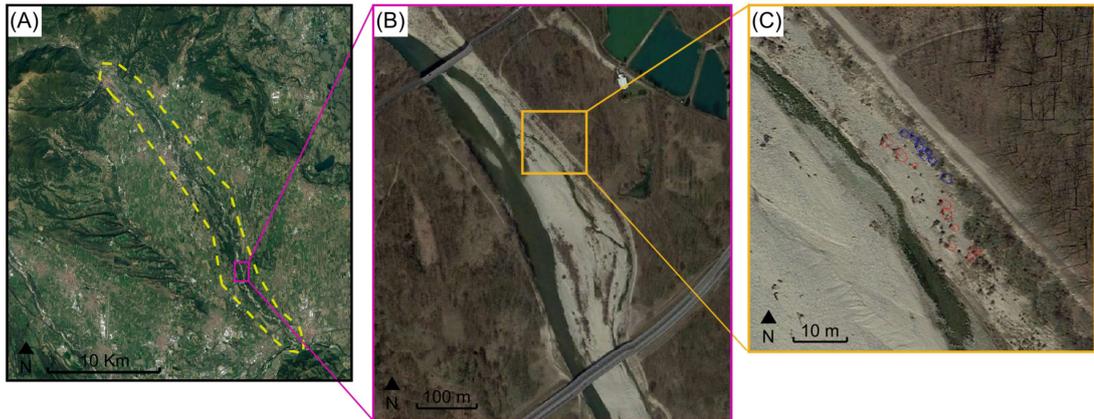


Figura 3.2: (A) Segmento oggetto di studio su ampia scala; (B) Inquadramento dell'area studio per la taratura del modello, una barra stabile ubicata sul torrente Orco in località San Benigno Canavese [$45^{\circ}14'45.97''\text{N}$ - $7^{\circ}48'29.67''\text{E}$]; (C) Arbusti oggetto delle misurazioni in campo.

nel *Piano Gestione dei Sedimenti per il torrente Orco* (AIPO, 2008) e aggiornata nella *Relazione Idrologica-Idraulica torrente Orco* (Politecnico di Torino, 2020). In particolare l'evento più intenso è stato registrato nel Settembre del 2020 con una portata di picco di $515 \text{ m}^3/\text{s}$. Eventi di questo calibro interessano l'intero alveo dell'area presa in esame e sono definiti formativi in quanto responsabili dei cambiamenti morfologici dell'area interessata dal deflusso. Infatti contribuiscono alle variazioni geometriche del canale attivo, talvolta incidendo sulle sponde e sulla quota d'alveo. Costituiscono inoltre un forte elemento di disturbo per gli ecosistemi presenti, andando a determinare cambiamenti nel loro assetto ed influenzando la loro stabilità.

Come hanno dimostrato i sopralluoghi effettuati in sito, il canale attivo risulta perlopiù non vegetato. Mentre la barra, essendo soggetta a periodiche inondazioni, è colonizzata da vegetazione giovane che appartiene a specie riparie decidue di diverso tipo. Tra queste emergono prevalentemente pioppi (*Populus tremula*, L., *Populus nigra*, L., *Populus alba*, L.) e salici (*Salix alba* L., *Salix purpurea* L.). Al contrario, nelle aree golenali e nella pianura inondabile attigua, si ha presenza di individui maturi di salici e pioppi oltre alla presenza di specie tipiche delle presenti latitudini come robinie (*Robinia Pseudoacacia*, L.), querce europee (*Quercus robur*, L.) e carpini (*Carpinus betulus*, L.). Le regolari inondazioni che interessano la barra oggetto di studio fanno sì che le specie presenti in alveo, perlopiù *Populus tremula*, L. e *Salix alba* L., siano di carattere prevalentemente arbustivo, dunque generalmente con altezza ridotta e caratterizzate anche da particolari forme geometriche dettate dai fenomeni di inondazione (ad esempio alcune sono cresciute con una forte inclinazione nel verso di scorrimento dell'acqua).

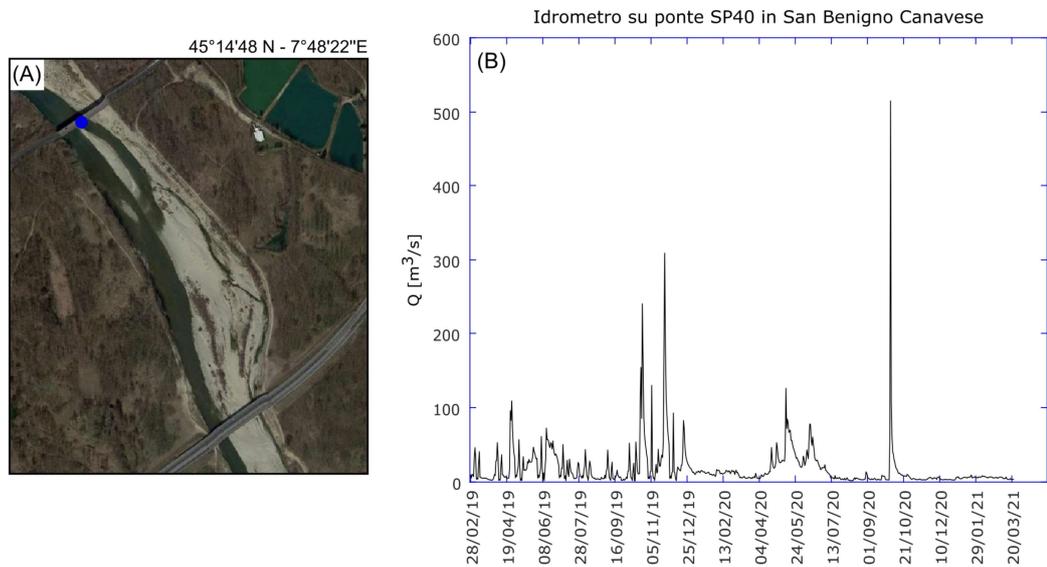


Figura 3.3: I dati idromatrici sono relativi alla stazione presente in località San Benigno Canavese sull'attraversamento della SP40. L'idrogramma (B) mostra la serie storica delle portate medie giornaliere tra il 28 Febbraio del 2019 e il 20 Marzo del 2021 periodo intercorso tra le due acquisizioni LiDAR.

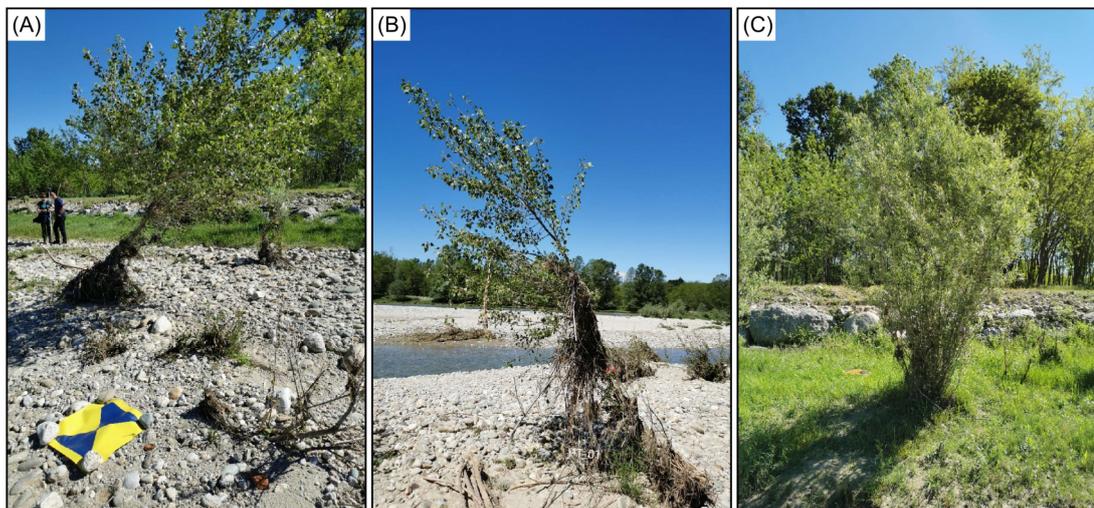


Figura 3.4: Esempio di due arbusti (*Populus tremula* L.) soggetti a fenomeno di inondazione nel tempo e caratterizzati da una crescita sviluppata secondo la direzione del flusso. In basso si osserva la presenza di un marker posizionato durante i rilievi con TLS per la geo-localizzazione con sistema GPS stand-alone.

Capitolo 4

Reperimento dei dati

Nel seguente capitolo vengono illustrate nel dettaglio le metodologie adottate per il reperimento dei dati necessari allo sviluppo di un codice di calcolo propedeutico alla stima della biomassa vegetale in alveo. A tal proposito si è operato integrando le misurazioni derivate da rilievi diretti in campo (FM - *Field Measurements*) con i dati ottenuti attraverso tecnologie di Laser Scanner Aereo (ALS - *Airborne Laser Scanner*) e Laser Scanner Terrestre (TLS - *Terrestrial Laser Scanner*).

4.1 Misure in Campo (FM - Field Measurements)

Per la presente attività di tesi, sono stati presi in esame diciotto arbusti all'interno della sub-area di studio precedentemente definita. In particolare, sono stati selezionati otto arbusti di *Salix alba* L. e dieci arbusti di *Populus tremula* L., relativamente isolati dal resto della vegetazione locale. Tali arbusti sono stati scelti perché distribuiti in due zone adiacenti e contenuti in un raggio al più di 3 m, al fine di agevolare i rilievi effettuati con la tecnologia Laser Scanner Terrestre (Figura 4.1). Gli arbusti selezionati hanno morfologia diversa gli uni dagli altri: alcuni hanno un marcato sviluppo in altezza, tipico dei pioppi, mentre altri, prevalentemente della specie del salice, si sviluppano in larghezza, con una chioma più sferica e, talvolta, sovrapponendosi con gli arbusti adiacenti. La nomenclatura adottata durante il presente lavoro comprende un codice identificativo alfanumerico composto da due lettere indicanti la specie di appartenenza (SA e PT per salici e pioppi, rispettivamente) e un numero progressivo. Le seguenti misurazioni di campo sono state svolte in data 27 Maggio 2021, momento in cui i livelli idrometrici del torrente Orco erano tali da permettere il facile accesso in alveo oltre alla presenza di vegetazione nel pieno della fase vegetativa.

I rilievi in campo hanno previsto la misurazione delle caratteristiche geometriche di ciascun arbusto in termini di altezza massima dal suolo, diametro maggiore e diametro minore nelle due direzioni ortogonali e il volume, caratteristica necessaria per la stima della densità di biomassa vegetale.

Oltre alle sopracitate misure di tipo geometrico è stata valutata la massa di ogni esemplare. Queste misurazioni sono state effettuate con l'ausilio di barre metriche e

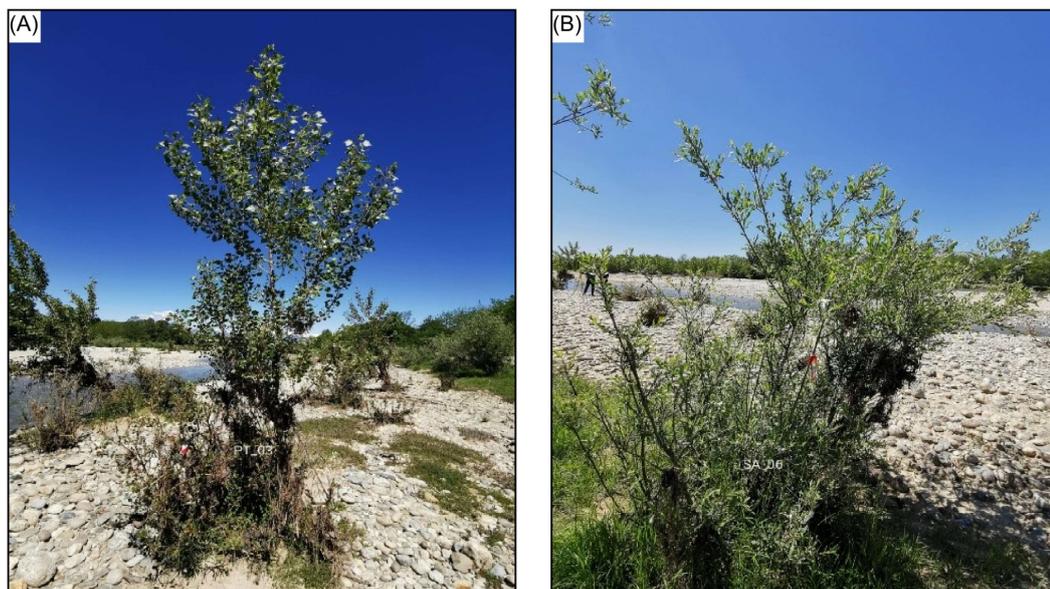


Figura 4.1: Esempio di due arbusti analizzati in sito appartenenti alle specie *Populus tremula* L. (A) e *Salix alba* L. (B) opportunamente marcati con nastro durante i rilievi.

metri a nastro con sensibilità del millimetro e una bilancia con sensibilità pari a 0.001 kg (Figura 4.3B). Le misure di campo sono state svolte cercando di adottare lo stesso criterio utilizzato dall’algoritmo di calcolo implementato con codice Matlab (Capitolo 5) ed applicato ai dati ALS e TLS, con l’obiettivo di ottenere una maggiore corrispondenza tra i metodi adottati e poter comparare correttamente i risultati ottenuti. Seguendo questa direzione, dunque, ogni arbusto è stato suddiviso in strati lungo la sua altezza dove ciascuno di questi caratterizzato da una circonferenza per lo più omogenea (Figura 4.2). La misurazione è iniziata dal basso e, per ogni strato è stato annotato, il valore della sua altezza e della circonferenza media ad esso associata.

Il volume di ogni strato è stato determinato moltiplicando l’altezza di questo per la sua superficie media, e conseguentemente il volume totale di ogni arbusto valutato come la somma dei singoli volumi ottenuti su ogni sezione. Le informazioni relative ai due diametri principali e l’altezza associata alla massima larghezza dell’arbusto sono stati utilizzate per l’applicazione delle equazioni allotropiche definite dagli autori Pereira et al. (1995); Brown (1981); Fernandes and Pereira (1993), le quali hanno fornito valori di *benchmark* per la stima dei volumi.

- *Volume secondo Brown:*

$$V = (2\pi H_c R_1 R_s)/3, \quad (4.1)$$

- *Volume secondo Fernandez - Pereira:*

$$V = (\pi R_1)/(2R_s)/(2H_c), \quad (4.2)$$

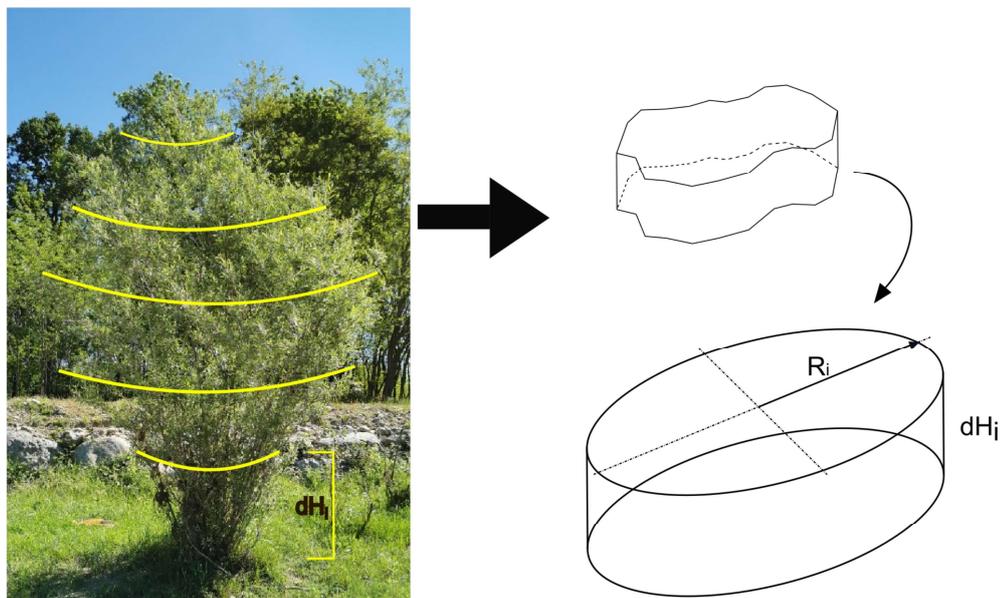


Figura 4.2: Schema esemplificativo della metodologia adottata in sito per la misurazione del volume complessivo di un singolo arbusto. Partendo dal basso e muovendosi verso l'alto, si individuano strati omogenei in larghezza, di altezza dH variabile, approssimando la geometria ad una circonferenza costante. Questo metodo ricalca quanto operato dall' algoritmo utilizzato per le analisi delle nuvole ALS e TLS.

con V volume dell'arbusto, H_c altezza dell'arbusto, R_l raggio dell'arbusto in corrispondenza della larghezza massima, R_s raggio normale a R_l alla stessa altezza.

La valutazione della massa è stata invece condotta andando a tagliare il singolo arbusto alla base. Si tratta di un metodo distruttivo ma necessario per la valutazione di questa grandezza. Da tale misurazione sono stati separati ed esclusi blocchi di materiale secco talvolta presente alla base dell'arbusto, probabilmente trasportati e poi depositati durante gli eventi di piena.

Noti i valori di volume e massa di ciascun arbusto, è stato possibile valutare la densità di biomassa, come mostrato in Tabella 4.1.

4.2 Airborne Laser Scanner (ALS)

I rilievi effettuati tramite Laser Scanner Aereo (ALS) sono stati condotti in data 28 Febbraio 2019 e 23 Marzo 2021 dal *Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica* (CNR-IRPI) attraverso rilevamento con sensore LiDAR (Light Detection And Ranging) aerotrasportato RIEGL LMS-Q680i (LiteMapper 6800) installato su un POD DART con certificazione EASA con approvazione minore/STC per Eurocopter AS350 Heliwest.

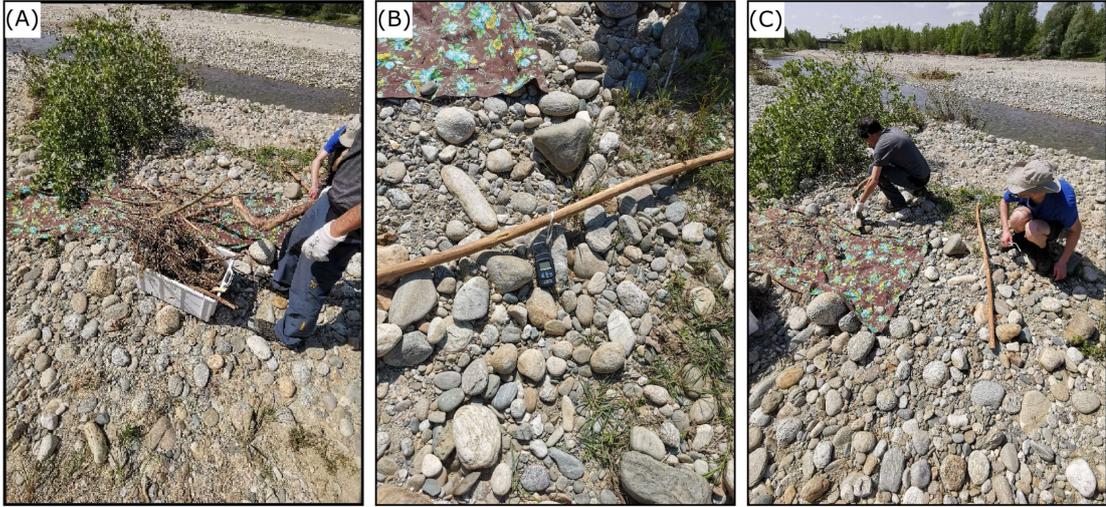


Figura 4.3: In (A) viene mostrato il materiale ligneo estratto dall'arbusto prossimo a essere pesato; in (B), lo strumento utilizzato per la valutazione della massa (bilancia con sensibilità = 1 g); in (C), preparazione del fogliame su teli, pronto per essere pesato.

Tabella 4.1: Tabella riassuntiva delle misure ottenute in campo, per ciascun arbusto e densità valutata su tali misure.

Shrub ID	Altezza (m)	Min. Diametro (m)	Max. Diametro (m)	Area (m ²)	Volume (m ³)	Mass (kg)	Densità (kg/m ³)
SA01	4.25	2.00	2.60	5.48	18.64	20.00	1.07
SA02	1.90	-	-	1.40	1.14	7.21	6.33
SA03	2.40	-	-	0.56	1.06	3.22	3.01
SA04	2.10	1.50	1.50	1.21	2.14	2.55	1.19
SA05	1.55	0.95	1.70	1.47	1.99	3.50	1.76
SA06	2.24	2.00	2.80	2.86	5.63	19.00	3.37
SA07	2.60	1.00	2.10	5.48	9.78	15.60	1.59
SA08	1.25	0.90	1.70	5.07	3.13	4.10	1.36
PT01	3.60	1.80	2.00	2.41	5.31	12.30	2.32
PT02	2.35	1.45	2.10	2.41	2.97	10.25	3.45
PT03	2.45	0.90	1.50	0.74	2.47	9.60	3.89
PT04	2.70	0.55	1.10	1.21	1.83	4.50	2.46
PT05	2.35	1.30	2.10	1.47	3.46	12.80	3.70
PT06	2.20	0.80	1.10	1.24	1.66	6.80	4.10
PT07	2.20	1.20	2.10	2.41	4.04	5.20	1.29
PT08	2.80	-	-	5.75	13.94	33.25	2.33
PT09	2.60	0.90	3.12	5.22	3.99	35.00	8.76
PT10	2.10	0.72	0.92	1.15	0.71	3.10	4.36

La campagna di acquisizione dati ALS è stata progettata con l'obiettivo di: (i) garantire una copertura *raw*, ovvero già in fase di *pre-processing* dei dati, delle aree censite di circa 9 punti-m⁻² in media, (ii) garantire una contestuale copertura stereoscopica pari al 60% e al 30% per le sovrapposizioni in avanti e laterali tra le strisce adiacenti con fotocamera HASSELBLAD DigiCAM H3DII e, (iii) e un campionamento medio al suolo

(GSD) pari a $0.1 \text{ m} \cdot \text{pixel}^{-1}$.

I due voli (2019 e 2021) sono stati pianificati per avere le medesime caratteristiche, nonostante una variazione sulla quota di volo durante l'acquisizione. Nell'anno 2019 essa è stata tra 675 e 794 metri s.l.m. richiedendo 23 strisciate e producendo una nuvola complessiva di 1.377.181.698 punti e 727 scatti stereoscopici in formato 7216X5412 24 BIT; i rilievi sono stati disposti in 422 quadranti di lato 500 metri orientato Nord -Sud e univocamente corrispondente con le ortofoto anch'esse numerate da 1 a 422. Le immagini ortofotogrammetriche sono caratterizzate da celle di dimensioni di 7 centimetri.

Il sistema di posizionamento globale adottato durante i voli nei due anni considerati è un GNSS con rilevamento fornito su Datum EFTR2000 con proiezione UTM32N in ottemperanza con il D.lgs. 10 Novembre 2011 e riduzione geoidica basata sul modello di ondulazione certificato IGMI, ITALGEO2005.

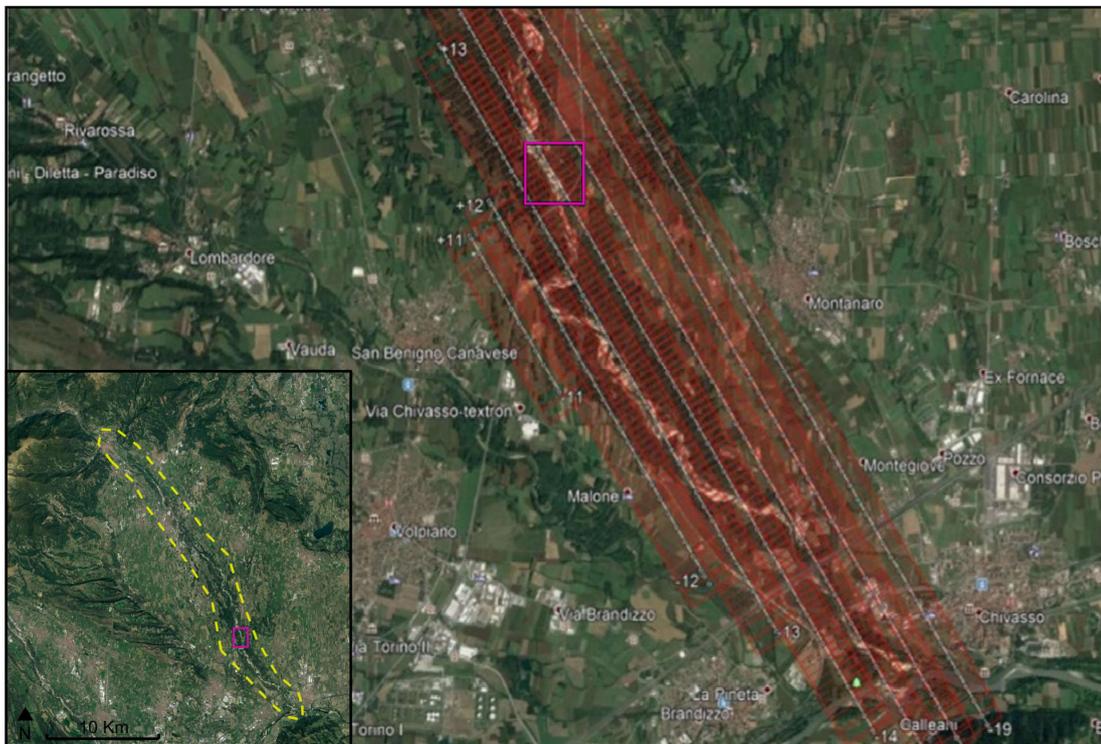


Figura 4.4: Campagna di acquisizione LiDAR effettuata in data 23 Marzo 2021; in figura viene mostrata una porzione della macro area soggetta a telerilevamento contenente l'area di studio.

Per l'anno 2021 invece, la frequenza di scansione è di 400 KhZ con un'altezza di volo compresa tra 578 e 818 metri sul livello del mare. L'angolo di scansione è contenuto tra i 4° e i 19° . Le traiettorie dei voli in relazione all'area di studio sono illustrate in (Figura 4.4).

La nuvola di punti è stata successivamente post-processata al fine di: (i) eliminare eventuali outliers; (ii) ottenere la nuvola corrispondente al DEM (Digital Elevation Model), inclusa la superficie topografica, e (iii) definire la nuvola dei soli elementi in elevazione al netto del modello digitale del terreno. La creazione del DEM è stata effettuata dal CNR – IRPI, mentre la conversione da quote assolute a quote relative è stata effettuata nell’ambito del presente lavoro. I file post-processati contengono informazioni sulla posizione dei punti in termini di coordinate geografiche secondo il sistema di riferimento sopra citato e informazioni sulla quota. Quest’ultima si presenta come quota assoluta per le nuvole corrispondenti al modello in elevazione compreso di suolo e in quote relative per la nuvola al netto del terreno. Si sottolinea che l’algoritmo sviluppato nell’ambito del presente lavoro e descritto nella sezione 5.1 non prevede necessariamente l’utilizzo delle quote in termini assoluti o relativi: la scelta è a discrezione dell’utente.

In seguito al *post-processing*, le nuvole corrispondenti agli arbusti selezionati e misurati in campo sono state ritagliate dall’intera nuvola post-processata tramite l’ausilio di un software GIS (nel caso studio si è usato qGIS 3.16). Poichè le nuvole ritagliate comprendono anche una parte del piano campagna sottostante la vegetazione analizzata, uno strato di spessore pari a 0.1 m è stato rimosso dalla base della nuvola ritagliata; tale spessore è stato scelto in base al valore medio osservato in campo.

4.3 Terrestrial Laser Scanner (TLS)

I rilievi con Laser Scanner Terrestre (TLS) sono stati condotti in data 20 Maggio 2021 in occasione del primo sopralluogo sulla barra scelta per il presente caso studio, come indicato in Figura 3.2B. Le misurazioni sono state effettuate grazie al contributo del gruppo di geomatica del Dipartimento di Ingegneria per l’Ambiente, il Territorio e l’Infrastruttura (DIATI).

I rilievi sono stati condotti con un laser scanner terrestre Riegl VZ-400i (Figura 4.5 caratterizzato da un principio di misura *time of flight* e costituito da un telemetro ad alta prestazione. Il Riegl VZ - 400i è inoltre equipaggiato con un’antenna GNSS necessaria per la precisa georeferenziazione della nuvola di punti. Lo strumento inoltre possiede un campo visivo che va da 100° ai 360° ed una distanza operativa inclusa tra 0.5 metri e i 800 metri. La frequenza di scansionamento è variabile nel range da 100 a 1200 Hz con un accuratezza di 3/5 mm.

Il telerilevamento delle nuvole corrispondenti agli arbusti testati si è articolato in due fasi:

- E’ stato definito il sistema di coordinate di riferimento attraverso sistema *Real Time Kinematik* (RTK) GNSS con l’obiettivo di georeferenziare le misure successivamente condotte. In particolare attraverso un ricevitore GNSS dual-frequency (modello Leica G18) sono stati misurati 17 punti tra i quali markers a terra e markers riflettenti. L’obiettivo è quello di conoscere le altezze ellissoidiche del luogo di interesse e successivamente convertite in altezze ortometriche. Tale conversione può essere svolta attraverso software dedicati quale Verto 3k, Carlab o

Convergo, e l'utilizzo di una griglia contenente l'ondulazioni del geoide (modello ITALGEO 2005) corrispondente alle differenze tra altezze ellissoidiche e altitudini ortometriche.

- Con l'obiettivo di ottenere una completa rappresentazione dei 18 arbusti presi in esame, sono state condotte per ciascuno di essi 11 scansioni con una frequenza di acquisizione di 600 Hz corrispondenti ad tasso di acquisizione di circa 250.000 punti·s^s e una risoluzione tale da avere un punto ogni 6 mm a una distanza di 10 m dallo strumento. Ogni acquisizione ha richiesto circa 15 minuti per la scansione e circa 2 minuti per la cattura dell'immagine. Tale procedimento ha permesso di ottenere una copertura totale dell'arbusto analizzato oltre che una completa e densa campagna di informazioni.

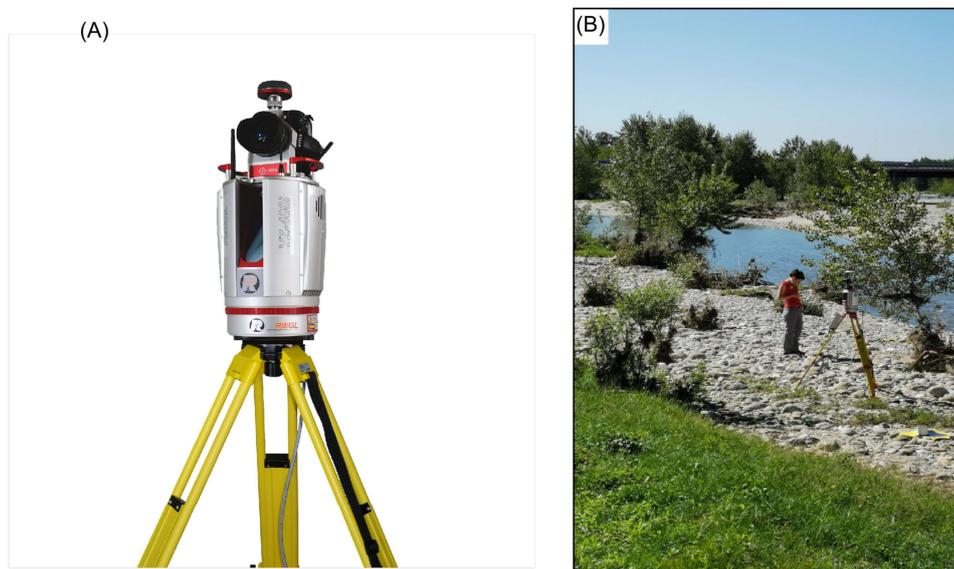


Figura 4.5: Laser scanner terrestre Riegl VZ-400i equipaggiato con una camera Nikon D800 (A); rilievi in campo relativi al 20 Maggio 2021 (B).

I dati raccolti sono stati poi processati in laboratorio con l'ausilio del software Riscan Pro di produzione Riegl. Il procedimento di post - processing dei dati si è articolato come segue:

- Il primo passo è stato definire il sistema di coordinate caratterizzante le informazioni rilevate in sito. In questo specifico caso studio, il sistema di coordinate adottato per l'individuazione delle coordinate topografiche è il sistema UTM - ETRF2000 - WGS84 fuso 32N.
- Il secondo passo ha riguardato l'identificazione dei target retro - riflettenti necessario per georeferenziare le scansioni effettuate in un sistema di coordinate assolute.

Il software Riscan Pro individua automaticamente i targets utilizzati sulla base della loro tipologia e dimensione.

- In seguito, si è proceduto all'allineamento e alla registrazione delle scansioni. La procedura standard adottata dal software si articola in due steps: in primo luogo una registrazione e correzione automatica dell'allineamento in accordo con lo scenario in cui sono stati svolti i rilievi (in questo caso siamo in un ambiente ampio ed esterno); successivamente la registrazione viene corretta considerando i targets identificati nelle diverse scansioni come osservazioni aggiuntive per i relativi allineamenti delle scansioni e la stima della collocazione della scansione. Infine la procedura mira a migliorare la corrispondenza tra le diverse scansioni attraverso un aggiustamento multi - stazione e successivamente georeferenziare queste in un sistema di coordinate assoluto attraverso le misurazioni esterne effettuate attraverso GNSS. A tal proposito il software valuta i parametri di rotazione e traslazione necessari per la traslazione del sistema di coordinate, a partire dalla posizione targets. Inoltre, include le informazioni provenienti dal sistema inerziale presente nello strumento di misura per ottenere informazioni sull'angolo di inclinazione della scansione. A seguito di un'ottimizzazione di tali parametri, il software ricerca iterativamente i piani omologhi tra le diverse scansioni e quindi la loro corrispondenza. La modalità utilizzata nel presente lavoro è *high - effort*.

Le nuvole ottenute hanno un numero di punti maggiore di 565 milioni.

L'utilizzo di *targets* è di notevole importanza in aree luminose e aperte, come nel presente lavoro, in quanto l'individuazione nelle diverse scansioni degli elementi fondamentali per l'allineamento può essere ostacolata dalla luminosità e dalla somiglianza delle foglie.

Capitolo 5

Metodologia

Nel presente capitolo vengono affrontate nel dettaglio le metodologie adottate per la costruzione del codice di calcolo propedeutico alla valutazione della biomassa della vegetazione arbustiva presente in alveo a partire da nuvole di punti.

5.1 Calcolo del volume con *Concave Hull Slicing Method Algorithm*

L'algoritmo qui presentato è stato sviluppato con codice Matlab2021b e segue in gran parte il procedimento logico sviluppato da Yan et al. (2019) in *A Concave Hull Methodology for Calculating the Crown Volume of Individual Trees Based on Vehicle-Borne LiDAR Data* per la valutazione del volume di un oggetto a partire da una nuvola di punti. La corretta geometria dell'arbusto viene individuata attraverso la funzione *ConcaveHull* elaborata da Moreira and Santos (2007) e introdotta dallo stesso Yan et al. (2019) nel suo elaborato. L'intera metodologia viene rielaborata e adattata al presente caso studio.

Il codice è stato applicato a due tipologie di dati diversi, ovvero le nuvole di punti, rappresentative dei diversi arbusti selezionati per lo studio, provenienti da ALS e TLS.

L'algoritmo si basa sulla suddivisione dell'intera nuvola in strati dove, per ciascuno di questi, viene valutato il volume coinvolto dai punti che lo costituiscono. La definizione degli strati, il loro numero e la loro forma, avviene automaticamente all'interno dell'algoritmo con l'obiettivo di riprodurre la geometria dell'elemento in input nel modo più fedele possibile (Cheng et al., 2017). In particolare:

1. il codice suddivide la nuvola in strati di altezza costante lungo la coordinata Z (espressa indistintamente in coordinate relative o assolute), individuando preliminarmente i punti con coordinata massima e minima in altezza. Lo spessore iniziale dello strato è un parametro che è necessario impostare prima dell'utilizzo del codice di calcolo, ricordando che un valore troppo alto potrebbe ridurre l'accuratezza del codice mentre un valore troppo basso potrebbe aumentare notevolmente gli oneri

computazionali. Per il presente caso studio è stato scelto un valore di partenza pari a 0.3 metri in funzione delle osservazioni effettuate in sito.

2. Il codice effettua l'unione di ogni strato contenente un numero di punti strettamente minore di tre con quello immediatamente superiore. Questa soglia è necessaria in quanto l'area dello strato viene valutata proiettando su un piano fittizio (X, Y) i punti appartenenti all' i -esimo strato in esame e la definizione di un poligoni circoscritto a tali punti è possibile se e solo se si hanno almeno tre proiezioni non coincidenti. Tale procedura viene svolta dal codice partendo dai punti con quote minori e proseguendo verso l'alto.
3. Note le aree di ciascuno strato, il codice valuta il tasso di variazione di queste lungo la verticale e le aree consecutive che registrano un basso valore di variazione vengono unite tra loro. Questo passaggio avviene attraverso una classificazione basata sulla valutazione della deviazione standard delle aree di ogni strato, considerando come valore di riferimento l'area media calcolata su tutti gli strati. La categorizzazione avviene nel seguente modo:

$$C_i = \begin{cases} \left(\frac{S_i - S_{\text{mean}}}{Std}\right) + 1 & \text{se } S_i - S_{\text{mean}} \geq 0 \\ \left(\frac{S_i - S_{\text{mean}}}{Std}\right) - 1 & \text{se } S_i - S_{\text{mean}} \leq 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

dove C_i è il numero della categoria assegnato all' i -esimo strato, S_i è l'area dell' i -esimo strato, S_{mean} è la media aritmetica delle aree dei diversi strati, Std è la deviazione standard calcolata come:

$$Std = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (S_i - S_{\text{mean}})^2}, \quad (5.2)$$

e $INT()$ è una funzione che restituisce la parte intera del suo argomento. Dunque, se due o più aree consecutive appartengono alla stessa classe, gli strati ad esse associati vengono uniti insieme a formare un unico strato avente come spessore la somma degli spessori degli strati coinvolti.

4. Una volta che tutti gli strati sono coerenti con i criteri sopra citati, viene calcolata nuovamente l'area di ognuno di essi. In questo passaggio e nei passaggi precedenti, il calcolo dell'area è eseguito tramite una funzione ausiliare appositamente scritta per tale compito e denominata *ConcaveHull* successivamente descritta (vedi Sezione 5.2).

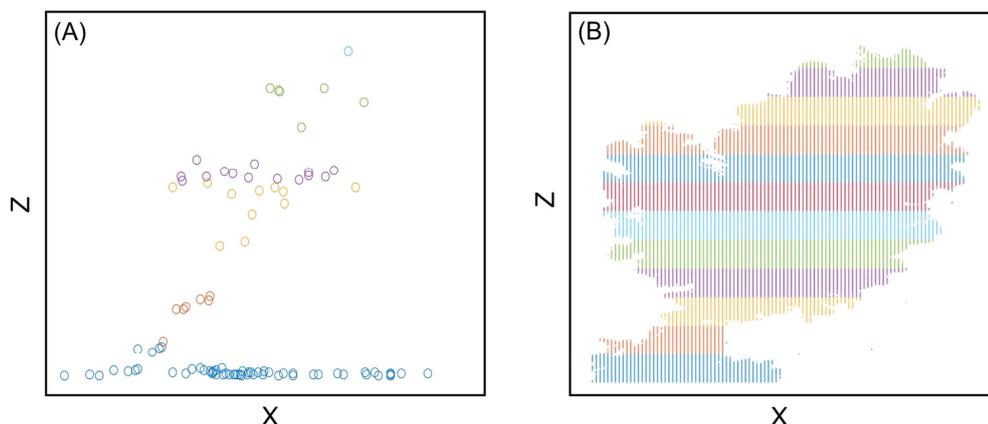


Figura 5.1: Nuvola di punti rappresentativa dell’arbusto PT08 ottenuta attraverso ALS (A) e TLS (B). Entrambe le nuvole sono mostrate a seguito del processamento attraverso il codice di calcolo con metodologia *Concave Hull Slicing Method*; gli strati definitivi identificati dall’algoritmo sono rappresentati da colori diversi.

5. Una volta note l’area e l’altezza di ciascuno strato, il volume di ognuno di essi è valutato come:

$$V_i = S_i \Delta h_i, \quad (5.3)$$

con S_i area dell’ i -esimo strato e Δh_i la sua rispettiva altezza. Il volume complessivo dell’intera nuvola è dato dalla somma dei volumi dei singoli strati:

$$V_t = \sum_{n=1}^n V_i, \quad (5.4)$$

5.2 La funzione *ConcaveHull*

Un insieme di punti discreti proiettati su un dato piano è caratterizzato da un unico contorno convesso, ma può essere incluso in molteplici contorni concavi. Un contorno convesso di fatto non definisce adeguatamente il profilo sezionale di una nuvola di punti rappresentativi di un arbusto o un albero. Questi, infatti, sono caratterizzati da contorni irregolari dovuti dalla presenza di rami, con alternarsi di zone più dense di materiale vegetato e con fogliame più rado. Un profilo convesso potrebbe quindi sovrastimare l’area definita dai punti presi in considerazione. La ricerca di un algoritmo che ottimizzi la forma del poligono convesso per la delimitazione di aree circoscritte a insiemi di punti è stata oggetto di numerosi studi (ad esempio Moreira and Santos, 2007; Park and Oh, 2012; Asaedi et al., 2017).

Nel presente lavoro, è stata sviluppata una funzione ausiliare e richiamata opportunamente all’interno del codice basata sul metodo *ConcaveHull* proposta da Moreira and Santos (2007) in *"A k-nearest neighbours approach for the computation of the region*

occupied by a set of points". In particolare, il codice di calcolo proposto dagli autori sopracitati e presente in letteratura in codice Mathematica è stato convertito in ambiente Matlab con il nome *ConcaveHull*. Tale funzione viene applicata a ciascuno degli strati preventivamente individuati come descritto in sezione 5.1.

ConcaveHull function viene così adattata opportunamente al nostro caso studio. Infatti essa interviene soltanto quando il numero di punti all'interno dello strato considerato è sufficientemente alto da poter definire una geometria dettagliata. In caso contrario, il poligono circoscritto viene semplicemente valutato attraverso l'utilizzo della funzione *boundary* già presente nella libreria *Matlab*. La soglia, sopra la quale il numero di punti dello strato viene considerato sufficiente alto da permettere l'utilizzo di tale funzione, è stata posta pari a 5 secondo un approccio *trial-and-error* basato sulla densità di punti della nuvola che rappresenta l'elemento studiato. Il procedimento per la definizione di tale soglia è stato applicato alle nuvole ALS in quanto queste restituiscono un numero di punti notevolmente inferiore rispetto a quelle ottenute attraverso TLS, riducendosi proporzionalmente con l'altezza dell'elemento. Pertanto, l'applicazione della funzione *ConcaveHull* è meno frequentemente usata per i dati ALS.

La funzione *ConcaveHull* si basa sulla ricerca dei punti marginali della nuvola di input così da ottimizzare l'approssimazione del suo contorno. I principali passaggi della funzione vengono ora spiegati:

1. In primo luogo, questa provvede ad individuare il punto di partenza dal quale inizia la successiva individuazione dei punti che faranno parte del contorno (Figura 5.2-A). In tale funzione, il punto di partenza è definito come quello caratterizzato dall'ordinata minore, d'ora in avanti denominato come *FirstPoint*.
2. Secondo Moreira and Santos (2007), l'algoritmo seleziona i k punti più vicini al punto selezionato, dove k è un numero maggiore o uguale a tre.
3. Per ciascuno dei k punti individuati, l'algoritmo valuta l'angolo in senso orario incluso tra il segmento che unisce l' i -esimo punto di partenza selezionato e un segmento fittizio orizzontale, selezionando quello che registra il maggior valore di angolo, denominato *CurrentPoint*.
4. Lo step successivo prevede la scelta di un nuovo punto fra quelli rimanenti, opportunamente vicini al *CurrentPoint*. I punti candidati vengono denominati *CandidatePoints*. Il nuovo *CurrentPoint* viene scelto sulla base del criterio dell'angolo maggiore descritto al punto (3.).
5. Il procedimento si ripete (Figura 4.1-B) fino a quando l'ultimo punto individuato non corrisponde al punto di partenza e la totalità dei punti della nuvola in input non è interamente contenuta all'interno del poligono (Figura 4.1-C). Se questa ultima condizione viene a mancare, l'algoritmo ricomincia dal punto (1.) incrementando il numero dei k punti candidati (ovvero dei *k-nearest point*) presi in considerazione.

Il risultato finale è un elemento vettoriale caratterizzato da tutti i punti selezionati che descrivono i vertici del contorno concavo che meglio approssima la nuvola in input.

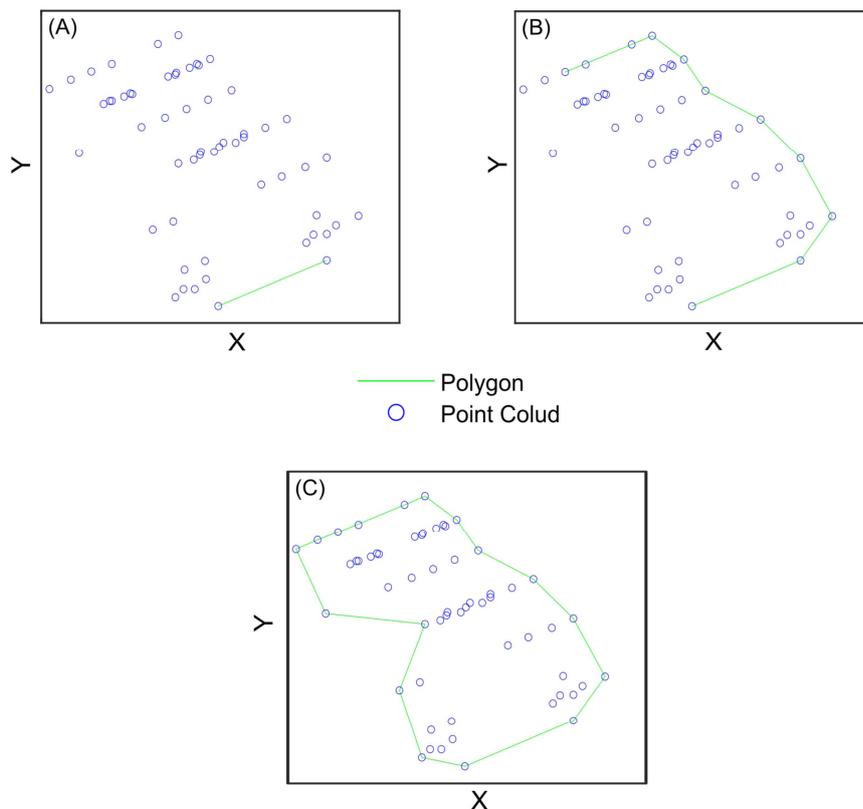


Figura 5.2: (A) La funzione *ConcaveHull* individua il punto di partenza (*FirstPoint*) come quello avente coordinata y minore; successivamente, seleziona fra i k punti più vicini, quello con l'angolo maggiore misurato in senso antiorario (*CurrentPoint*). (B) Il contorno della nuvola viene progressivamente definito fino a quando (C) il punto di partenza risulta essere il nuovo *CurrentPoint* (Moreira and Santos, 2007).

5.3 Confronto tra volumi ottenuti e volumi misurati

Il volume è la principale grandezza su cui verte questo lavoro di tesi, in quanto grandezza fondamentale per la valutazione della biomassa. I volumi derivanti dalle analisi condotte con le diverse tecniche di telerilevamento e ricreati tramite la metodologia descritta nei paragrafi precedenti sono quindi stati confrontati con le misurazioni dirette in campo per valutare la bontà del processo di ricostruzione geometrica. In particolare, poiché il volume è funzione delle aree dei diversi strati individuati e dell'altezza di questi, il confronto tra le suddette grandezze è stato particolarmente utile per comprendere al meglio l'adeguatezza dei metodi adottati e poter calibrare l'algoritmo definito.

Il livello di correlazione tra misure in campo e da telerilevamento è stato valutato sia per via grafica sia con l'ausilio di strumenti statistici. A tal proposito sono stati calcolati

diversi indicatori di errore, quali il coefficiente di correlazione R^2 , l'errore percentuale (PE), l'errore medio (MBE), l'errore assoluto medio (MAE) e l'errore quadratico medio (RMSE).

Il coefficiente di correlazione (R^2) indica la dipendenza tra le grandezze misurate e le grandezze ricavate attraverso il codice.

La variazione percentuale (PE) aiuta a condurre una prima analisi sulla tendenza dei risultati a sovrastimare o a sottostimare il dato di riferimento; viene calcolata per ciascuna grandezza di ciascun arbusto

L'errore medio (MBE), invece, tiene conto dei risultati ottenuti su ciascun arbusto e fornisce un errore medio delle misurazioni compensando valori negativi e valori positivi, mostrando così quanto il dato misurato si avvicini o meno al dato di riferimento. Esso è espresso secondo l'equazione:

$$MBE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (X_{\text{LiDAR},i} - X_{\text{ref},i}), \quad (5.5)$$

dove X è la grandezza fisica presa in considerazione mentre N è la numerosità del campione. Valori negativi di MBE indicano una tendenza generale delle misure ottenute da codice a sottostimare le misure di riferimento (FM).

Per un'osservazione più dettagliata dell'andamento delle misure, l'errore assoluto medio (MAE) è sicuramente più consona restituendo un valore strettamente positivo. Il MAE è definito come:

$$MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |X_{\text{LiDAR},i} - X_{\text{ref},i}|. \quad (5.6)$$

Maggiore è il valore di MAE maggiore è l'errore e quindi minore è l'accuratezza.

In fine, l'errore quadratico medio (RMSE) è utile per massimizzare gli errori nei valori estremi. È definito come:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (X_{\text{LiDAR},i} - X_{\text{ref},i})^2}. \quad (5.7)$$

Anche questo indice restituisce un valore strettamente positivo e l'accuratezza aumenta al diminuire del suo modulo. Confrontando l'RMSE con il MAE è possibile comprendere la variabilità dell'errore, ovvero più l'RMSE eccede il valore del MAE meno omogeneamente è distribuito l'errore tra le misure. Sia l'MBE che l'MAE sono metriche lineari che applicano un peso uguale a tutti gli errori mentre l'RMSE varia il peso assegnato ad ogni errore in funzione dell'entità di questo. Questo risulta molto utile per evitare errori grossolani.

L'utilizzo delle misure in campo come riferimento assoluto per la valutazione dell'errore può essere oggetto di discussione in quanto le misurazioni in campo di grandezze fisiche di specie decidue come soprattutto l'altezza sono accompagnate da un'alta incertezza dovuta all'irregolarità delle chiome (Mielcarek et al., 2018a). Dunque per eliminare o ridurre questo tipo di bias abbiamo accuratamente misurato il valore di altezza del singolo arbusto, sia prima che dopo il taglio.

Capitolo 6

Risultati

L'applicazione del metodo sviluppato sui 18 arbusti presi in esame è necessaria per la calibrazione del modello di calcolo e la valutazione dell'accuratezza della ricostruzione geometrica. I risultati sono ottenuti separatamente per le due tecniche di acquisizione (ALS e TLS) adottate e poi vengono posti a confronto con le medesime grandezze ottenute attraverso le misure in campo.

6.1 Confronto tra le grandezze di rilievo

Le due specie di arbusti presenti nell'area studio sono caratterizzate da geometrie e morfologie diverse. Tale diversità, riscontrabile anche dalla semplice osservazione dei diversi individui, si ritrovano nei valori delle grandezze geometriche misurate. Infatti, i pioppi sono caratterizzati da una forma più sviluppata in altezza presentando una circonferenza media minore rispetto a quella dei salici, sia per individui giovani che per individui maturi. Al contrario, questi ultimi sono generalmente più bassi, ma con circonferenze maggiori sviluppandosi lateralmente e assumendo forme più sferiche. In Tabella 6.1 si riportano i valori delle grandezze fisiche di interesse ottenute attraverso le misure di campo (FM) e le due tecniche di acquisizione, laser scanner terrestre (TLS) e laser scanner aereo (ALS), a seguito dell'elaborazione delle singole nuvole rappresentative degli arbusti studiati con il codice di calcolo sviluppato.

In Figura 6.1A, i risultati delle suddette grandezze, ottenute attraverso l'applicazione del codice di calcolo alle nuvole ottenute attraverso ALS e GLS, vengono rappresentati attraverso grafici, in funzione dei valori delle medesime grandezze ottenuti dalle misure dirette in campo. Si osserva immediatamente come i risultati relativi all'ALS tendano a sottostimare il volume misurato in campo sia per i salici che per i pioppi, mentre quelli da TLS risultino assai più coerenti, seppur con una leggera sovrastima per i salici e un più accentuato *scatter* sui pioppi.

E' inoltre interessante osservare come i risultati ottenuti attraverso l'equazione proposta da Brown (Pereira et al., 1995) siano in una condizione intermedia tra le due misurazioni e talvolta più correlati ai valori ottenuti in campo.

Tabella 6.1: Valori di altezza massima, massima proiezione areale e volume per ciascun arbusto studiato e per le tre tipologie di rilievo adottate: Field Measurements (FM), Terrestrial Laser Scanner (TLS) e Airborne Laser Scanner (ALS). A questo si aggiungono i valori di volume valutati attraverso formulazioni di letteratura fornite rispettivamente da Brown (1981) e Fernandes and Pereira (1993); Pereira et al. (1995).

Shrub ID	Points	TLS			Points	Height (m)	ALS		Brown (1981) Volume (m ³)	Pereira et al. (1995) Volume (m ³)
		Height (m)	Area (m ²)	Volume (m ³)			Area (m ²)	Volume (m ³)		
SA01	8823866	4.09	7.43	21.01	213	3.72	6.60	9.24	11.57	4.34
SA02	3671134	1.95	4.62	5.31	38	1	1.93	0.64	-	-
SA03	1751554	1.65	3.70	3.18	19	0.22	1.59	0.48	-	-
SA04	1761174	1.96	4.09	3.90	25	1.44	1.18	0.35	2.47	0.93
SA05	1683698	1.74	4.16	3.41	30	0.81	1.91	0.61	1.31	0.49
SA06	3756876	3.35	2.75	6.80	47	2.69	2.12	3.13	6.57	2.46
SA07	4287142	3.01	4.60	9.73	52	1.52	3.98	2.74	2.86	1.07
SA08	1513826	1.15	3.00	2.04	74	0.94	4.68	1.87	1.00	0.38
PT01	6633660	3.30	4.22	6.01	45	2.52	3.59	3.56	6.79	2.54
PT02	4855309	1.95	2.59	3.18	25	0.63	0.86	0.26	3.75	1.41
PT03	9577481	3.52	2.27	5.92	11	0.55	0.93	0.28	1.73	0.65
PT04	2905362	2.64	2.13	2.95	13	1.69	0.36	0.13	0.86	0.32
PT05	1833170	2.24	4.80	6.79	43	1.11	1.99	1.10	3.36	1.26
PT06	1447344	2.05	2.56	2.75	21	0.69	1.22	0.37	1.01	0.38
PT07	1239368	1.99	0.95	1.70	23	0.78	0.92	0.39	2.90	1.09
PT08	8495072	3.52	6.69	18.88	96	3.00	5.60	4.69	-	-
PT09	12323760	2.75	7.52	12.85	64	1.55	5.62	3.53	3.81	1.43
PT10	966608	3.23	0.81	1.11	4	0.04	0.06	0.00	0.51	0.19

Osservando l'andamento delle altezze provenienti da codice, relative alle due tecniche di remote sensing adottate, rispetto alle misure in campo, si nota come l'ALS sottostimi maggiormente questa grandezza, influenzando così anche il volume calcolato. Risulta, inoltre, sempre più sottostimante a mano a mano che l'altezza dell'oggetto si riduce.

Il TLS, invece, restituisce risultati molto più accurati sia per i salici che per i pioppi. L'area svolge influenza notevolmente l'accuratezza della stima del volume. Come spiegato nella sezione 4.1, l'area viene misurata strato per strato dal codice di calcolo partendo dal poligono circoscritto ai punti del singolo, proiettati su un piano fittizio. E' quindi una grandezza particolarmente sensibile al numero di punti all'interno dello strato di input. Ne deriva che aree piccole e caratterizzate dalla presenza di pochi punti portano ad una sua sottostima ed alla conseguente sottostima del volume.

Essendo la densità di punti una proprietà importante per l'accuratezza dei risultati, è interessante comprendere se la densità di quelli contenuti all'interno del volume caratteristico dell'arbusto individuato dall'algoritmo sia correlata alla densità vegetale valutata in sito attraverso la misurazione della massa del singolo arbusto. A tal proposito, vengono diagrammate in Figura 6.2A la densità ottenuta dalle misurazioni in sito e il numero di punti su unità di volume per ogni singolo arbusto preso in considerazione. Si osserva come, sia per TLS sia per ALS, ci sia una notevole dispersione dei markers, indice di una debole correlazione soprattutto per l'ALS. In Figura 6.2B, invece, si osserva come varia il numero di punti caratteristici del singolo arbusto in relazione alla biomassa. In questo caso sembra esservi una correlazione più evidente rispetto a quanto visto in 6.2A, sia per le misure TLS che per quelle ALS.

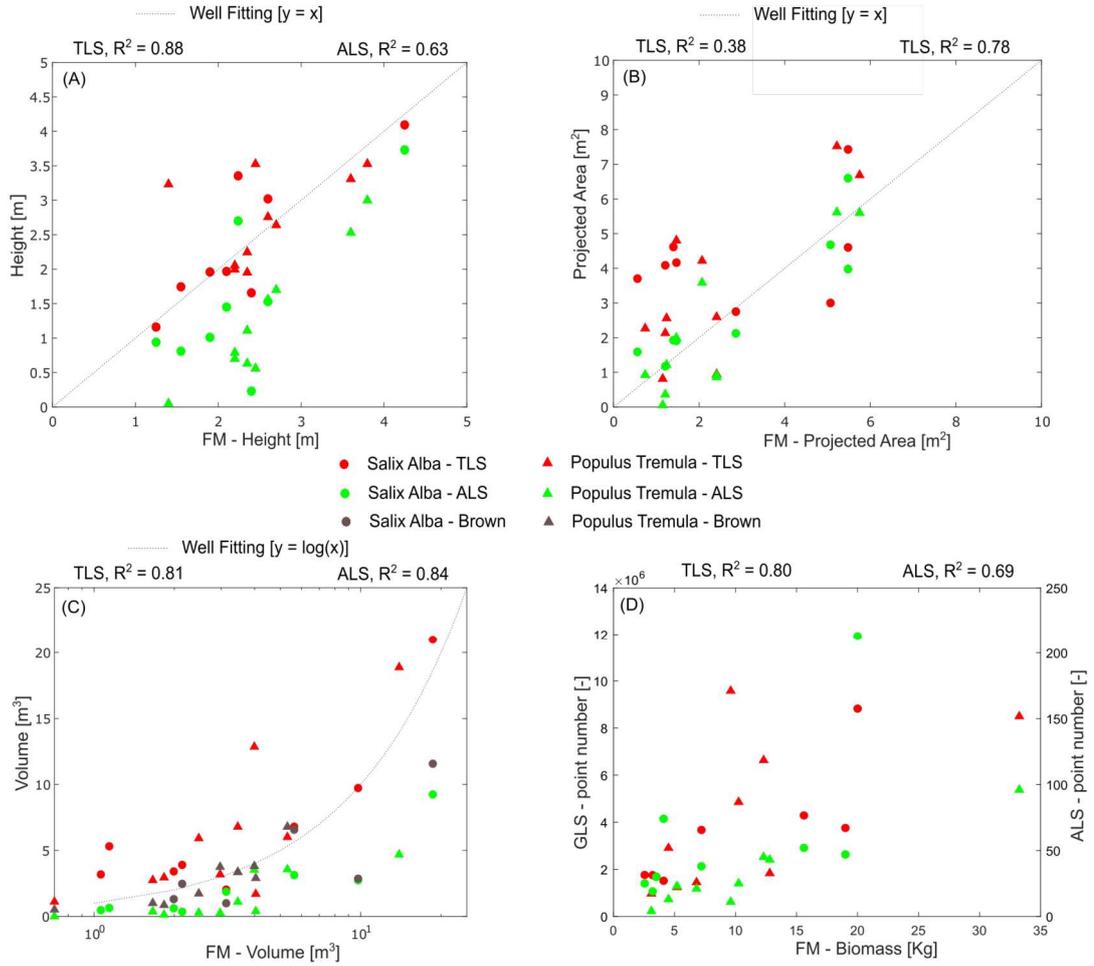


Figura 6.1: (A) Confronto tra le altezze misurate in sito e i valori ottenuti attraverso le due tecniche di remote sensing. (B) Confronto tra le aree massime calcolate e misurate. (C) Confronto tra i volumi ottenuti da codice e misurati in campo. (D) Confronto tra biomassa misurata in campo e numero di punti caratterizzanti la nuvola. In questa figura, i salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolari pieno e triangolare, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde, calcolo con formula di Brown (1981) in giallo).

6.2 Valutazione degli errori sulle grandezze di interesse

In Tabella 6.2 e 6.3 si riportano i valori di errore percentuale ottenuti per ciascun arbusto studiato e per ciascuna tecnica utilizzata, mentre, in Tabella 6.4, le statistiche di errore calcolate per ciascuna specie in relazione alla tecnica di acquisizione.

Si può osservare come per il TLS l'area sia il parametro più instabile (Tabella 6.2 e Tabella 6.4). Si presenta sovrastimante nei confronti delle misure di campo, per la

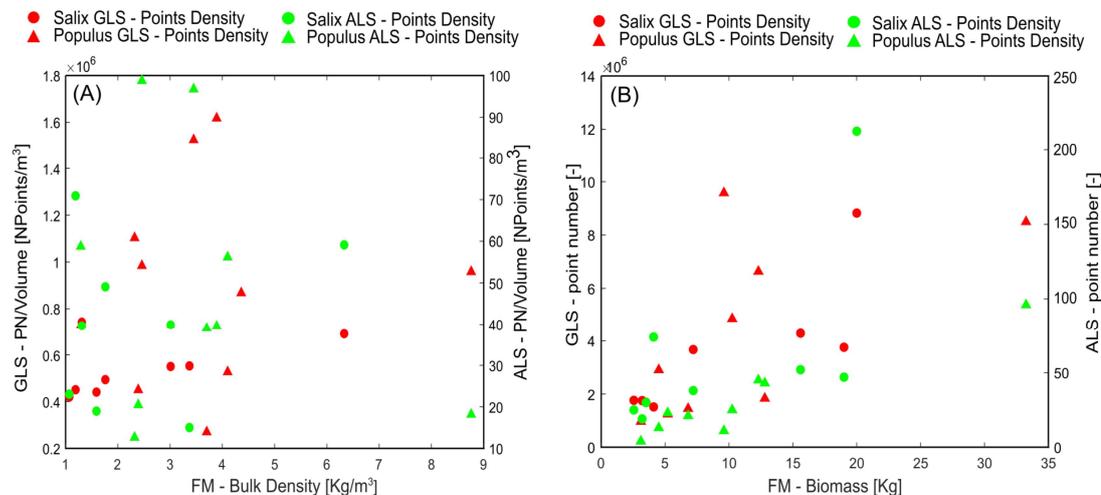


Figura 6.2: (A) Rappresentazione dell'andamento della densità di biomassa calcolata attraverso le misure in campo in relazione alla densità di punti su unità di volume restituita dalle due tecniche ALS e TLS per entrambe le specie. (B) Andamento della biomassa direttamente calcolata in sito in relazione al numero di punti costituente la nuvola rappresentativa dell'arbusto in esame. I salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolare pieno e triangolare, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde)

maggior parte degli arbusti presi in esame. Al contrario, le altezze massime rilevate dal TLS sono particolarmente accurate, seppur tendenti a una leggera sottostima, come si evince dalla variazione percentuale PE (soprattutto per i pioppi).

Per quanto riguarda l'ALS invece (Tabella 6.3 e Tabella 6.4), lo scenario è circa opposto. Le aree sembrano essere stimate in modo migliore mentre l'errore preponderante si manifesta sulle altezze massime rilevate. Osservando quindi gli errori sui volumi, l'ALS sottostima il dato per entrambe le specie prese in esame, mentre il TLS mostra risultati più accurati nonostante la tendenza a restituire valori più alti rispetto a quelli misurati in campo.

Tabella 6.2: Analisi degli errori percentuali (PE) sui valori di volume, altezza e massima area proiettata derivanti dalle nuvole di punti ottenute con Laser Scanner Terrestre (TLS) degli arbusti presi in considerazione nel presente caso studio.

Terrestrial Laser scanner - TLS			
Shrub	Volume [m^3]	Height [m]	Projected Area [m^2]
ID	PE(%)	PE(%)	PE(%)
SA01	12.7	-3.6	35.5
SA02	366.1	3.1	229.7
SA03	200.2	-30.9	561.2
SA04	82.4	-6.3	237.6
SA05	71.2	12.5	183.2
SA06	20.7	49.7	-3.8
SA07	-0.5	16.1	-16.0
SA08	-34.9	-7.2	-40.8
PT01	13.3	-8.1	103.8
PT02	7.2	-16.9	7.6
PT03	139.8	43.9	206.6
PT04	61.24	-2.2	76.2
PT05	96.3	-4.4	226.8
PT06	65.4	-6.6	106.6
PT07	-57.8	-9.3	-60.7
PT08	35.4	-7.1	16.3
PT09	222.1	6.0	44.1
PT10	56.8	130.8	-29.4

Tabella 6.3: Analisi degli errori percentuali (PE) sui valori di volume, altezza e massima area proiettata derivanti dalle nuvole di punti ottenute con Airborne Laser Scanner (ALS) degli arbusti presi in considerazione nel presente caso studio.

Airborne Laser scanner - ALS			
Shrub	Volume [m^3]	Height [m]	Projected Area [m^2]
ID	PE(%)	PE(%)	PE(%)
SA01	-50.4	-12.2	20.42
SA02	-43.6	-46.8	37.61
SA03	-55.0	-90.4	183.68
SA04	-83.5	-30.9	-2.88
SA05	-69.2	-47.7	29.75
SA06	-44.4	20.5	-25.78
SA07	-71.9	-41.5	-27.41
SA08	-40.3	-24.7	-7.73
PT01	-32.8	-29.7	173.22
PT02	-91.2	-73.1	-64.25
PT03	-88.7	-77.1	25.38
PT04	-92.8	-37	-70.10
PT05	-68.1	-52.7	35.67
PT06	-77.4	-68.1	-1.87
PT07	-90.3	-64.1	-61.91
PT08	-66.3	-21.0	-2.54
PT09	-11.6	-40	7.61
PT10	-100	-96.4	-94.96

Tabella 6.4: Tabella riassuntiva delle statistiche di errore calcolate per le tre grandezze analizzate e per entrambe le tecniche adottate (ALS e TLS). Si precisa che tali errori sono riferiti a una procedura che adotta un'altezza di strato iniziale pari a 0.3 metri.

	Method	Metrics	Willows	Aspens	All trees	
Height	TLS	R ² (-)	0.72	0.18	0.48	
		MBE (m)	0.08	0.19	0.13	
		MAE (m)	0.36	0.57	0.41	
	ALS	RMSE (m)	0.51	0.79	0.62	
		R ² (-)	0.57	0.91	0.63	
		MBE (m)	-0.73	-1.62	-1.05	
		MAE (m)	0.85	1.62	1.10	
		RMSE (m)	1.01	1.50	1.21	
Area	TLS	R ² (-)	0.13	0.64	0.38	
		MBE (m ²)	1.35	1.36	1.21	
		MAE (m ²)	2.11	1.81	1.75	
	ALS	RMSE (m ²)	2.36	1.91	2.02	
		R ² (-)	0.81	0.78	0.78	
		MBE (m ²)	0.05	-0.31	-0.12	
		MAE (m ²)	0.72	0.97	0.75	
		RMSE (m ²)	0.85	1.07	0.91	
Volume	TLS	R ² (-)	0.93	0.73	0.81	
		MBE (m ³)	1.48	2.72	1.87	
		MAE (m ³)	1.76	3.30	2.26	
	ALS	RMSE (m ³)	2.09	4.10	3.07	
		R ² (-)	0.93	0.66	0.84	
		MBE (m ³)	-3.06	-3.26	-2.81	
	Brown (1981)	MAE (m ³)	3.06	3.26	2.81	
		RMSE (m ³)	4.40	3.95	3.92	
		R ² (-)	0.75	0.86	0.71	
	(Pereira et al., 1995)	MBE (m ³)	-2.96	-1.74	-2.23	
		MAE (m ³)	3.38	2.24	2.70	
		RMSE (m ³)	4.21	4.72	4.52	
			R ² (-)	0.75	0.86	0.71
			MBE (m ³)	-5.64	-3.47	-4.33
			MAE (m ³)	5.64	3.46	4.33
		RMSE (m ³)	7.12	5.08	5.98	

Capitolo 7

Discussione

Nel presente capitolo si discuterà l'affidabilità e la precisione nel valutare il volume di specie arbustive in alveo attraverso dati LiDAR. Come già detto nei capitoli precedenti, questa tecnologia sta trovando largo impiego in ambito forestale ed in molte altre discipline, tra cui l'ecomorfodinamica fluviale cioè l'ambito in cui si inserisce tale lavoro di tesi.

7.1 Stima delle dimensioni geometriche degli arbusti e della biomassa

L'algoritmo descritto in sezione 5.1 è utilizzata per il calcolo del volume coinvolto nella nuvola di punti rappresentativa dell'arbusto in analisi, ma tale grandezza è estremamente sensibile ai parametri di altezza e area individuati per ciascuno strato.

I risultati ottenuti applicando il codice ai dati raccolti con ALS riportano una sottostima del volume, imputabile a un ben noto errore sulle altezze rilevate, caratteristico di questo strumento e ampiamente discusso in letteratura (Yu et al., 2010; Mielcarek et al., 2018b). Infatti come si osserva in Figura 6.1B, le altezze risultano inferiori di circa 1 metro rispetto ai valori delle misure svolte in campo errore che si intensifica al diminuire dell'altezza del soggetto telerilevato (Mielcarek et al., 2018b).

Nonostante l'errore sulle altezze caratteristico di ALS non sia trascurabile, come si può osservare dalla Figura 7.1, tenendo accuratamente in conto tale bias si può ottenere una stima del volume attendibile, soprattutto per piante più alte di 1.5 m. A tal proposito, in Tabella 7.1 si osservano le statistiche di errore valutate per i volumi ottenuti con e senza correzione, rispettivamente. La correzione è stata ottenuta aggiungendo 1.0 m alle altezze misurate da ALS. Arbusti con altezze dell'ordine di 1.5 m sono affetti da un grosso margine di incertezza in quanto caratterizzati da una nuvola costituita da un basso numero di punti (in genere 4-10). Questo porta ad una notevole sottostima delle altezze, osservabile nel grafico 6.1B, che tendono a discostarsi dal valore di riferimento man mano che l'altezza caratteristica dell'arbusto si riduce.

Tabella 7.1: Statistiche di errore valutate sulla grandezza volumetrica ottenute considerando una correzione sull'altezza pari a 1.0 m e l'altezza originale.

Shrub species	Not Corrected			Corrected		
	MBE [-]	MAE [-]	RMSE [-]	MBE [-]	MAE [-]	RMSE [-]
<i>Salix Alba L.</i>	-3.06	3.06	4.40	-2.26	2.51	3.77
<i>Populus Tremula L.</i>	-3.26	3.26	3.95	-2.54	2.73	3.45

L'errore sulle aree non presenta un andamento costante, ma fluttua senza una ben precisa correlazione con le altre grandezze. Anche in questo caso, il numero di punti svolge un ruolo importante in quanto pochi punti definiscono una geometria assai più incerta e difficile da ricostruire.

Per quanto riguarda il volume, sono state ricercate delle correlazioni lineari con lo scopo di comprendere l'accuratezza e la coerenza dei risultati e successivamente, ricavare una legge sito-specifica tale da poter calcolare la grandezza reale a partire da quella LiDAR.

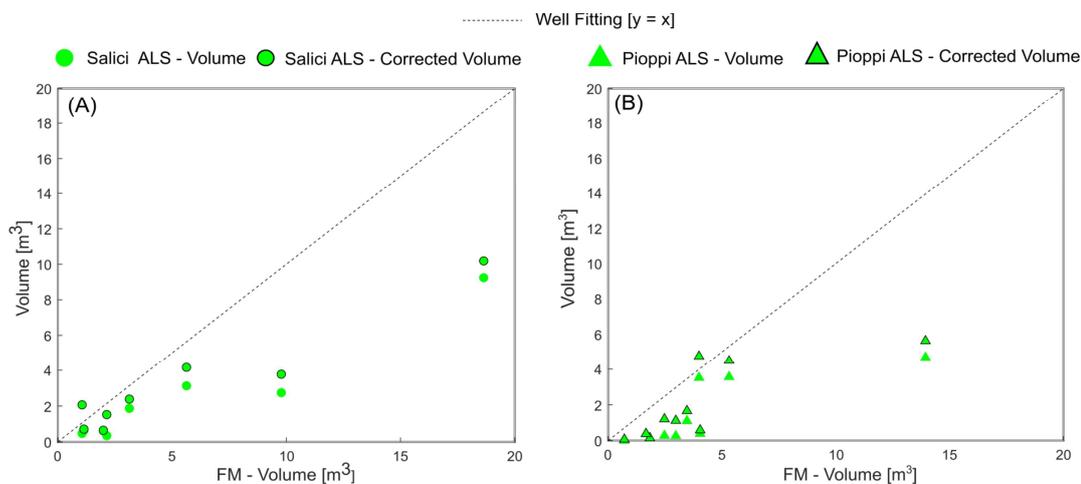


Figura 7.1: Confronto tra volume calcolato da ALS e volume *corretto* per *Salix alba* L. (A) e per *Populus tremula* L. (B).

In Figura 7.2 vengono mostrati i valori di R^2 ottenuti per ciascuna specie considerando entrambe le tecniche utilizzate (ALS e TLS). In generale, la distribuzione dei risultati tende a seguire un andamento lineare con i volumi misurati in sito presentando forti correlazioni con alto valore di R^2 . In particolare *Salix alba* L. riporta una forte

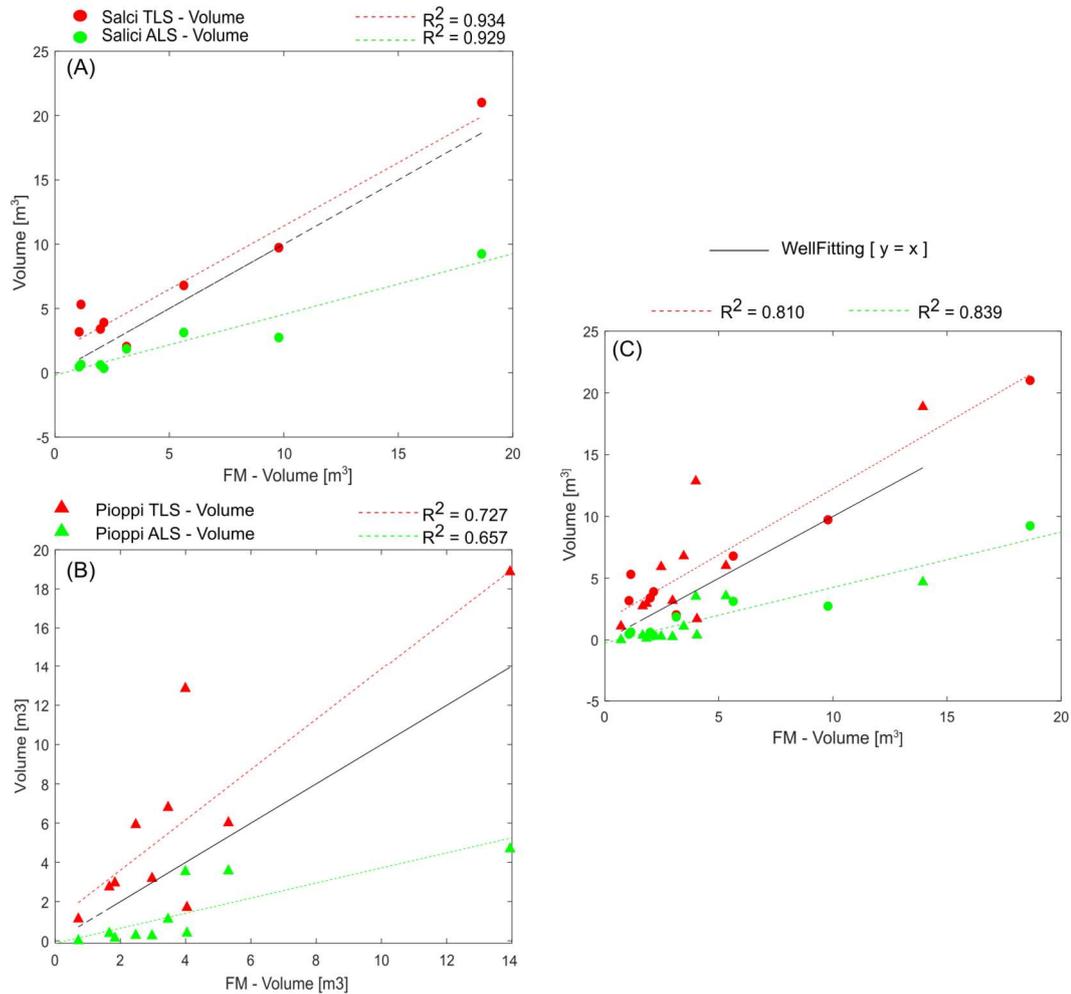


Figura 7.2: In (A) si ricerca una correlazione lineare sui volumi per gli arbusti di *Salix alba* L. presi in esame per TLS e ALS; in (B) si ricerca una correlazione lineare sui volumi per gli arbusti di *Populus tremula* L.; in (C) si ricerca una correlazione lineare considerando entrambe le specie. I salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolari e triangolari, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde).

correlazione lineare con valori di R^2 superiori a 0.9 sia per TLS che per ALS. I risultati riguardanti la specie *Populus tremula* L., invece, indicano una sottostima per i rilievi con ALS e una leggera sovrastima per i risultati provenienti da TLS. Anche in questo caso i pioppi mostrano una buona correlazione lineare, seppur meno potente rispetto ai salici, riportando un valore di R^2 nell'intorno di 0.7, per entrambe le tecniche. Considerando complessivamente le due specie, si osserva un trend intermedio tra quello ottenuto per le singole specie, con un R^2 che dimostra una buona correlazione assestandosi attorno a

valori maggiori di 0.80.

Osservando le statistiche di errore per le due tecniche di remote sensing adottate è chiaro come i risultati ottenuti attraverso TLS siano apprezzabilmente più accurati rispetto a quelli forniti da ALS. Soffermandoci sulla grandezza di maggior interesse quale il volume, possiamo notare che il TLS riporta un valore di R^2 di 0.8, valutato sull'intero campione di arbusti selezionati, mentre l'ALS fornisce un valore di R^2 di 0.84. Tuttavia va osservata la notevole differenza nelle metriche di errore delle due tecniche. Quindi, nonostante l'elevata correlazione ottenuta dai risultati ALS, il volume calcolato si presenta sottostimante rispetto a quanto misurato in sito, ma descritto bene da una legge lineare monotonamente crescente. Tale considerazione verrà affrontata in seguito in quanto risulterà di particolare interesse per l'elaborazione di una correzione sui volumi ottenuti da ALS, con l'obiettivo di giungere a stime sempre più accurate.

La biomassa risulta essere linearmente proporzionale al numero di punti con un certo margine di incertezza, come si può notare in Figura 6.2B. Un fatto attendibile in quanto un aumento di biomassa e dunque un aumento di volume della massa vegetale risulta essere meglio rilevata da LiDAR aereo. Si osserva, infatti, come i pioppi presentino in generale una biomassa maggiore a parità di numero di ritorni rispetto ai salici, imputabile a un'altezza più elevata e quindi alla presenza di un corpo centrale di matrice legnosa più importante. I salici invece, essendo caratterizzati da un indice fogliare maggiore, sono costituiti intrinsecamente da una biomassa coinvolta minore rispetto ai pioppi, nonostante si considerino due individui caratterizzati da un numero di ritorni simile. Le Figure 7.3A,B,C mostrano il grado di correlazione che intercorre tra la biomassa misurata in campo e il numero di punti rappresentativo della nuvola di ciascun arbusto. Il TLS fornisce una correlazione più forte rispetto all'ALS per entrambe le specie, probabilmente a causa della maggior quantità di punti all'interno della nuvola rispetto a quella ottenuta dall'ALS: può infatti capitare che per arbusti molto bassi, l'ALS registri un basso numero di ritorni, influenzando così sulla bontà della correlazione ricercata.

7.2 Influenza delle caratteristiche dei dati di input

Le caratteristiche dei dati di input svolgono un ruolo importante nei confronti dell'accuratezza dei risultati ottenuti. La densità dei punti di copertura è un parametro rilevante, in quanto un maggior numero di punti permette di ottenere modelli più affini alla realtà, restituendo un grado di dettaglio sempre maggiore.

Il TLS fornisce nuvole molto più dense portando a risultati più precisi rispetto a quanto trovato a partire dai dati ottenuti con l'ALS, il quale è generalmente caratterizzato da una densità dell'ordine di grandezza di 10-100 punti (nel caso in esame 9 punti- m_2). Nelle Tabelle 4.1 e 7.3, si può osservare come, per ciascun arbusto, costituiscono le singole nuvole siano di gran lunga differenti in numero per le due tecniche di remote sensing, con circa quattro ordini di grandezza di differenza.

La riduzione del livello di dettaglio dettato dal numero di punti diviene più marcata al diminuire dell'altezza dell'elemento studiato, specialmente al di sotto di altezze di circa 1.5 metri. L'esiguo numero di punti si riflette in un'incertezza dell'area stimata

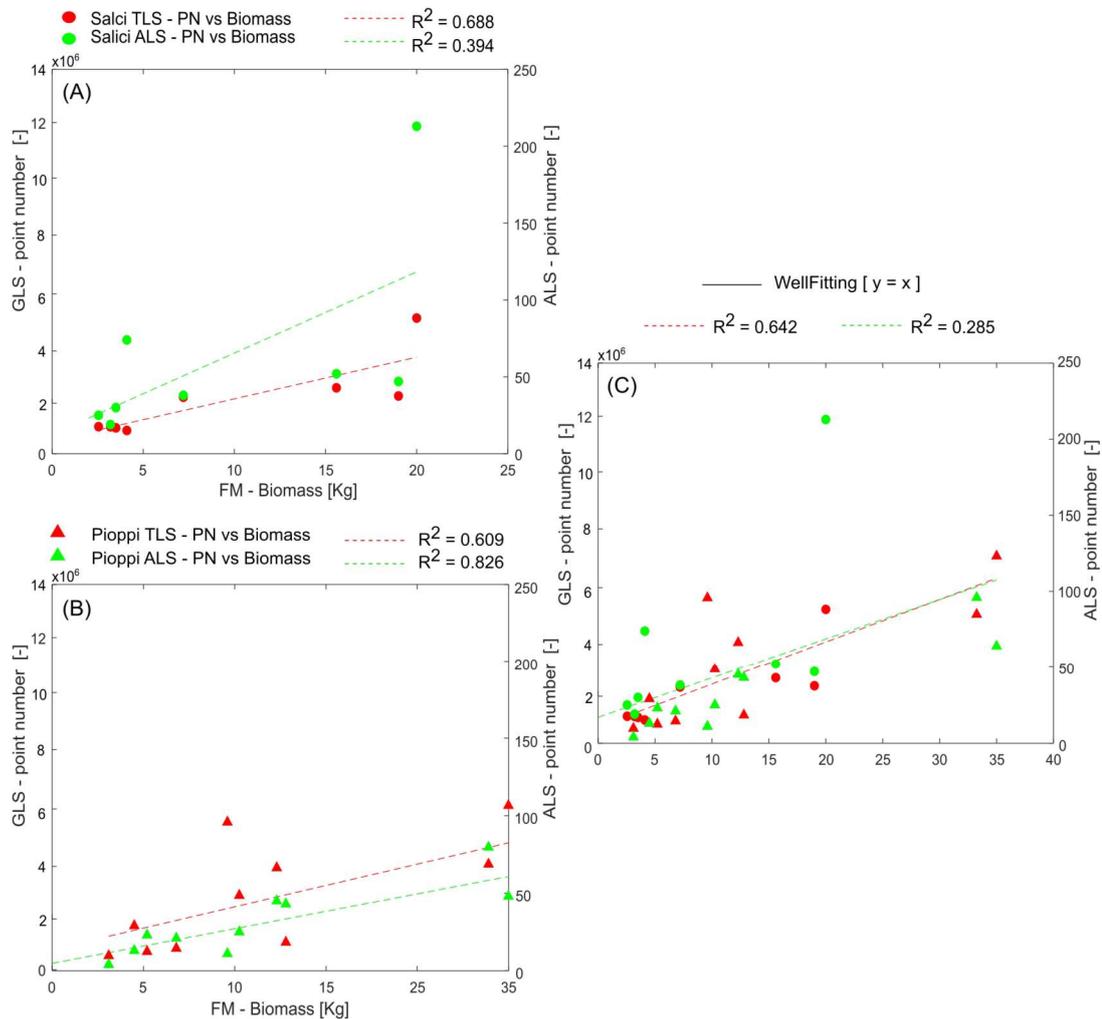


Figura 7.3: In (A) si ricerca una correlazione lineare sulla biomassa per gli arbusti di *Salix alba* L. presi in esame per TLS e ALS; in (B) si ricerca una correlazione lineare sulla biomassa per gli arbusti di *Populus tremula* L.; in (C) si ricerca una correlazione lineare considerando entrambe le specie. I salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolare pieno e triangolare, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde).

dall’algoritmo presentato e di conseguenza, a strati con basso numero di punti sono spesso associate aree circoscritte da geometrie particolarmente incongruenti e sottostimanti rispetto alle aree reali misurate in campo. In Figura 7.4 si può osservare come le nuvole con un numero di punti estremamente basso (dai 4 ai 10 punti) riportano un errore percentuale negativo valutato sulla massima area proiettata notevolmente consistente,

indice di una sottostima della grandezza. Questo si verifica in modo particolare sulle nuvole ottenute attraverso l'ALS.

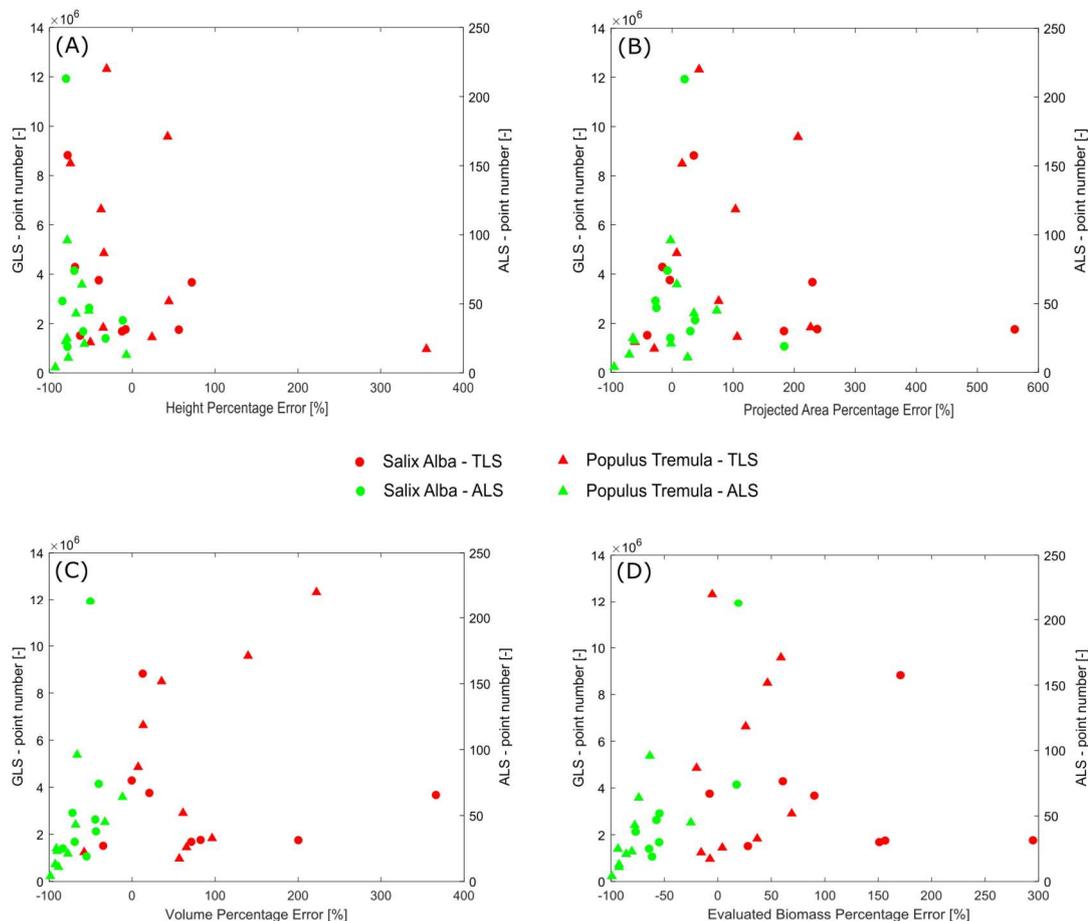


Figura 7.4: Relazione fra il numero di punti e l'errore percentuale valutato per ciascun arbusto prendendo in considerazione l'altezza (A), la massima area proiettata (B), il volume (C) e la biomassa stimata (D) e non tenendo in conto la correzione sul volume definita in 7.4. I salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolari e triangolari, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde).

Sulla base di quanto detto, si afferma che, l'algoritmo *Concave Hull Slicing Algorithm* risulta più performante se applicato alle nuvole provenienti da TLS, mentre il basso numero di punti che caratterizza le nuvole da ALS ne riduce l'accuratezza. Nonostante questo, la disponibilità di dati da TLS è assai limitata in quanto proprio per le caratteristiche dello strumento, i rilievi possono essere condotti solo localmente e ristretti a pochi individui. Le indagini su più ampia scala invece sono possibili solo grazie ad acquisizioni estese su vaste superfici, come la tecnologia Airborne Laser Scanner permette

di ottenere. Tuttavia, il volume ottenuto elaborando le nuvole da ALS si presenta senza dubbio sottostimante ma anche caratterizzato da una forte correlazione rispetto alle misure svolte in campo. Questo ha fatto pensare all'ipotesi di poter correggere tale volume, ricercando una relazione che nel suo complesso porti a una maggior compatibilità tra i volumi calcolati con i due metodi. La presente relazione verrà successivamente illustrata.

7.3 Analisi sensitiva (influenza dei parametri di settaggio)

L'algoritmo *Concave Hull Slicing Algorithm* proposto risulta particolarmente sensibile ad alcuni parametri di settaggio necessari per il corretto funzionamento del codice. Tra questi, l'altezza dell'*i*-esimo strato con il quale la nuvola in input, rappresentativa del singolo arbusto studiato, viene suddivisa. La scelta di tale parametro si basa in primo luogo su un principio di coerenza rispetto alla procedura adottata durante le misurazioni in campo e, in secondo luogo (non certo di minore importanza) l'onere computazionale in termini di tempo di processing richiesto dall'algoritmo. Al fine di definire un valore che soddisfi entrambi i requisiti, è stata condotta un'analisi di sensitività per valori di altezza dell'*i*-esimo strato pari a 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50 m sulle nuvole corrispondenti agli 8 esemplari di salice e ai 10 esemplari di pioppo. Per ciascuna altezza sono stati valutati gli errori metrici MBE, MAE e RMSE calcolati sul volume, principale grandezza di interesse in relazione ai valori ottenuti dalle misurazioni di campo.

Il Mean Bias Error, valutato per il TLS, mostra un andamento crescente passando da un'altezza pari a 0.10 m a un'altezza di 0.50 m. Lo stesso comportamento caratterizza anche gli altri due errori metrici, il Mean Absolute Error e il Root Mean Square Error. Dunque, è chiaro che al crescere del valore assunto dal parametro di settaggio *dH*, il volume ottenuto attraverso GLS varia sensibilmente diminuendo di accuratezza. Questo risultato è significativo, in quanto la densa nuvola di punti ottenuta attraverso GLS permette un'importante accuratezza nel rilievo delle forme e delle geometrie dell'arbusto rilevato. All'aumentare dei valori di *dH* quindi, ogni strato individuato coinvolge un volume maggiore, sovrastimando la stessa grandezza relativa all'intero arbusto. Quanto detto può essere osservato in Figura 7.5B ove viene mostrato la variazione percentuale di ciascuna metrica di errore in relazione al risultato ottenuto considerando un *dH* di 0.1 m.

Per quanto riguarda ALS invece quello che si verifica è un comportamento opposto a quanto detto per TLS. L'errore diminuisce all'aumentare del valore di *dH*, mantenendosi però particolarmente sottostimante. Inoltre, la costante presenza di un valore dell'RMSE maggiore dell'MAE mostra come la distribuzione dell'errore sia poco omogenea (Figura 7.5A).

Un ruolo importante è svolto anche dall'onere computazionale richiesto dal codice per l'elaborazione dei risultati, di particolare rilievo quando questo viene applicato su grande scala per la valutazione del volume delle aree vegetate e elaborazione della biomassa. Come si osserva in Figura 7.5B il tempo computazionale segue un trend decrescente all'aumentare del valore di *dH*, risultando più marcato per TLS a causa dell'importante numero di punti costituenti le singole nuvole ottenute attraverso questo strumento. Si

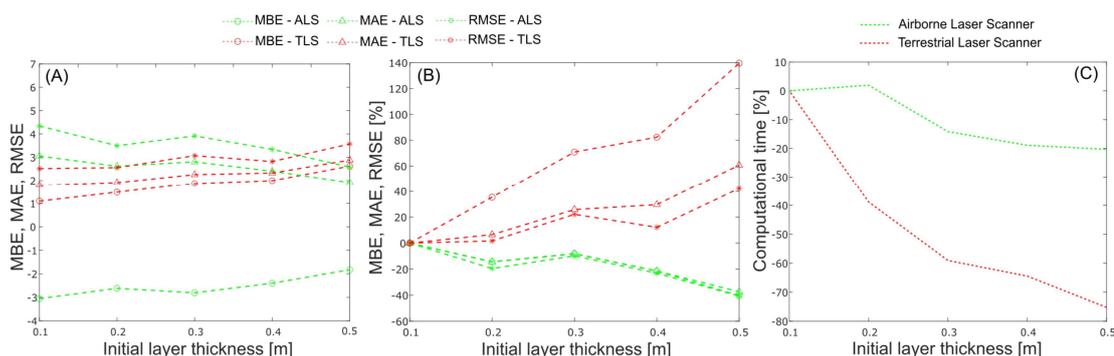


Figura 7.5: In (A) si mostra la variazione delle metriche di errore adottando un' altezza del layer di suddivisione iniziale (dH) della nuvola crescente; in (B) si osserva l' andamento della variazione percentuale degli errori metrici MBE, MAE e RMSE, calcolati rispetto a $dH=0.1$ m, in relazione alla variazione di altezza iniziale (dH) scelta per l' i -esimo strato, valutati per le due tecniche di acquisizione; in (D) invece si osserva l' andamento della variazione percentuale, rispetto a $dH=0.1$ metri, del tempo di computazione al variare del valore di dH scelto, per le due tecniche di acquisizione. Anche in questo caso, in verde ALS e in rosso TLS.

osserva come passando da un dH uguale a 0.10 m a un dH di 0.50 m il tempo di computazione si riduce di circa la metà.

La scelta di adottare il parametro di settaggio uguale a 0.30 m per lo svolgimento delle analisi costituisce una soluzione intermedia che pondera l'accuratezza del risultato e il tempo necessario al codice per elaborare la soluzione, ottenendo così un risultato con alto livello di confidenza in un tempo accettabile.

7.4 Coefficiente di correzione per il volume da ALS

A seguito delle considerazioni fatte nella sezione precedente, si è ricercata un'adeguata correzione da applicare al volume calcolato attraverso la funzione *ConcaveHull Slicing* per la tecnica ALS con l'obiettivo di ridurre l'errore rispetto alle misure ottenute dai rilievi in campo. Si può osservare come l'ALS porti sempre a una sottostima dell'altezza pari a circa 1 m, similmente a quanto sottolineato da altri lavori in letteratura (Yu et al., 2010; Mielcarek et al., 2018b), specialmente quando la densità di punti diminuisce (García et al., 2010; Mitchell et al., 2012), incrementato anche da condizioni di assenza di foglie (leaf-off) (LIDAR; Gaveau and Hill, 2003). Un errore che accomuna tutti gli arbusti presi in esame (Figura 6.1) e che conferma quanto già noto in letteratura per quanto riguarda l'utilizzo di questo strumento in ambito forestale. Tale correzione viene proposta con l'obiettivo di poter applicare ed estendere il codice su più ampia scala e dunque ridurre notevolmente la propagazione dell'errore sul volume stimato, altrimenti non attendibile.

A partire quindi dalla correlazione precedentemente mostrata in Figura 7.2A tra le grandezze volumetriche ALS e da misure in campo, prendendo in considerazione l'intero campione di arbusti selezionati, si è adeguatamente ricercato il valore di un fattore correttivo che minimizzasse lo scarto. In particolare, tale analisi è stata condotta prendendo in considerazione soltanto i valori di volume (FM) appartenenti ad un intervallo di confidenza del 95% così da ridurre l'errore proveniente da outlier.

Attraverso un procedimento *trial-and-error* si è osservato che il rapporto medio tra le misure di campo e le stime attraverso codice riportavano a un valore di 2.25 ottenendo un un grado di correlazione con R^2 pari a 0.84. Tale valore è stato quindi adottato per la correzione del volume da ALS secondo la relazione:

$$V = 2.25 \cdot V_{ALS}, \quad (7.1)$$

ed introdotto opportunamente nel codice di calcolo.

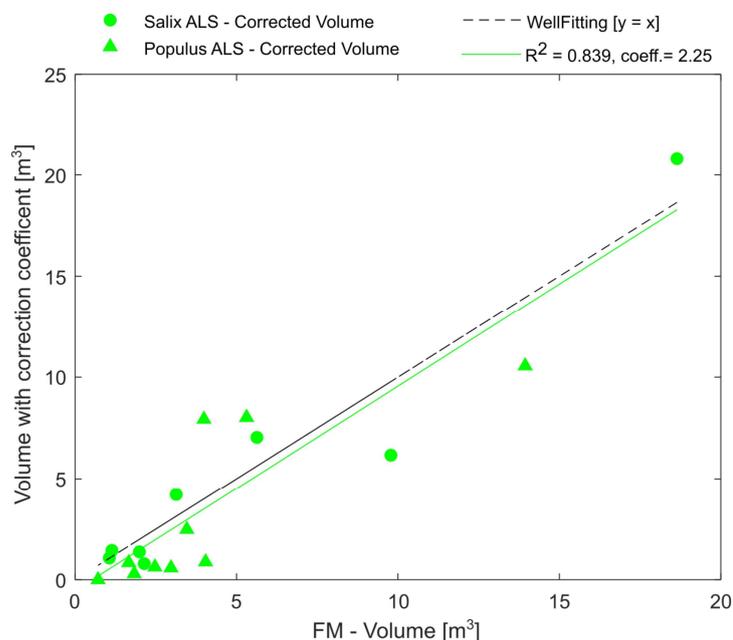


Figura 7.6: In figura si osserva la distribuzione dei volumi valutati dal codice di calcolo per le nuvole ALS e successivamente corretti con la relazione descritta dall'equazione 7.1. La retta di correlazione risulta circa equivalente alla retta di well fitting stabilità rispetto alle misure in campo, riportando un valore di R^2 pari a 0.84.

Nonostante la tendenza a sottostimare le altezze e di conseguenza i volumi, i risultati ottenuti a seguito della correzione apportata mostrano un'alta correlazione con le misure di campo. La correzione applicata ai valori ottenuti per i singoli arbusti ha portato a un'importante riduzione delle statistiche di errore per entrambe le specie come riportato

in Tabella 7.2. La differenza tra i volumi corretti e e quelli ottenuti dalle misure in campo sembra più marcata per i pioppi, mentre per i salici l'errore quasi scompare.

Tabella 7.2: Statistiche di errore a confronto valutate sulla grandezza volumetrica ottenuta da ALS prima e dopo la correzione attraverso la l'equazione 7.1.

Shrub species	Not Corrected			with Correction Coefficient		
	MBE [-]	MAE [-]	RMSE [-]	MBE [-]	MAE [-]	RMSE [-]
<i>Salix Alba L.</i>	-3.06	3.06	4.40	-0.08	1.32	1.7
<i>Populus Tremula L.</i>	-3.26	3.26	3.95	-0.82	2.15	2.4

7.5 Confronto con le formule di letteratura

Il metodo di valutazione del volume dell'arbusto scelto è di notevole importanza per ottenere misure accurate della biomassa e della densità di biomassa da remoto. Tuttavia, tecniche di acquisizione dati differenti possono condurre a differenze non trascurabili di questa grandezza. Inoltre, anche la stagionalità delle condizioni vegetative può influenzare le misurazioni. Ad esempio, in periodi in cui si ha assenza di foglie, la densità varia notevolmente rispetto a periodi in cui la chioma dell'arbusti risulta essere rigogliosa (LIDAR; Gaveau and Hill, 2003).

Nel presente lavoro, i valori di densità valutati in campo sono stati paragonati con i risultati provenienti da altri casi studio per le medesime specie. Diversi autori hanno proposto valori di densità per specie riparie e boschive in diverse zone dell'Europa e del mondo. Un criterio particolarmente usato per la valutazione di questa consiste nel definire la biomassa e il volume attraverso equazioni allotropiche e geometriche.

Secondo Simões (2006), la biomassa è spesso calcolata come una funzione dell'altezza media della specie, densità apparente della specie e percentuale di copertura fogliare (Silva et al., 2006; Rosa et al., 2011; Winer et al., 1981); altri criteri si basano sull'età della massa vegetale presente in una determinata area (Garcia-Gonzalo et al., 2014). Il volume risulta essere però la grandezza più soggetta a variabilità in quanto strettamente dipendente dalla metodologia e dall'accuratezza dei rilievi adottati per misurarla. Anche in questo caso, equazioni di tipo geometrico sono di frequente utilizzo come ad esempio l'equazione parametrizzata proposta da Garcia-Gonzalo et al. (2014); Falcão (1997); McDill and Amateis (1992); Ricardo (2010), ove si definisce il volume a partire da parametri opportunamente tarati su diverse specie e grandezze geometriche quali l'area basale e l'altezza dominante. Equazioni di tipo strettamente geometrico hanno trovato largo impiego: tra queste Brown (1981)(Eq. 4.1) e Pereira et al. (1995) (Eq. 4.2) hanno

definito il volume di un generico arbusto attraverso la definizione di un ellissoide circoscritto all'elemento considerato. Il volume contenuto all'interno dell'ellissoide è definito caratteristico della specie in esame.

In Tabella 7.3 si confrontano i risultati in termini di densità forniti dalle misure in campo svolte con il criterio mostrato in Figura 4.2 e i valori ottenuti attraverso le equazioni di Brown (1981) e Pereira et al. (1995). Si osserva come Brown (1981) approssima molto bene quanto misurato in sito, mentre Pereira et al. (1995) invece sovrastima notevolmente. Nonostante il primo si sia rivelato un metodo particolarmente efficace nella valutazione accurata del volume, è necessario ricordare che si tratta di un metodo sviluppato sulla base di misure dirette in campo e quindi misure puntuali e sito-specifiche. Risulta quindi applicabile solo localmente, affetto inoltre da tutte le limitazioni riscontrabili nelle misure di campo quali il costo, il tempo necessario per lo svolgimento e l'accesso alle aree studio, talvolta difficoltoso.

Per entrambi gli autori, ma anche nelle misure svolte in campo e proposte nel presente caso studio, la valutazione del volume, particolarmente influente per la valutazione della densità, viene considerata al lordo dei vuoti presenti all'interno della geometria dell'arbusto, creati dalle sovrapposizioni dei rami e delle foglie all'interno.

Tabella 7.3: Valori di densità volumetrica ottenuti dalle misurazioni in campo attraverso il metodo descritto in 4.2 a confronto con i valori di densità valutati attraverso le formule proposte da Brown (1981) e Pereira et al. (1995).

Shrub ID	FM-Volume [m^3]	FM-Mass [kg]	FM-Density [Kg/m^3]	Brown (1981) Density [Kg/m^3]	Pereira et al. (1995) Density [Kg/m^3]
SA01	18.64	20.00	1.07	1.73	4.61
SA02	1.14	7.21	6.33	-	-
SA03	1.06	3.22	3.01	-	-
SA04	2.14	2.55	1.19	1.03	2.75
SA05	1.99	3.50	1.76	2.67	7.12
SA06	5.63	19.00	3.37	2.89	7.71
SA07	9.78	15.60	1.59	5.45	14.55
SA08	3.13	4.10	1.36	4.09	10.92
PT01	5.31	12.30	2.32	1.81	4.83
PT02	2.97	10.25	3.45	2.74	7.30
PT03	2.47	9.60	3.89	5.56	14.78
PT04	1.83	4.50	2.46	5.26	14.03
PT05	3.46	12.80	3.70	3.81	10.16
PT06	1.66	6.80	4.10	6.71	17.89
PT07	4.04	5.20	1.29	1.79	4.78
PT08	13.94	33.25	2.33	-	-
PT09	3.99	35.00	8.76	9.16	24.49
PT10	0.71	3.10	4.36	6.05	16.13

In letteratura emergono valori di densità per i salici e pioppi non particolarmente conformi a quanto trovato, differenza dovuta a diverse metodologie adottate per la valutazione del volume. Nowak (2020) propongono dei fattori di conversione da volume a biomassa, dunque assimilabili a densità per pioppi e salici dell'ordine di $240 g/m^3$ per i primi e di $110-240 g/m^3$ per i secondi basandosi su valori medi ottenuti dai risultati di Winer et al. (1981) e Nowak (1991). L'incertezza sulla metodologia adottata dai due

autori per la valutazione del volume è la principale fonte di assenza di corrispondenza tra i risultati ottenuti nel presente caso studio e quelli riscontrati in letteratura.

In particolare, come emerge da Nowak (1991), gli autori hanno caratterizzato la geometria e il volume delle piante e degli arbusti studiati attraverso relazioni allotropiche che uniscono metriche morfologiche della chioma, le loro dimensioni e la percentuale di copertura fogliare, mentre in Winer et al. (1981) le caratteristiche volumetriche delle diverse specie vegetali sono state misurate o stimate facendo riferimento a geometrie sferiche o spesso ellittiche circoscritte alla struttura della chioma. Un'importante differenza emerge invece sulla valutazione della massa vegetale. I valori di densità ottenuti dai diversi autori per le diverse specie da loro analizzate, sono stati valutati attraverso la misurazione della massa secca (essiccazione a 65° per 24 ore) ove in particolare Nowak (1991) ha eliminato la matrice legnosa conducendo l'analisi solo sulla chioma, mentre Winer et al. (1981) ha misurato separatamente foglie e fronde ricavando così un valor medio di densità secca.

Come emerge da diversi studi quindi, il volume può essere calcolato con metodologie diverse oltre molteplici gradi di dettaglio (Yan et al., 2019; Fernández-Sarría et al., 2013). La complessità geometrica di un arbusto o di una pianta in generale è legata alla presenza di una chioma costituita da rami intrecciati e foglie. Il livello di dettaglio con cui la geometria viene riprodotta può rivelarsi importante nei confronti di un risultato accurato.

Uno degli obiettivi di questo lavoro di ricerca è quello di fornire quindi una valutazione della densità di biomassa strettamente correlata a una ben precisa metodologia per la valutazione del volume coinvolto dall'arbusto. Questo ha permesso di ottenere valori di biomassa arbustiva di particolare interesse anche per potenziali utilizzi su lavori e ricerche in ambito forestale.

7.6 Correlazione fra la densità di biomassa e densità di punti della nuvola LiDAR

La densità di biomassa di una specie arbustiva è una caratteristica legata non solo al volume coinvolto dalla chioma, ma anche dalle caratteristiche fisiologiche e anatomiche della specie. Come accennato in precedenza, i pioppi si distinguono per la loro propensione allo svilupparsi in altezza e il fusto svolge generalmente un importante ruolo di sostegno. La robusta presenza di una matrice legnosa fornisce un importante contributo alla densità complessiva della pianta. Il salice invece tende a svilupparsi a macchia, con una morfologia più sferica e uno sviluppo laterale che ne determina la sua caratteristica particolarmente folta di foglie con rami più gracili e teneri.

La natura più legnosa del pioppo quindi è il motivo per il quale si ha una densità di punti per unità di volume maggiormente concentrata nelle zone centrali dell'arbusto, come riportato da Latella et al. (2021), mentre, nelle zone più periferiche della chioma, i punti si riducono determinandone così una geometria non molto accurata se la densità di acquisizione dello strumento non è eccessiva.

Nei salici invece, la chioma tondeggiante caratterizzata da un numero maggiore di foglie se pur di dimensioni più piccole rispetto al pioppo, ha conferito un numero maggiore di ritorni durante la scansione con ALS circa meglio distribuiti sulla superficie dell'arbusto. Questo fa sì che la geometria possa essere definita in modo più preciso conferendo così una nuvola geometricamente più consona alla realtà rispetto a quelle ottenute per i pioppi.

In generale però la densità di punti su unità di volume non risulta particolarmente correlata alla densità di biomassa, riportando valori di R^2 estremamente bassi per una correlazione lineare (Figura 7.7). Come mostrato nella Figura 7.3 invece, il numero di punti della nuvola LiDAR aumenta con la biomassa. Il presente lavoro di tesi ha, quindi, voluto indagare la relazione fra densità di punti della nuvola LiDAR e densità di biomassa misurata in campo. Nel caso di risposta affermativa a tale quesito scientifico, la necessità di misure in campo per determinare tale grandezza si ridurrebbe a pochi esemplari "di controllo", permettendo indagini su vasti domini tramite le sole misure di telerilevamento. Tuttavia, i risultati ottenuti e mostrati nella Figura 7.7 mostrano come la densità volumetrica dei punti non sia coinvolta strettamente in una relazione sito-specifica con la densità di biomassa. Si osserva come i pioppi mostrano una densità di punti importante anche per valori di biomassa vegetale non particolarmente eccessiva (Figura 7.7C), come nel caso di piccoli arbusti. Ciò dipende dal fatto che, nonostante la ridotta dimensione dell'oggetto rilevato, la matrice legnosa svolge un ruolo importante nella sensibilità dell'individuo ad essere rilevato dai sistemi di telerilevamento.

Per quanto riguarda i valori ottenuti da rilievi TLS lo scattering è più contenuto, ma comunque importante per definire una solida correlazione tra le grandezze in esame. Utilizzando il metodo "bisquare" per la ricerca di una correlazione lineare, meno sensibile alla presenza di outlayers, si ottiene un valore di adjusted R_2 di 0.69 nel caso di salici con tecnica TLS (Figura 7.7C - 7.7D). Al contrario ALS riporta una dispersione tale da non permettere di definire una legge di correlazione, probabilmente dovuto alla bassa densità di punti a cui è soggetta la nuvola. Inoltre tale dispersione si osserva in modo accentuato anche nei pioppi.

Come già noto in letteratura, si ha dello scattering sull'accuratezza della densità dei punti, associata all'elemento target ricercato, dipendente anche da fattori fisici attribuibili propriamente alle condizioni atmosferiche e di luminosità oltre che alle caratteristiche tecniche degli strumenti utilizzati per il rilievo. Per quanto riguarda le condizioni atmosferiche e di luminosità, non è da trascurare il bias associato all'assorbimento atmosferico (Yan et al., 2012; Höfle and Pfeifer, 2007) e alle caratteristiche di riflettività del suolo (Höfle and Pfeifer, 2007). Svolge un ruolo importante anche la luminosità del terreno in quanto viene considerata come ideale una luminosità superficiale isotropica definita come luminosità Lambertiana (Wagner, 2010; Höfle and Pfeifer, 2007).

Quest'ultimo fattore influenza particolarmente anche la presenza di bias di tipo fisico-meccanico legati all'angolo di scanning, in quanto target particolarmente "brillanti", ovvero caratterizzati da un alto livello di luminosità, inducono a errori più marcati. Bias legati all'angolo di scanning sono associati anche alle caratteristiche topografiche del territorio. Territori particolarmente pianeggianti riducono questo tipo di errore, perchè

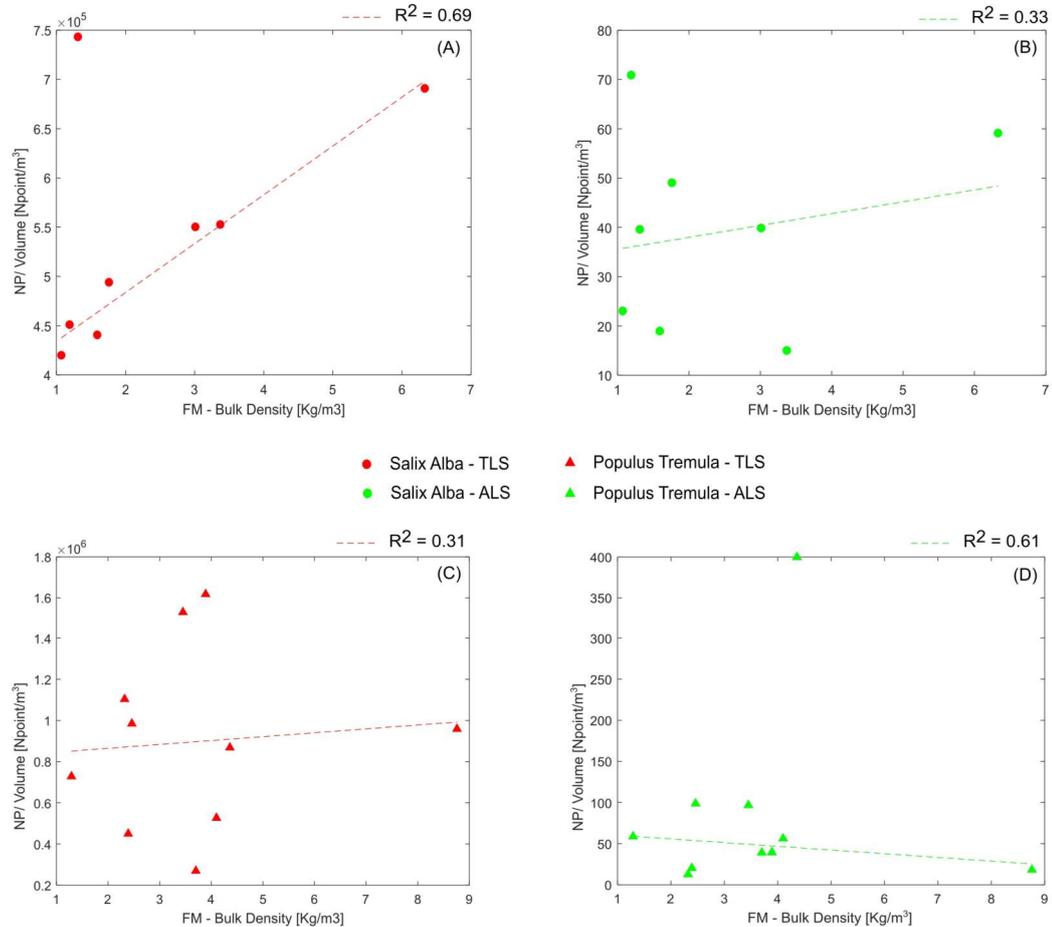


Figura 7.7: Correlazione tra densità di biomassa e numero di punti su unità di volume con valutazione del valore di adjusted R^2 per Salix Alba L. e Populus Tremula L. attraverso l'utilizzo delle due tecniche ALS e TLS. I salici e i pioppi sono rappresentati da marker circolare pieno e triangolare, rispettivamente; il colore indica invece la tecnica di misura (TLS in rosso, ALS in verde).

l'angolo di scanning coincide solitamente con l'angolo di incidenza dell'impulso. Kukko et al. (2008) afferma che l'effetto dell'angolo di incidenza è significativo quando questo è maggiore di 20 gradi. Tra i fattori che riducono l'accuratezza è giusto annoverare anche l'altezza di volo (Höfle and Pfeifer, 2007).

Il buon risultato ottenuto sugli esemplari di salice può far pensare alla presenza di una relazione tra densità di punti e densità di biomassa vegetale, dunque future investigazioni e misure potrebbero portare alla comprensione del problema.

7.7 Potenzialità e limitazioni dell'approccio

La metodologia proposta, strutturata sull'approccio "*Concave Hull Slicing Methods*" proposto da Yan et al. (2019), ha riportato nella sua integrità risultati soddisfacenti. Si osservi in particolar modo quanto ottenuto per i dati acquisiti da Airborne Laser Scanner, tecnologia di principale interesse nel presente lavoro.

La suddivisione della nuvola di punti in strati permette di approssimare nel miglior modo possibile la geometria dell'arbusto, anche se caratterizzata da una bassa densità di punti. La robusta relazione individuata anche a seguito della correzione del volume con opportuno coefficiente permette di ottenere ordini di grandezza affidabili di questa quantità in quanto circa coincidenti con le misure di campo. Tra le potenzialità della presente metodologia si annoverano:

- la possibilità di elaborare grandi quantità di dati anche su più ampia scala concentrando le misure di campo a pochi individui, utili per la taratura del modello;
- limitare gli oneri computazionali richiesti dal codice di calcolo a seguito di un'accurata analisi di sensibilità dei parametri che entrano in gioco, soprattutto l'altezza dH relativa alla prima suddivisione della nuvola in strati omogenei;
- la presenza di limitati parametri di input permette di estendere tale metodologia a contesti e scenari diversi laddove si necessiti di una stima della biomassa della vegetazione presente o la caratterizzazione geometrica delle specie.

La taratura e la scelta dei parametri di input però svolgono un ruolo chiave per l'accuratezza dei risultati e la correttezza del metodo. Questi conducono a delle limitazioni nell'approccio.

Tra queste emergono:

- la stima della densità di biomassa vegetale è la principale grandezza che conduce a potenziali errori nella valutazione della biomassa. Come emerge da letteratura, non esiste una metodologia univoca per la quantificazione di tale grandezza e i valori presenti nei più disparati campi di applicazione forniscono quantità ottenute da procedure diverse di valutazione. La quantificazione della densità di biomassa vegetale deve essere conforme con la metodologia adottata per il calcolo del volume identificato;
- la presente metodologia risulta inoltre inefficace su arbusti di piccola taglia, di fatto inferiori a 1.5 metri in altezza data la presenza di nuvole caratterizzate da un basso numero di punti (da 2 a 6);
- la biomassa degli arbusti è inoltre particolarmente suscettibile all'accuratezza del DTM. Nel presente lavoro è stato tenuto conto della presenza del suolo eliminando forfettariamente uno strato di 0.10 m dalla nuvola di punti rappresentativa di ciascun arbusto, dimensione valutata a seguito di attente osservazioni dell'intera nuvola rappresentativa dell'area studio. Nel caso in cui si ritenga utile o necessario

eliminare il suolo attraverso l'individuazione del DTM, l'accuratezza di questo svolge un ruolo estremamente importante. Le piccole differenze in altezza dei punti appartenenti alla vegetazione e al terreno sottostante possono condurre a sovrastime o sottostime se non adeguatamente separate soprattutto laddove la variazione del suolo in termini di pendenze locali è particolarmente accentuata o dissestato (Estornell et al., 2011).

Parte II

Metodologia su ampia scala

Capitolo 8

Estensione dell'algoritmo per l'analisi su ampia scala

Una volta tarato il modello di calcolo del volume e della biomassa arbustiva per individui tester quali le specie di *Salix Alba* L. e *Populus Tremula* L. introdotti al Capitolo 4, è stato possibile definire un algoritmo più generale. Lo scopo di questo nuovo algoritmo è quello di automatizzare la ricerca di specie vegetali su una data superficie e quindi valutare sia la biomassa del singolo individuo sia quella totale dell'area di interesse. Tutto ciò è stato sviluppato conducendo un'analisi sull'intera barra in località San Benigno Canavese come illustra la Figura 3.2B.

"*The ConcaveHull Algorithm*" (si veda Capitolo 5.1) si amplia con uno step preliminare che mira a ricercare clusters di vegetazione partendo da rilievi fotogrammetrici effettuati durante le acquisizioni con LiDAR aerotrasportato. Tale algoritmo è capace di fornire due importanti output: il primo legato all'individuazione e alla quantificazione della biomassa della vegetazione arbustiva strettamente caratteristica dell'alveo del corso d'acqua, mentre il secondo l'individuazione e la quantificazione della biomassa concentrata nelle regioni arboree limitrofe al canale e alveo riattivabile, importanti per ulteriori studi di matrice forestale ed ecomorfodinamica (Latella et al., 2021).

Questa nuova procedura su più ampia scala prende il nome *Extensive Biomass Estimation* alla quale ci riferiremo nei paragrafi successivi con il suo acronimo *EBE*.

8.1 *Extensive Biomass Estimation Algorithm (EBE)*

EBE si articola sommariamente in due parti. Nella prima fase il codice ricerca alberi maturi (intesi tali se caratterizzati da un' altezza maggiore a una definita soglia) o clusters di arbusti (spesso raggruppati tra loro con sovrapposizione di chiome) dalle ortofoto RGB e successivamente, sulla base dei clusters segmentati, la nuvola di punti viene tagliata per ottenere i singoli individui o patterns separati. Nella seconda parte il codice valuta la biomassa in accordo con "*The ConcaveHull Algorithm*" e definisce la mappa della distribuzione della biomassa areale sulla superficie in esame. La Figura

8.1 mostra un flow chart riassuntivo dei principali passi seguiti dal codice, il quale sarà dettagliatamente illustrato in tutte le sue parti nel capitolo seguente.

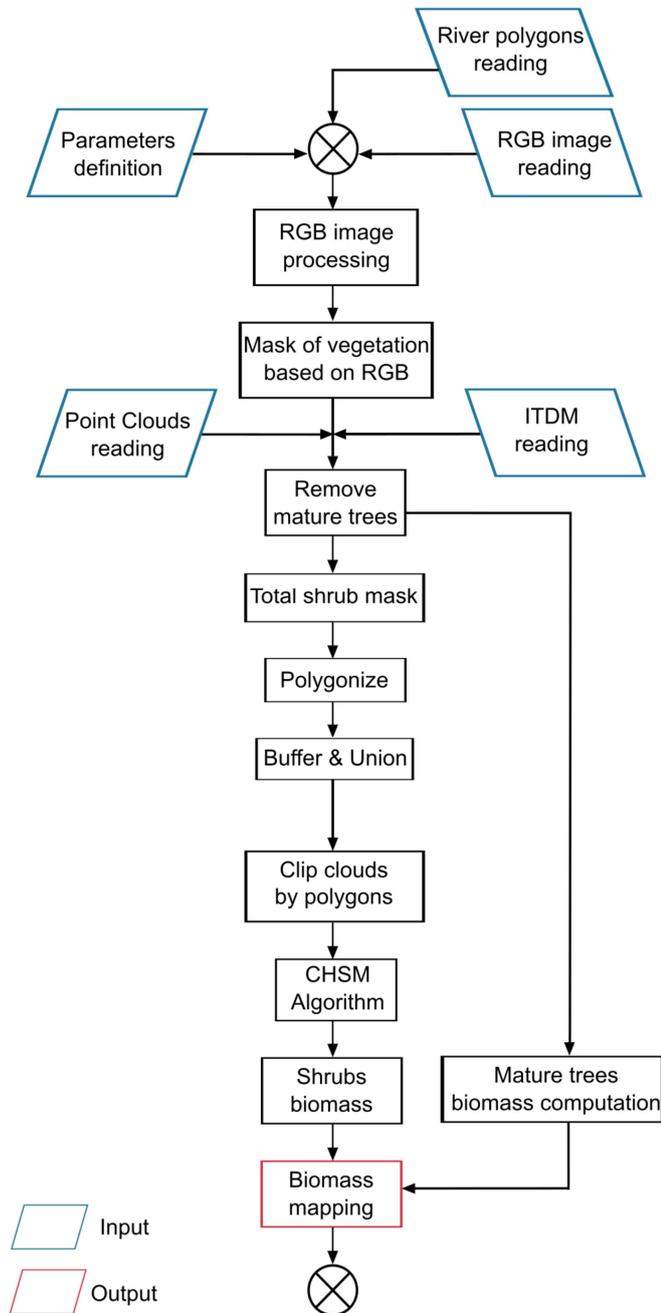


Figura 8.1: Flow Chart relativo all'algoritmo EBE (*Extensive Biomass Estimation*).

8.1.1 Ricerca della vegetazione in alveo

Il codice,

(i) si apre con una sezione iniziale ove è possibile definire i dati di input. Tra questi sono necessari:

- Le ortofoto di riferimento in formato .tif o .jpeg acquisiti durante i voli LiDAR;
- I poligoni delimitanti (1) l'area del solo alveo riattivabile, ovvero l'area caratterizzata per la maggior parte dalla presenza di specie arbustive (individuata con il metodo del terrazzo più "recente" o nel caso in esame relativo all'area interessata da un deflusso associato a un tempo di ritorno di 1 anno), (2) del presente canale attivo al momento del rilievo e (3) l'intera area di interesse sulla quale condurre l'analisi (solitamente l'area di bankfull);
- La ricerca delle aree vegetate avviene attraverso informazioni colorimetriche su scala RGB fornite dalle singole celle dell'ortofoto (Figura 8.3A). Tra i dati di input è, inoltre, necessario assegnare i valori soglia per i tre toni di colore fondamentali RGB (rosso, verde e blu). La definizione di queste soglie passa da un'analisi preliminare delle ortofoto attraverso software di calibrazione fotogrammetrica o 3D Point Cloud processing (nel presente caso è stato utilizzato CloudCompare) per comprendere al meglio a quali range di valori RGB corrispondono le aree arbustive.
- Tra i dati di input è presente un file ITDM .txt contenente la posizione e la quota massima delle specie arboree presenti nell'area corrispettiva all'i-esima ortofoto presa in esame (Latella et al. (2021)).
- Infine il codice richiama la nuvola di punti disponibile in file di formato .las o .txt se già opportunamente convertiti.

Oltre a quanto detto, EBE richiede la definizione di ulteriori parametri necessari per il corretto svolgimento del codice. Tra questi si hanno:

- L'altezza limite necessaria per discriminare alberi maturi da arbusti (*height threshold*);
- Il raggio di buffer per la clusterizzazione degli arbusti (*shrub buffer radius*);
- Il numero di celle minimo per escludere piccoli arbusti non significativi (*size threshold*);
- L'altezza iniziale dello strato con cui suddividere la nuvola in *The ConcaveHull Algorithm* (*dH, initial layer thickness*);
- Il valore di densità media stimata necessaria per il calcolo della biomassa (*shrub bulk density*);
- Il valore del parametro di correzione del volume ALS stimato (*correction factor*);

- La dimensione della cella relativa alla mesh scelta per la scrittura della mappa di biomassa (*map resolution*);

La tabella 8.2 riassume il set di parametri in input.

Tabella 8.1: Tabella riassunti dei parametri in input relativi al presente caso studio.

Parametro	Unità	Valore	Uso
Red range	-	0-0.25	banda di rosso normalizzata per definire le aree vegetate
Green range	-	0-0.15	banda di verde normalizzata per definire le aree vegetate
Blue range	-	0-0.1	banda di blu normalizzata per definire le aree vegetate
height threshold	m	2.5	per escludere gli alberi maturi dalle aree arbustive
size threshold	-	3	per escludere piccoli cluster
shrub buffer radius	m	1.0	per includere i rami laterali
initial layer thickness	m	0.3	parametro per la procedura <i>ConcaveHull Slicing</i>
shrub bulk density	kg/m ³	2.578	densità media pesata sugli arbusti tester (percentile 90%)
correction factor	m	2.25	per correggere il volume ALS in <i>Concave Hull Slicing function</i>
map resolution	m	1.0	risoluzione del pixel per la mappa di biomassa areale

(ii) Con l’obiettivo di aumentare l’accuratezza della localizzazione delle regioni vegetate l’immagine RGB viene pre-processata così da aumentare il contrasto tra le celle caratterizzate da un tono di colore chiaro (spesso associate ad aree prive di vegetazione corrispondenti a depositi di sedimenti) e quelle più scure associate a patterns di alberi e arbusti.

La modellazione del contrasto viene svolta dal codice andando a normalizzare il valore di RGB di ciascuna cella rispetto al massimo individuato tra le celle costituenti l’ortofoto in esame. Come si osserva in Figura 8.2 risultato è che i patterns di vegetazione tenderanno a colori più scuri mentre le aree di suolo non vegetato a toni molto più chiari. La normalizzazione delle bande di R-G-B porta ad avere valori che variano in un range compreso tra 0 e 1, dunque valori prossimi a 0 rispecchiano toni scuri mentre valori prossimi a 1 toni chiari.

(iii) Le caratteristiche dell’ortofoto definita in input, come estensione, grandezza delle celle e le coordinate topografiche dei singoli pixel, sono necessarie per la creazione di una matrice logica (*Logical Matrix*) sulla quale si identificano i cluster di arbusti. Di fatto, sulla presente matrice verranno marcate le celle con valori di R-G-B rispettose dei requisiti definiti in ingresso (Tabella 8.1). Alle celle che rispettano i range imposti viene assegnato valore unitario, mentre le altre valore nullo (Figura 8.3B).

Sulla base dei poligoni relativi all’area bagnata opportunamente forniti dal CNR-IRPI e dell’alveo potenzialmente riattivabile come definito in (i), la matrice logica sopra descritta viene tagliata ottenendo così solo l’area di interesse.

(iv) Una volta che la matrice logica è stata creata e le aree vegetate sono state identificate sulla base dei range R-G-B, da essa vengono escluse le aree appartenenti agli individui maturi ovvero quelli caratterizzati da un’altezza superiore a 2.5 m (*height threshold*), valore impostato tra i parametri in ingresso. A partire dal file ITDM precedentemente descritto (i), il codice individua gli esemplari con altezza maggiore della soglia imposta, per poi caratterizzare le loro geometrie.



Figura 8.2: Ortofoto dell'area studio relative all'anno 2019 (A) e 2021 (B) a seguito di *image - processing* per aumentare il contrasto tra aree vegetate e non vegetate.

Per gli alberi definiti maturi, che si sono accresciuti in alveo, si adotta una nota relazione allometrica definita strettamente per specie *Salicacee spp.* e tarata attraverso campionamento diretto su pattern di individui della medesima specie. La relazione utilizzata è stata elaborata da Hasenauer (1997) dal quale ne trae il nome. Questa è definita come:

$$CW = e^{-0.3526 + 0.8680 \cdot \log(H)}, \quad (8.1)$$

che mette in relazione l'altezza (H) dell'individuo il diametro della chioma (CW). La larghezza della chioma permette di calcolare l'area di copertura fogliare occupata dall'*i*-esimo albero. Adesso, le celle della matrice logica - contenute nel poligono che circonda la chioma stessa - vengono portate a valore nullo e dunque eliminate dai cluster arbustivi.

La *Logical Matrix* si presenta come una matrice di dimensioni uguali all'ortofoto RGB con valori pari a 1 in prossimità delle aree arbustive e uguali a 0 al di fuori in particolar modo in corrispondenza delle aree di suolo scoperto, nei canali attivi e al di fuori della regione di interesse.

(v) La clusterizzazione delle aree vegetate avviene attraverso la funzione *bwboundary* appartenente all'*Image processing Toolbox* di *Matlab*. Essa definisce poligoni circoscritti alle celle di valore 1 appartenenti alla matrice logica precedentemente descritta, come mostrato in Figura 8.4A, ovvero tutte quelle celle rappresentative delle regioni arbustive identificate. Tra questi sono presenti anche piccoli poligoni associati ad aree più scure come regioni bagnate, ombre o zone con sedimenti di natura diversa, dunque per un corretto funzionamento del metodo questi vengono opportunamente rimossi. La soglia

dimensionale in termini di celle occupate sotto la quale i poligoni ad esse associati vengono rimossi può essere impostata nella sezione iniziale di definizione dei parametri di input (parametro "*size thrashold*") come descritto in precedenza.

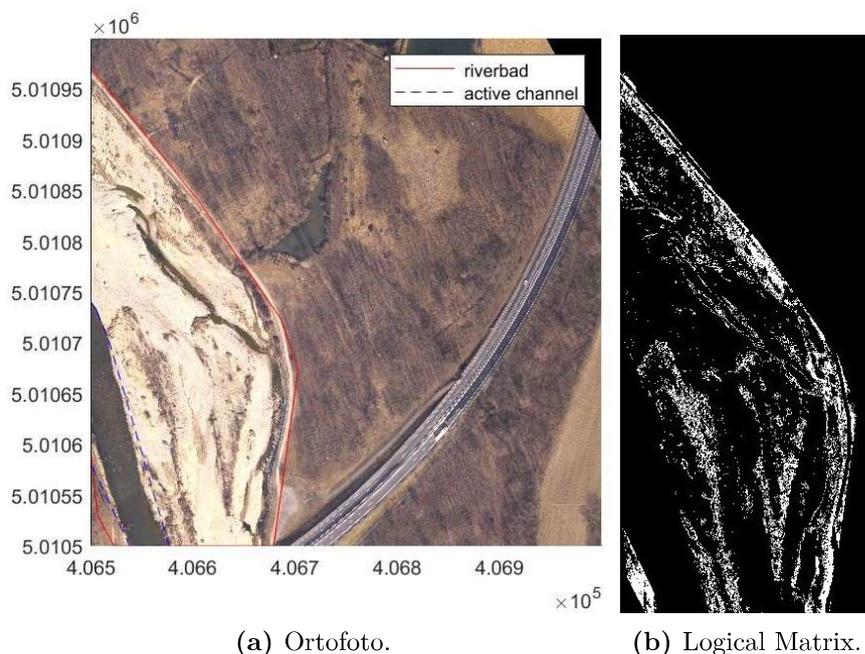


Figura 8.3: (A) Ortofoto dell'area di interesse con delimitazione del canale attivo e dell'alveo riattivabile; (B) Dettaglio della Logical Matrix dove le celle bianche indicano le aree rispettose dei valori RGB ricercati. Si osserva come vi è stato preso in considerazione solo l'alveo al netto dei canali attivi (canali interessati dal deflusso) al momento del volo.

(vi) I poligoni ottenuti sono ben rappresentativi delle aree vegetate in termini di posizione, ma talvolta non circoscrivono correttamente l'arbusto individuato in quanto i rami più esterni della pianta appaiono spesso più chiari rispetto al corpo centrale e quindi esclusi dal range RGB predefinito. Occorre suggerire che, anche una diversa illuminazione dell'area può far variare i valori RGB di un singolo ramo. A tal proposito l'algoritmo opera una correzione sui poligoni preventivamente individuati attraverso la funzione *polybuffer* (Figura 8.4B). Il buffer applicato ha caratteristica circolare ove è necessario impostare le dimensioni del raggio. Tale valore viene scelto pari a circa il valore medio dei raggi misurati sugli arbusti esaminati in campo e settato tra i parametri di input ("*shrub buffer radius*"). I diversi poligoni soggetti al *buffering* vengono fusi ottenendo nuovi poligoni che meglio rappresentano le aree vegetate (Figura 8.4C).

(vii) I poligoni risultanti vengono usati dal codice come maschere per il ritaglio della nuvola di punti proveniente dal rilievo LiDAR.

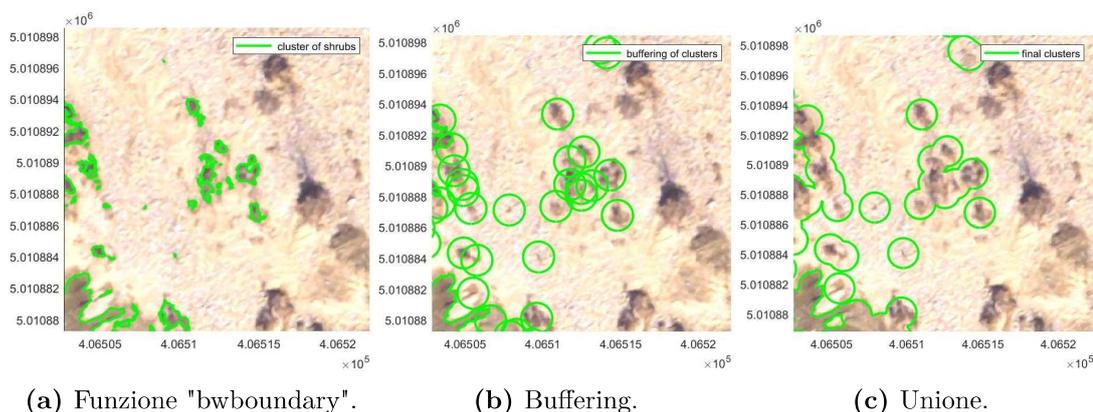


Figura 8.4: (A) Attraverso la funzione "bwboundary" si individuano i poligoni sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi RGB; (B) i poligoni vengono corretti con un buffer circolare di raggio 1 metro (valore medio osservato attraverso le misure in campo); (C) attraverso un'unione si ottengono le maschere poligonali di progetto (i poligoni in evoluzione sono evidenziati dal tratto continuo di colore verde).

8.1.2 Calcolo della biomassa arbustiva e arborea

Procedendo, il codice valuta la biomassa arbustiva ed arborea degli individui identificati al punto precedente sulla base delle singole nuvole estratte dal rilievo.

(vii) La funzione *Concave Hull Slicing Method* (Capitolo 5.1) viene applicata ad ogni ritaglio con l'obiettivo di calcolare il volume e la biomassa per l'arbusto (o insieme di arbusti) individuato.

Il volume calcolato dal codice, viene opportunamente corretto attraverso la relazione che intercorre tra le misure di campo e i valori di volume elaborati dal codice, relazione opportunamente validata e definita al Capitolo ??.

Per la valutazione della biomassa è stato individuato un valore di densità vegetale corrispondente a una media pesata sui campioni studiati in campo, delle loro densità misurate utilizzando il valore filtrato attraverso il percentile al 90%. Quello che si ottiene quindi, è un valore di biomassa medio delle aree individuate importante per una prima quantificazione di materiale vegetato in alveo, ma non specificatamente attribuito alle varie specie presenti. Oltre ciò, è necessario riconoscere che non si tratta propriamente di un valore valutato tenendo conto delle distanze che intercorrono tra arbusti vicini, tuttavia la presenza di spazi intermedi tra individui contigui può portare a sovrastima del valore di biomassa dei singoli clusters.

Per quanto riguarda la valutazione della biomassa arborea il codice adotta due metodi distinti rispettivamente per gli alberi presenti nell'area arbustiva e al di fuori di questa.

Calcolo della biomassa delle specie arboree in alveo

Questa sezione riguarda gli individui arborei esclusi dalla clusterizzazione delle regioni arbustive definite precedentemente. In questo caso la valutazione della biomassa passa

dall'utilizzo di equazioni allotropiche definite sulle caratteristiche geometriche del singolo individuo. Si impone di fatto un analogia tra la geometria dell'albero in esame e un cilindro di diametro pari al diametro del fusto, supponendo concentrata in questo la maggior parte della biomassa coinvolta. Si tratta della legge di Da Vinci (XV secolo), successivamente dimostrata da Eloy (2011), secondo la quale la somma delle sezioni dei rami coincide con la sezione stessa del tronco.

Nota l'altezza delle piante da file ITDM si utilizzano relazioni allometriche opportunamente tarate per le specie in esame per ricercare le grandezze di interesse quale il diametro caratteristico. Tale equazione mette in relazione il diametro caratteristico con l'altezza dell'arbusto e si manifesta nella forma:

$$H = a \cdot D^b, \quad (8.2)$$

dove a e b sono due costanti caratteristiche: a è un parametro dipendente dalla tipologia di organismo considerato mentre b è l'esponente che modifica le dimensioni delle grandezze coinvolte (West et al., 1997). Il diametro è di facile determinazione invertendo l'equazione sopra descritta.

Si tratta però di una relazione sito - specifica dunque i parametri a e b sono stati opportunamente calibrati attraverso dati reperiti con misure dirette in campo necessari per la determinazione delle grandezze fisiche. Questi misure risalgono al Febbraio 2020, condotte dal Politecnico di Torino in diverse aree lungo l'asta del torrente Orco compresa tra Courgnè e la confluenza con il Po (Piemonte, Italia) (Latella et al., 2021). Sia la distribuzione casuale delle specie nelle zone di interesse (castagneti, pioppeti, salici, querce e robinie), sia la presenza di latifoglie appartenenti a categorie diverse in base alla permanenza o meno del manto fogliare, hanno reso necessaria l'unione di specie simili utilizzando così un' unica coppia di parametri (a, b) per l'utilizzo dell'equazione allometrica sopra descritta.

Di particolare rilievo per il calcolo della biomassa è la densità del legno fresco (*green wood density*, *gwd*) reperibile in letteratura per le specie di interesse (Miles, 2009).

Con l'ausilio dell'*Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio* è stato possibile ricavare la carta forestale (Figura 8.5) per il segmento di corso in esame, già redatto nei lavoro di Latella et al. (2021) attraverso il quale il codice censisce gli alberi estrapolati e associa ad essi gli opportuni parametri allometrici e la densità di legno verde corrispondente. Di seguito si riportano i dati adottati nel presente caso studio.

Tabella 8.2: Tabella riassuntiva dei parametri utilizzati per la relazione allometrica e la densità del legno fresco (*gwd*) per ciascuna specie presente.

Specie	a	b	gwd [Mg/m ³]
Populus spp.	1.2560	0.7211	0.78
Quercus spp.	4.8273	0.3772	1.05
Robinia Pseudoacacia	3.6539	0.4496	1.01

La biomassa del singolo esemplare viene calcolata come volume dell'analogo cilindro per la densità, come definita dall'equazione a seguire:

$$treeBiomass = 0.25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot H \cdot gwd, \quad (8.3)$$

Nota la biomassa del singolo individuo, questa viene divisa per l'area occupata dall'individuo intesa come la superficie proiettata al suolo ottenuta a partire dal diametro della chioma valutato secondo Hasenauer (1997). Il valore di biomassa areale viene adesso sovrascritto ai punti della mesh in input definita dal *RasterFile* importato.

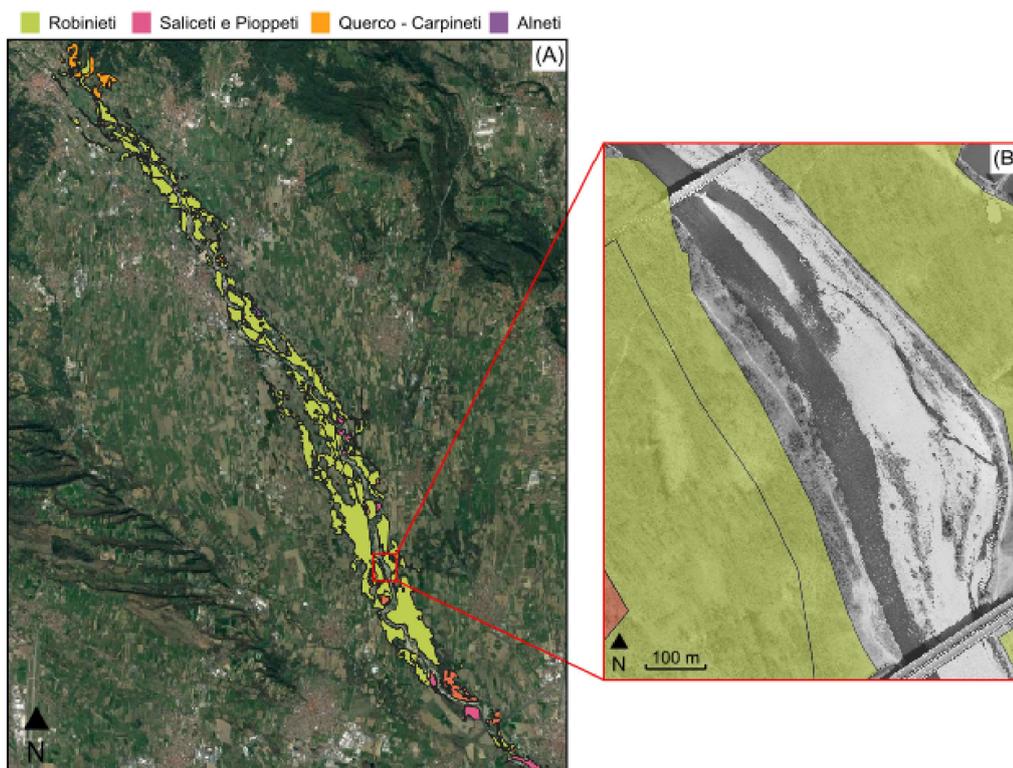


Figura 8.5: In (A) si mostra la carta Forestale estratta per il segmento del torrente Orco in esame oggetto di telerilevamento. Nella sotto area studio (B) si osserva la presenza abbondante di boschi di robinie miste a pioppi e una piccola area di querce miste a carpini relativamente lontane dall'alveo.

Calcolo della biomassa delle specie arboree fuori dall'alveo

Gli individui maturi presenti al di fuori dell'alveo occupato prevalentemente da specie arbustive (*Shrub area*) sono stati analizzati con l'ausilio della metodologia "*Extract Forest Metrics and Individual Tree Attributes from Aerial Lidar Data*" contenuta in *LiDAR Toolbox* presente in ambiente *Matlab2021b*.

A partire dal rilievo LiDAR costituito propriamente dalla nuvola di punti post-processata a seguito delle acquisizioni, l'algoritmo è capace di elaborare il modello in elevazione della sola vegetazione (*Canopy Height Models - CHMs*) rispetto al quale attraverso i valori di input del file ITDM, contenenti le coordinate geografiche e l'elevazione degli apici delle specie mature (Figura 8.6B), segmenta la nuvola di punti. Attraverso la funzione denominata *helperSegmentTrees* viene assegnato a ciascun individuo la porzione di nuvola di sua competenza definita sulla base della geometria del *Canopy Height Model* (Chen et al., 2006).

La segmentazione della nuvola rispetto ai diversi individui permette quindi di analizzare e valutare le aree di competenza delle chiome, con l'obiettivo di calcolare in modo più accurato la biomassa areale sviluppata da ciascuno di questi. Il calcolo della biomassa poi viene condotto nel medesimo modo adottato per le specie arboree interne all'alveo dunque facendo riferimento all'equazione 8.2 per la valutazione del diametro, nota l'altezza dell'individuo, e all'equazione 8.3 per il calcolo effettivo della biomassa coinvolta.

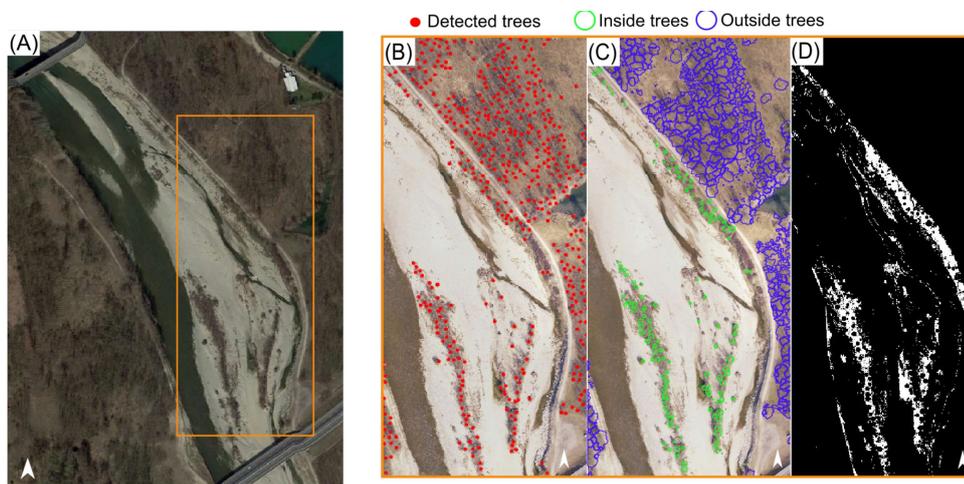


Figura 8.6: In (A) si mostra una area ristretta esemplificativa della barra scelta come caso studio; (B) mostra l'output del file ITDM per l'individuazione degli alberi maturi esclusi dalla matrice logica; in (C) si osserva l'output delle due procedure adottate per l'individuazione degli alberi maturi all'interno ed all'esterno dell'alveo; infine in (D) si mostra la matrice logica ottenuta in EBE al netto delle superfici occupate dagli individui maturi.

8.2 Output di EBE

Il codice presentato in questa sezione permette, quindi, con opportuni dati di input, di ricercare automaticamente le aree vegetate e di applicare l'algoritmo *ConcaveHull Slicing* permettendo di ridurre al minimo il tempo e lo sforzo che sarebbero stati altrimenti

necessari in caso il medesimo procedimento fosse stato eseguito manualmente e tramite ispezione visiva diretta in campo. Nonostante la sua semplicità, il codice qui esposto necessita di un'accurata scelta dei parametri di input, ovvero i valori di soglia RGB (RGB ranges), la minima area sotto cui eliminare i poligoni (*size cells thresholds*) e il raggio della funzione *polybuffer* (*shrub buffer*) oltre che una corretta stima del valore di densità da adottare per il calcolo della biomassa (*shrub bulk density*).

Il *processing* dell'ortofoto in input attraverso la dovuta normalizzazione delle bande di RGB permette di omogenizzare qualsiasi tipo di fotogramma anche se scattato in condizioni atmosferiche e di luminosità diverse. Infatti tale procedura va ad enfatizzare il contrasto tra le aree scure, definite da cluster di vegetazione, e le aree chiare corrispondenti ad superfici non vegetate.

L'output prodotto consiste in un file .txt per ciascuna area vegetata individuata, contenente informazioni riguardo il volume e la biomassa, oltre alle coordinate areali del centroide georiferite su Datum ETRF2000 con proiezione UTM32N. Per ottenere una la distribuzione della biomassa sulla reale superficie occupata dal singolo individuo, si è provveduto a elaborare le mappe di biomassa con l'ausilio di *Google Earth Engine*. Questa innovativa applicazione di Google permette di lavorare con dati informativi facendo riferimento al catalogo digitale proposto da Google Earth. La possibilità di creare strumenti vettoriali o raster associati alle caratteristiche del territorio e la grande velocità computazionale fa sì che Google Earth Engine sia di grande supporto per studi in ambito territoriale.

Per la creazione di tali mappe è stato necessario esportare i poligoni associati a ciascun individuo localizzato, arbusto ed albero maturo, in un file opportunamente georiferito con caratteristiche vettoriali. EBE provvede a scrivere ogni geometria con associato valore di biomassa in un file in formato *.geojson*. Questo è un formato nato dall'estensione del tradizionale file *.json* (JavaScript Object Notation) capace di georiferire le informazioni contenute. Il file contenente le geometrie individuate sull'intera area studio viene quindi convertito in uno ShapeFile in ambiente GIS e poi importato su Google Earth Engine. Qui è stato possibile generare un raster di maglia 1x1m sul quale il software ha provveduto a trasferire le informazioni provenienti dal file vettoriale contenente le geometrie e le informazioni di biomassa della vegetazione sull'intera area. Si è ottenuto così una mappa dettagliata della distribuzione di biomassa areale. Tale mappa può essere visualizzata in ambiente GIS.

La mappa della biomassa areale dell'area in esame è accompagnata da un'ulteriore mappa georiferita sulla quale viene mostrato l'errore stimato su ciascun pattern di vegetazione individuato. La valutazione dell'errore risulta importante in quanto i valori di biomassa areale ottenuti sono strettamente correlati a grandezze stimate con misure dirette in campo, come la densità vegetale per le specie arbustive e i parametri allometrici per le piante mature, dati affetti da un margine di incertezza.

Una mappa degli errori viene redatta dal codice in formato vettoriale ed esportabile in formato .txt sulla quale si può osservare la propagazione della deviazione standard locale per ogni arbusto o albero maturo identificato dal codice.

8.2.1 Stima dell'incertezza della biomassa areale

La valutazione dell'incertezza sui valori di biomassa valutati da EBE viene analizzata dal codice in modo distinto se si tratti di un arbusto o di un albero maturo. In entrambi i casi EBE valuta il valore della deviazione standard associata a tale grandezza per ciascun individuo o pattern di vegetazione individuati, per poi valutare l'errore distribuito sulla superficie occupata dalla vegetazione stessa.

Stima dell'errore sulle specie arbustive

La biomassa arbustiva $B_{s,i}$ viene valutata come:

$$B_{s,i} = \rho V_i \quad (8.4)$$

dove ρ è la densità media considerata costante in quanto ottenuta attraverso misurazioni dirette in campo mentre V_i è il volume elaborato dal codice di calcolo di ogni singolo individuo. Di fatto si tratta di due variabili indipendenti in quanto valutate separatamente e non direttamente correlate per la metodologia adottata.

Come afferma Goodman (1960), la varianza $\sigma^2(y)$ del prodotto tra due variabili indipendenti $y = x_1 \cdot x_2$ è dato da:

$$\sigma^2(y) = \sigma^2(x_1)E[x_2]^2 + \sigma^2(x_2)E[x_1]^2 + \sigma^2(x_1)\sigma^2(x_2), \quad (8.5)$$

dove $E[x_i]$ è il valore medio dei campioni della variabile x_i . Dunque, la varianza $\sigma^2(B_{s,i})$ associata alla biomassa di un individuo arbustivo è data da:

$$\sigma^2(B_{s,i}) = \sigma^2(V)E[\rho_i]^2 + \sigma^2(\rho_i)E[V_i]^2 + \sigma^2(V_i)\sigma^2(\rho_i). \quad (8.6)$$

Lo scarto quadratico $\sigma(B_{s,i})$ è di immediata valutazione a partire dal valore di varianza, rappresentativo dell'errore in termini di Kg/m² della biomassa areale.

Stima dell'errore sulle specie arboree mature

La biomassa degli alberi $B_{t,i}$ invece viene valutata come:

$$B_{t,i} = \rho V_i = \frac{\rho H_i \pi D^2}{4}, \quad (8.7)$$

dove ρ è la densità del legno fresco (gwd), mentre H e D sono l'altezza e il diametro dell'individuo in esame.. Introducendo l'equazione 8.2 ed esplicitandola per il diametro D , (8.7) può essere riscritta come:

$$B_{t,i} = \frac{\pi \rho h_i}{4} \left(\frac{h_i}{a} \right)^{2/b} \quad (8.8)$$

Assumendo le variabili indipendenti e considerando la relazione generale per la propagazione dell'errore, l'espressione per la definizione della varianza tra le variabili $x_i \dots x_N$ è definita come (Taylor, 1997):

$$\sigma^2(f) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma(x_i) \right]^2. \quad (8.9)$$

Considerando (8.8) and (8.9), la varianza $\sigma^2(B_{t,i})$ può essere calcolata come:

$$\begin{aligned} \sigma^2(B_{t,j}) &= \left[\frac{\pi E[h_j]}{4} \left(\frac{E[h_j]}{E[a]} \right)^{2/E[b]} \sigma(\rho) \right]^2 + \left[\frac{2\pi E[\rho]}{4E[b]} \left(\frac{E[h_j]}{E[a]} \right)^{1+2/E[b]} \sigma(a) \right]^2 + \\ &\left[\frac{\pi E[\rho] E[h_j] 2 \log(E[h_j]/E[a])}{4E[b]^2} \left(\frac{E[h_j]}{E[a]} \right)^{2/E[b]} \sigma(E[b]) \right]^2 + \left[\left(\frac{\pi E[\rho](E[b]+2)}{4E[b]} \right) \left(\frac{E[h_j]}{E[a]} \right)^{2/E[b]} \sigma(h) \right]^2 = \\ &\left[\frac{\pi E[\rho] E[h_j]}{4} \left(\frac{E[h_j]}{E[a]} \right)^{2/E[b]} \right]^2 \left[\left(\frac{\sigma(\rho)}{E[\rho]} \right)^2 + \left(-\frac{2\sigma(a)}{E[a]E[b]} \right)^2 + \left(\frac{2 \log(E[h_j]/E[a]) \sigma(b)}{E[b]^2} \right)^2 + \left(\frac{(E[b]+2)\sigma(h)}{E[b]E[h_j]} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (8.10)$$

Capitolo 9

Stima della biomassa sulla barra

Il codice *Extensive Biomass Estimation* (EBE) illustrato nei capitoli precedenti è stato applicato all'intera barra fluviale mostrata in Figura 3.2B con l'obiettivo di stimare la biomassa vegetale presente in alveo e nelle aree immediatamente limitrofe. L'analisi è stata condotta su due differenti scenari relativi rispettivamente all'anno 2019 e all'anno 2021. E' stato quindi utile e particolarmente interessante elaborare un confronto tra le due condizioni presenti nei due anni e porre attenzione su ciò che è accaduto alla vegetazione nelle diverse parti dell'alveo.

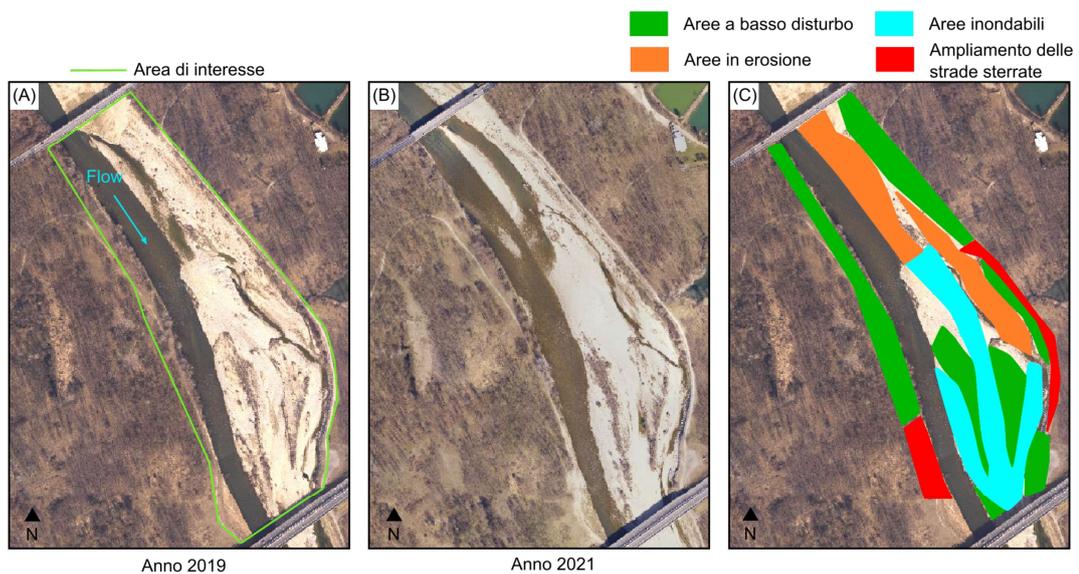


Figura 9.1: In (A) si mostra la configurazione della barra stabile nell'anno 2019 e l'area di interesse (AOI) considerata per lo studio mentre in (B) lo scenario relativo all'anno 2021. In (C) si evidenziano i processi evolutivi in atto sulla barra, osservati anche durante le indagini in sito.

Come accennato nel Capitolo 3.1 l'area oggetto di studio, come l'intero segmento pedemontano del torrente Orco, è soggetta a forti variazioni idrologiche stagionali con picchi di piena più frequenti nei periodi primaverili e autunnali. Nel periodo di tempo intercorso tra le due acquisizioni LiDAR aerotrasportato, del 2019 e del 2021, la barra ha subito tre importanti picchi di piena riconducibili a eventi con tempo di ritorno tra i 2 e i 5 anni. In particolare, nell'autunno dell'anno 2020 si assiste a una portata con colmo pari a $515 \text{ m}^3/\text{s}$, evento formativo per le sezioni in esame. Fenomeni di questo calibro sono i principali responsabili della definizione dell'assetto morfologico dell'alveo definendone la geometria caratteristica e apportando importanti modifiche alle unità morfologiche che caratterizzano l'area. Anche la vegetazione riparia fa parte dell'insieme delle macro unità emerse presenti. Come si osserva dalla Figura 9.1 ed in particolare dal confronto delle due ortofoto corrispondenti ai due anni oggetto di telerilevamento, lo scenario ha subito visibili variazioni e la vegetazione in alveo ha cambiato il suo assetto.

Si osservano aree in erosione evidenziate da poligoni di colore arancione. Nella parte centrale dell'area e nei pressi della sponda in sinistra idraulica si è assistito a un probabile abbassamento del fondo alveo con ampliamento del canale attivo e la comparsa di un ancor più definito canale secondario con una propensione alla migrazione verso la sponda. Ci aspettiamo che qui la vegetazione abbia subito una riduzione del suo volume e quindi della sua biomassa, in quanto corsia preferenziale del deflusso soprattutto durante eventi più intensi dell'ordinario. Tra gli individui più esposti emergono i piccoli arbusti e le piante più giovani, le quali, a causa di un apparato radicale non particolarmente sviluppato che conferisce loro uno scarso ancoraggio, risultano facilmente rimovibili.

Le aree in celeste denotano invece le principali zone inondabili durante gli eventi di piena. Appaiono particolarmente stabili dal punto di vista morfologico ma è facile osservare come tali aree non siano l'habitat ideale per lo sviluppo di specie riparie in quanto fortemente suscettibili alle variazioni idrologiche. Tra queste si osserva una corsia preferenziale nel centro alveo oltre a due rami laterali che si congiungono a valle della barra.

Le aree caratterizzate da quote topografiche più elevate invece risultano più stabili. La vegetazione qui presente, si trova ad essere meno esposta alle fluttuazioni dei livelli idrometrici che intercorrono nel tempo e quindi capace di svilupparsi con continuità se non disturbata. I poligoni in verde denotano tali aree. Si osserva una distribuzione di zone relativamente stabili in alveo, nelle immediate vicinanze delle aree di deflusso. In queste zone le specie vegetali trovano le condizioni migliori per accrescersi in quanto alimentate dalle acque sotterranee delle falde adiacenti. Aree a basso disturbo sono presenti soprattutto nelle zone spondali sia in destra che in sinistra idraulica in quanto al di sopra dei terrazzi. Sono caratterizzate perlopiù da piante mature soggette a piccole variazioni di biomassa nell'arco degli anni in quanto già accresciute nel loro complesso.

L'ultimo fattore particolarmente influente sull'assetto della vegetazione, osservabile anche a seguito dei sopralluoghi in sito, è quello antropico. L'attenzione cade sulle strade sterrate perimetrali all'area studio in quanto, da un accurato confronto delle ortofoto del 2019 e del 2021 emerge l'ipotesi di un possibile intervento di ampliamento della carreggiata. Questo è visibile in destra idraulica immediatamente a monte dell'attraversamento e

in sinistra, in prossimità della strada sterrata che costeggia la sponda, con conseguente eliminazione della vegetazione limitrofa.

Da una prima analisi condotta sui due scenari, sull'intera area studio (Figura 9.1A) si quantificano circa 508.9 ton di materiale vegetale nell'anno 2019 per poi passare a un valore di 621.6 ton nell'anno 2021. Si osserva immediatamente come la biomassa vegetale sia nel complesso aumentata nonostante gli eventi di piena verificatisi e gli interventi antropici di sbancamento delle strade laterale ad alto impatto sulle specie limitrofe. Si tratta di una crescita di biomassa di circa il 22.1% tra i due anni. Infatti, la vegetazione ha trovato in questo periodo di tempo le condizioni favorevoli per lo sviluppo accrescendosi laddove il disturbo è minore. Come si osserva dal confronto delle mappe mostrate in Figura 9.4 e in Figura 9.5, il 2019 presenta una maggiore quantità di biomassa diffusa in alveo, soprattutto nelle aree definite inondabili nell'analisi preliminare mostrata in Figura 9.1C. Invece nell'anno 2021 la vegetazione si concentra in patterns collocati in aree particolarmente stabili dell'alveo. Questo significa che, gli eventi di piena intercorsi hanno eliminato parte della vegetazione presumibilmente giovane nelle zone riattivabili dal deflusso, ma non sono stati così gravosi da interessare tutta la vegetazione presente. Nonostante questo infatti, si è assistito a un accrescimento concentrato in limitate aree dell'alveo. Questo emerge anche dai valori di area occupata dalla vegetazione nei due anni. Nel 2019 la copertura vegetale interessa circa 3.1 ha per poi scendere a circa 2.7 ha nel 2021. Nonostante la copertura vegetale sia diminuita di circa il 12.8% la crescita della vegetazione in termini di biomassa è stata importante.

Analizzando separatamente la biomassa relativa agli alberi intesi come individui maturi, con altezza superiore a 2.5 m, si osserva un trend in aumento. Gli individui maturi occupano principalmente le aree spondali dell'alveo, ovvero le aree soggette nel tempo a un disturbo relativamente minimo ma se le condizioni sono ottime per lo sviluppo, si hanno accrescimenti importanti anche in alveo. Si osserva infatti dal confronto della distribuzione di biomassa per i due anni, come nel 2021 emerga una presenza maggiore di specie mature nelle aree a basso disturbo (marcate dai poligoni verdi in Figura 9.1C) evidenziate da geometrie circolari meglio definite. Questo conferma la crescita e lo sviluppo di specie presumibilmente allo stadio giovanile nell'anno 2019 e che, data la rapidità di accrescimento delle *Salicacee* nei primi anni di vita (Bowman et al., 2013; Caudullo and De Rigo, 2016), hanno raggiunto una maturità più definita, riscontrabile in un aumento delle geometrie e di conseguenza della biomassa.

Quantificando il valore di quest'ultima infatti, si osserva un aumento che va da 361.9 ton per l'anno 2019 a 464.6 ton nel 2021 descrivendo una crescita del 28.4%. Si osserva inoltre un aumento di superficie occupata del 19.8% passando da un area di circa 1.1 ha nel 2019 a un'area di 1.4 ha nel 2021.



Figura 9.2: In (A) si osserva la distribuzione delle specie mature sull'area studio in corrispondenza dello scenario presente nell'anno 2019 mentre in (B) in corrispondenza dello scenario presente nell'anno 2021.

Per quanto riguarda la vegetazione arbustiva, questa si manifesta prevalentemente in alveo e lungo le scarpate marginali. Anche in questo caso, dal 2019 al 2021 si assiste a una crescita evidente passando da 147 ton a 157 ton determinando uno sviluppo del 6.8% rispetto allo scenario presente nel 2019. L'accrescimento si osserva soprattutto nelle aree a basso disturbo sia antropico che naturale. Osservando le ortofoto dell'anno 2019 sembra essere già presente parte della vegetazione arbustiva in crescita, nelle aree al centro - sud della barra e nelle aree spondali in sinistra, che poi si mostrerà più importante nel 2021. Da un'analisi accurata delle nuvole di punti LiDAR per il 2019 infatti, nelle suddette aree si ha assenza di punti, o al più pochi e casualmente disposti. Questo dimostra come si tratti di vegetazione bassa, probabilmente giovane. Al contrario, i rilievi del 2021 mostrano più ritorni nelle medesime aree, a riprova del fatto che la vegetazione ha subito un'evoluzione in termini di crescita.

Analizzando anche in questo caso la copertura vegetale prodotta dalle specie arbustive per i due anni, si osserva come si assista ad una diminuzione, passando da circa 2.0 ha nel 2019 a circa 1.4 ha nel 2021. Nonostante si osservi una riduzione dell'area occupata di circa il 31.6%, la biomassa è cresciuta. Questa apparente discordanza tra i due risultati

è attribuibile ai processi naturali che sono occorsi tra i due anni. Gli eventi idrologici in particolare, hanno fatto sì che le piante di piccola taglia, che nel 2019 occupavano i canali soggetti a deflussi stagionali ed in erosione, siano state eliminate, in quanto non capaci di reggere gli stress idrodinamici. Le piante nei pattern già presenti nelle aree definite a basso disturbo si sono invece accresciute in un'area limitata.

Le piante di piccola taglia come le specie arbustive tendono a presentarsi a macchie (Figura 9.3). Questa disposizione dipende principalmente dal fatto che il loro sviluppo avviene in aree circoscritte, dove le condizioni sono più favorevoli, ma la loro aggregazione conferisce ai diversi individui una protezione e un sostegno reciproco ove soprattutto le specie più giovani ne traggono benefici. Meno frequenti sono gli individui isolati se non di maggiori dimensioni capaci di sopportare le condizioni estreme in cui talvolta possono ritrovarsi. Questa disposizione della vegetazione arbustiva ha influito sulla quantificazione della biomassa areale. Di fatto si è assistito a una leggera sovrastima di tale grandezza rispetto alle misure svolte sugli arbusti selezionati in campo in quanto *EBE* ha fornito valori nel range di 7-11 kg/m² mentre le misure dirette valori dell'ordine di 2-13 kg/m². La segmentazione dei diversi individui, come implementata per le specie arboree fuori alveo, è difficile da attuare per le specie di piccole dimensioni. Le loro geometrie limitate non conferiscono una nuvola di punti consistente alla definizione di un *Canopy Height Model* (CHM) delle aree da essi occupate e quindi, considerare l'intero pattern spesso è una soluzione inevitabile. Oltre a ciò, le specie arbustive nascono anche al di sotto di specie più mature determinando una configurazione geometrica particolarmente complessa e difficile da separare.

9.1 Propagazione degli errori sui valori di biomassa areale

La valutazione dell'errore calcolato sui singoli individui ricercati con il codice *EBE* è utile per comprendere la sensibilità del metodo nei confronti della grandezza ricercata quale la biomassa areale di vegetazione. La procedura per il calcolo della varianza associata a questa grandezza segue quanto proposto da Goodman (1960) per gli arbusti mentre la propagazione dell'errore sugli alberi maturi segue la metodologia proposta da Taylor (1997) (Capitolo 8.2.1).

La correttezza dei risultati ottenuti è fortemente influenzata dalle incertezze di cui le misure di campo e le stime dei coefficienti allometrici per gli alberi sono affetti. È necessario tenere in considerazione che ulteriori misure dirette a supporto dei dati già esistenti reperiti per il presente lavoro possono migliorare la calibrazione del codice, soprattutto se esteso su più ampia scala dove il livello di conoscenza reale delle specie esistenti e la loro distribuzione non è accuratamente noto. Per gli individui ubicati in alveo infatti non è presente un vero e proprio censimento di specie come si può osservare dalla Figura 8.5. Gli arbusti presi di riferimento per la calibrazione del metodo hanno portato a pensare a una dominanza di specie Salicacee come *Salix Alba* L. e *Populus Tremula* L.. Si tratta però di un censimento sito-specifico e su un limitato numero di elementi, dunque non è da escludere che specie come *Quercus* o *Robinia* possano essere



Figura 9.3: In (A) si osserva la distribuzione delle specie arbustive sull'area studio, in corrispondenza dello scenario presente nell'anno 2019 e in corrispondenza dello scenario presente nell'anno 2021 (B).

altrettanto presenti vista la loro marcata diffusione nelle aree perifluviali: un censimento accurato potrebbe portare a un miglioramento del risultato ottenuto.

Le mappe di errore fornite da EBE mostrano sommariamente uno scarto di ± 29.8 ton (circa 5.8%), per il 2019 e ± 44.3 ton (circa 7.1%) per il 2021 sull'intera biomassa areale presente sulla barra presa in considerazione. Con la crescita della vegetazione nei due anni segue l'aumento dell'incertezza. Prendendo in considerazione separatamente la biomassa coinvolta nelle specie mature l'errore calcolato ammonta a ± 22.5 (circa 6.2%) ton per l'anno 2019 ed a ± 28.2 (circa 6%) per l'anno 2021.

Per le specie arbustive invece questo valore è lievemente più elevato in termini percentuali mostrando un'incertezza di ± 19.6 ton (circa 13.3%) per l'anno 2019 e ± 34.1 ton (circa 21.7%) per l'anno 2021.

Considerando il bilancio di biomassa areale sull'intera area studio si osserva un errore di circa 0.96 kg/m^2 per l'anno 2019 e di circa 1.64 kg/m^2 per l'anno 2021. E' possibile affermare che nonostante l'errore sul singolo individuo, arbusto o albero maturo, sia presente anche se contenuto, sull'intero bilancio areale l'influenza è minima.

Per una più immediata visualizzazione della distribuzione dell'errore, le mappe riportate in Figura 9.7 e in Figura 9.8 esprimono il coefficiente di variazione areale valutato come rapporto tra la deviazione standard areale dell'*i*-esimo pattern e la corrispettiva biomassa areale valutata dal codice ($\sigma(B)/E[B]$).

9.2 Potenzialità e limitazioni dell'approccio esteso ad ampia scala

Il codice di calcolo *Extensive Biomass Estimation* (EBE) proposto e descritto nei paragrafi precedenti gode di tutti i vantaggi e svantaggi illustrati nel Paragrafo 7.7. La tecnica *Concavehull Slicing* è una componente importante dell'elaborato in quanto caratterizzante dal punto di vista metodologico nonché rilevante per quanto riguarda l'onere computazione del codice.

Tra i vantaggi della metodologia EBE si evidenzia:

- la capacità di localizzare le aree vegetate sulla base della scala R-G-B con un discreto livello di dettaglio eliminando la tradizionale procedura manuale condotta dall'utente attraverso analisi e post - processing delle ortofoto associate alla nuvola di punti;
- connesso al punto precedente, EBE è capace autonomamente di tagliare le nuvole di punti sulla base delle geometrie delle specie individuate senza alcun intervento dell'utente, fornendo informazioni sulla posizione di ciascun punto costituente la nuvola e del centroide rappresentativo della localizzazione dell'intero poligono;
- la presenza dei poligoni in input relativi alle aree di interesse e associati alle aree bagnate definite dalle geometrie dei canali principali e secondari presenti al momento del rilievo, fanno sì che il codice possa eliminare autonomamente dalla nuvola del rilievo, tutte quelle zone non necessarie al corretto funzionamento del metodo e che inducono a oneri computazionali elevati o a fonti di errore non desiderate; questo conferisce una grande versatilità all'algoritmo;
- l'ampia versatilità è data anche dall'operazione di *image processing* condotta sulle ortofoto; la possibilità di modificare gli indici R-G-B, così da aumentare il contrasto tra le aree a basso grado di copertura e quelle ad alto grado di copertura vegetale, è una procedura universale che non necessita di parametri ben definiti delle bande di R,G e B, ma può essere applicato a qualsiasi immagine anche caratterizzata da un grado di esposizione diversa;
- il codice EBE permette di studiare in un'unica applicazione separatamente individui catalogati come specie mature e individui arbustivi, senza la necessità di condurre due analisi distinte; le tecniche adottate per la stima della biomassa delle specie mature sono universali e dipendono dalla sola equazione allometrica associata alla specie in esame. Nel caso in cui si necessiti di applicare il metodo a

aree caratterizzate da specie diverse è necessario inserire l'equazione allometrica che meglio descrive l'individuo, tarando opportunamente i rispettivi parametri.

L'applicazione di EBE sulla barra oggetto di studio ha portato ad osservare e comprendere alcuni limiti del codice. Tra questi si evidenzia:

- la possibilità di commettere inesattezze nell'individuazione dei patterns di vegetazione; la soglia di R-G-B definita per rintracciare le aree vegetate può coincidere con aree di altra entità, come conformazioni del territorio nudo bagnato o di litologia diversa oppure aree a bassa esposizione luminosa o completamente in ombra, caratterizzate da un tono scuro. Se non opportunamente trattate possono portare a errori significativi nel calcolo della biomassa totale quindi a tal proposito è utile, se necessario, definire dei limiti riguardo il suolo ed escluderlo dal calcolo. Nel presente lavoro è stata definita una soglia di 0.1 m corrispondente al piano topografico (valutato a seguito di osservazioni in sito) e se la nuvola corrispondente all'i-esimo arbusto è caratterizzata da un numero di punti maggiore di 5 con quota maggiore di tale soglia, allora questo è classificabile come elemento in elevazione rispetto al terreno e considerato vegetazione;
- l'incapacità del codice di elaborare la biomassa corrispondente a specie erbacee in alveo o arbusti molto piccoli circa con altezza inferiore a 1 m. Questo dipende in particolar modo dalla risoluzione della nuvola LiDAR ottenuta da telerilevamento. La geometria ridotta di questi individui non permette un corretto rilevamento da parte della strumentazione LiDAR utilizzata (9 punti/m²) rilevando solo pochi punti al metro quadro, spesso non sufficienti per calcolare il volume coinvolto. Così anche i pattern di vegetazione erbacea, meno influente nella stima della biomassa a scopo forestale ma particolarmente influente nell'ambito della ecomorfodinamica;
- il codice necessita di una preliminare analisi delle aree bagnate corrispondenti al canale principale e ad eventuali canali secondari: questo deve essere svolto con l'ausilio di strumenti GIS su cui poter elaborare i poligoni di interesse ed è interamente compito dell'utente produrli. Un upgrade del codice EBE proposto potrebbe essere proprio quello di implementare una procedura di riconoscimento delle aree bagnate così che il codice stesso possa escluderle dal computo;
- un non trascurabile onere computazionale della procedura nel suo complesso, riportando un "collo di bottiglia" nella sezione di taglio delle nuvole; lo strumento "*Parallel ToolBox*" in ambiente Matlab può essere di aiuto, ma non elimina completamente il problema.

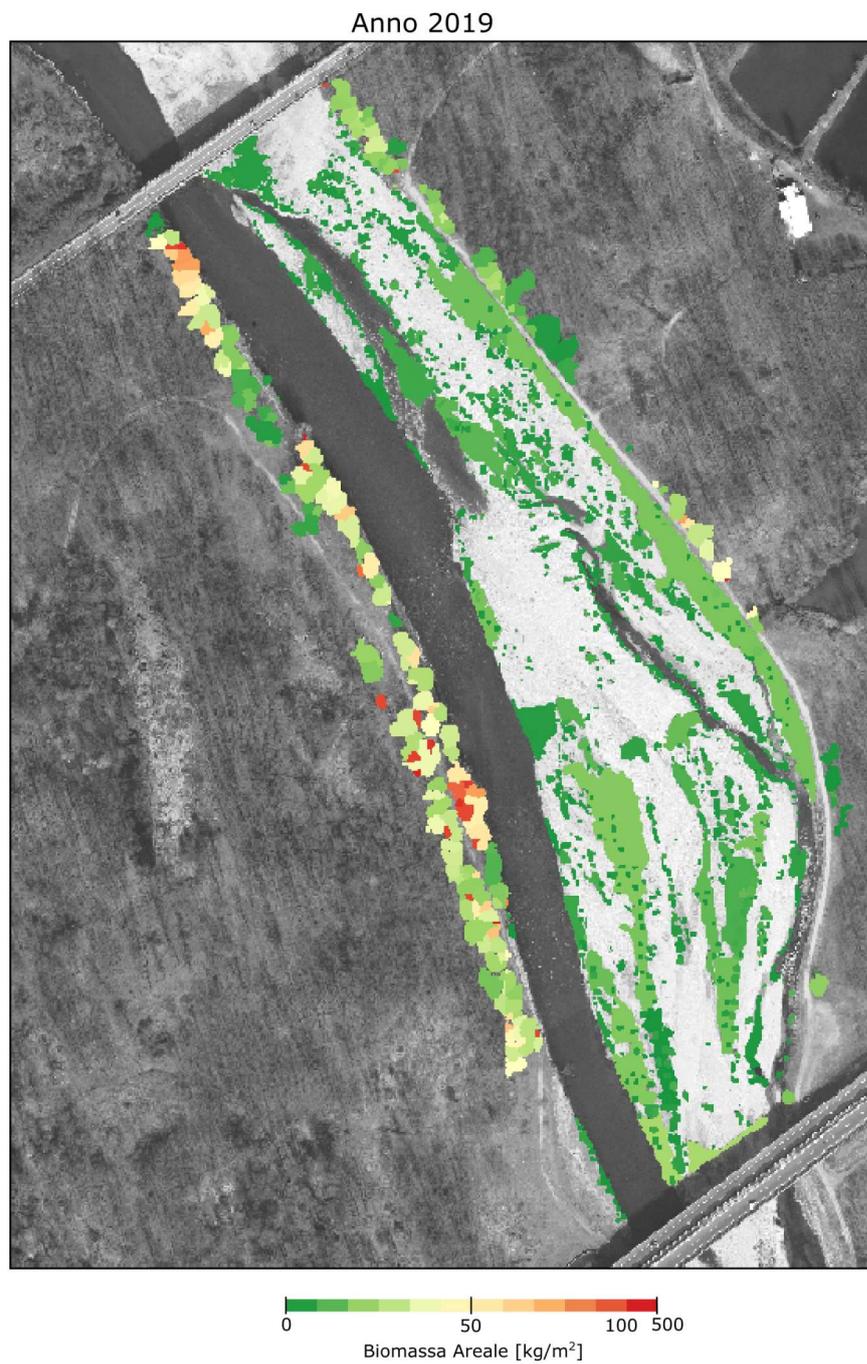


Figura 9.4: Mappa della distribuzione della biomassa areale [kg/m²] corrispondente all'anno 2019.

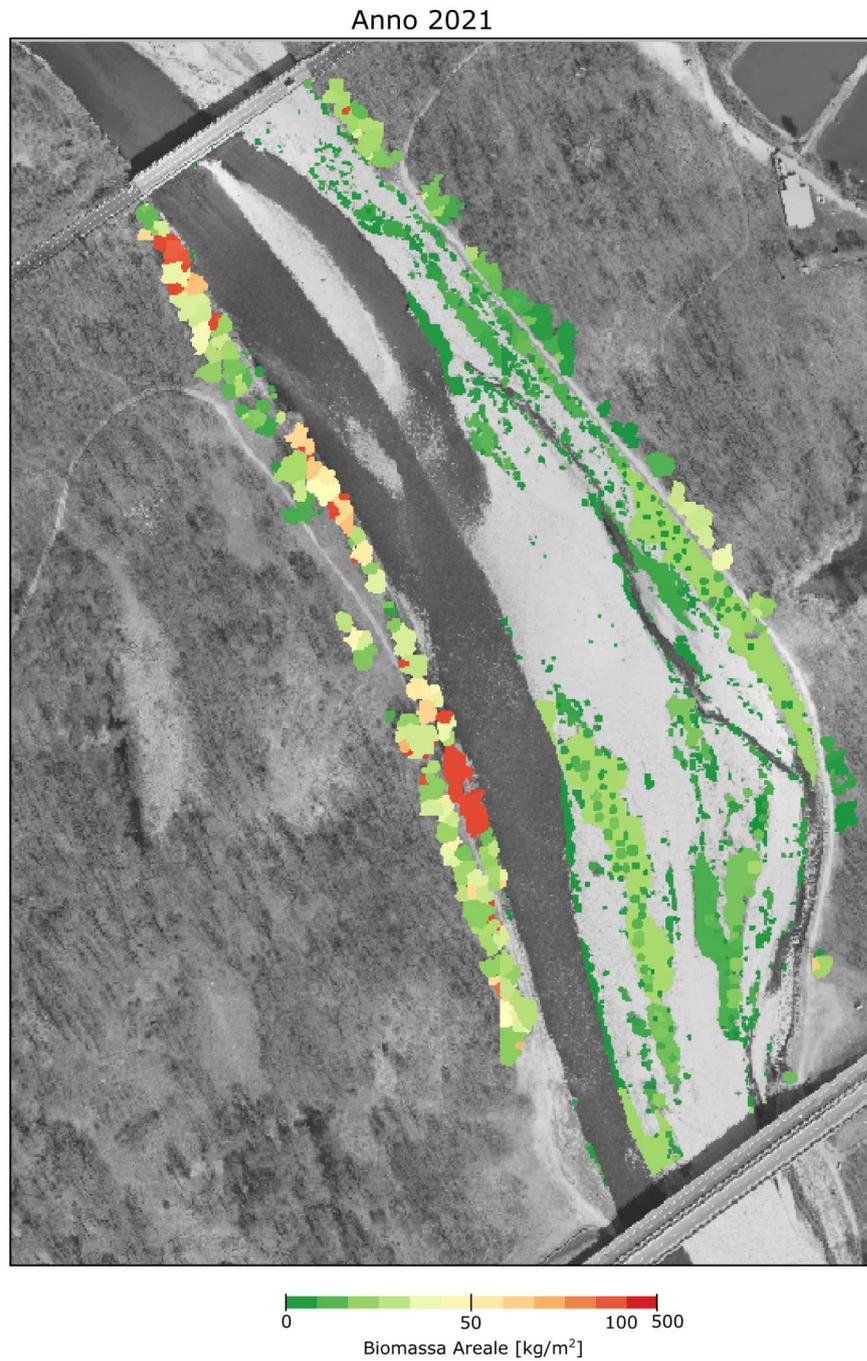


Figura 9.5: Mappa della distribuzione della biomassa areale [kg/m²] corrispondente all'anno 2021.

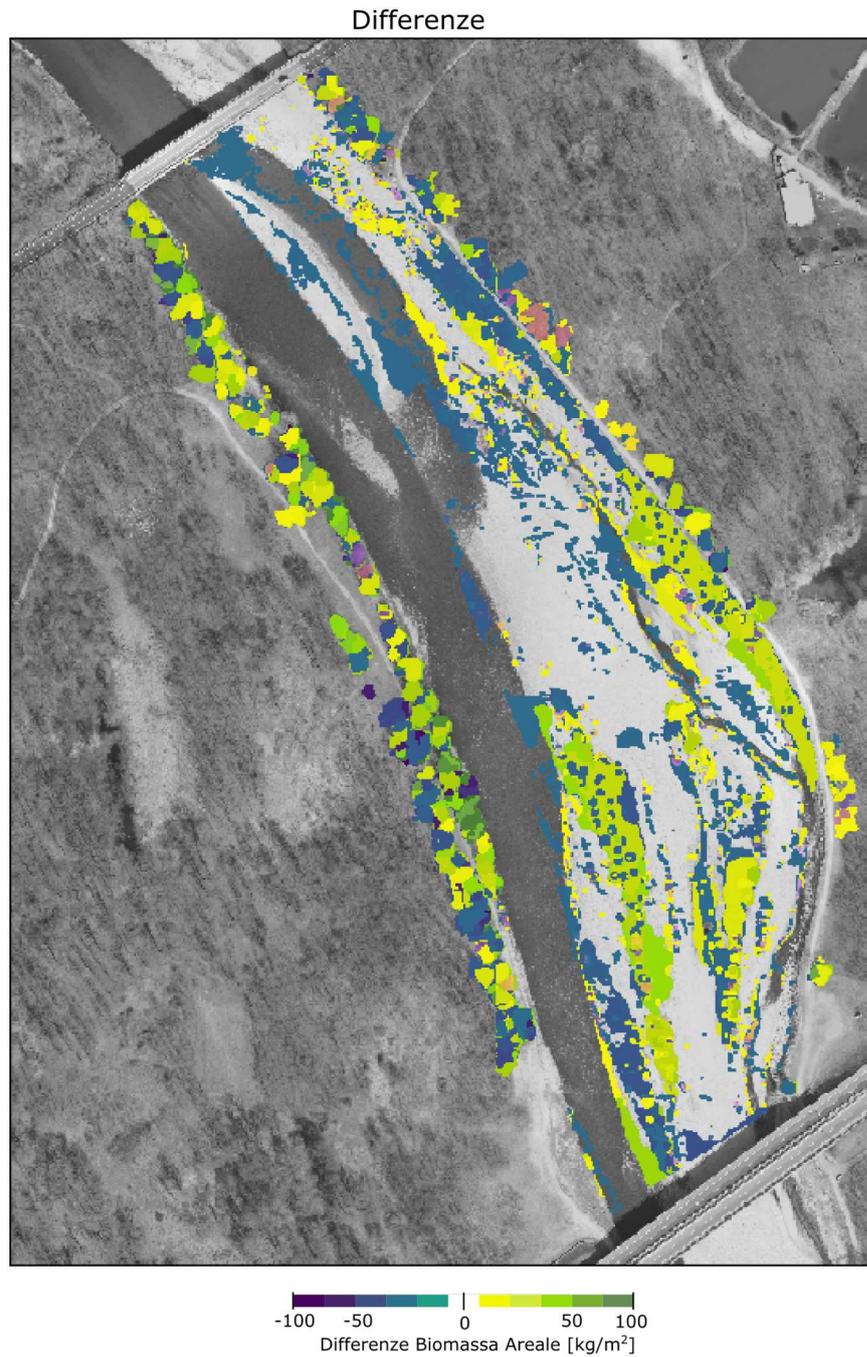


Figura 9.6: Mappa della distribuzione della biomassa areale [kg/m²] corrispondente alle differenze intercorse tra i due anni oggetto di rilievo.

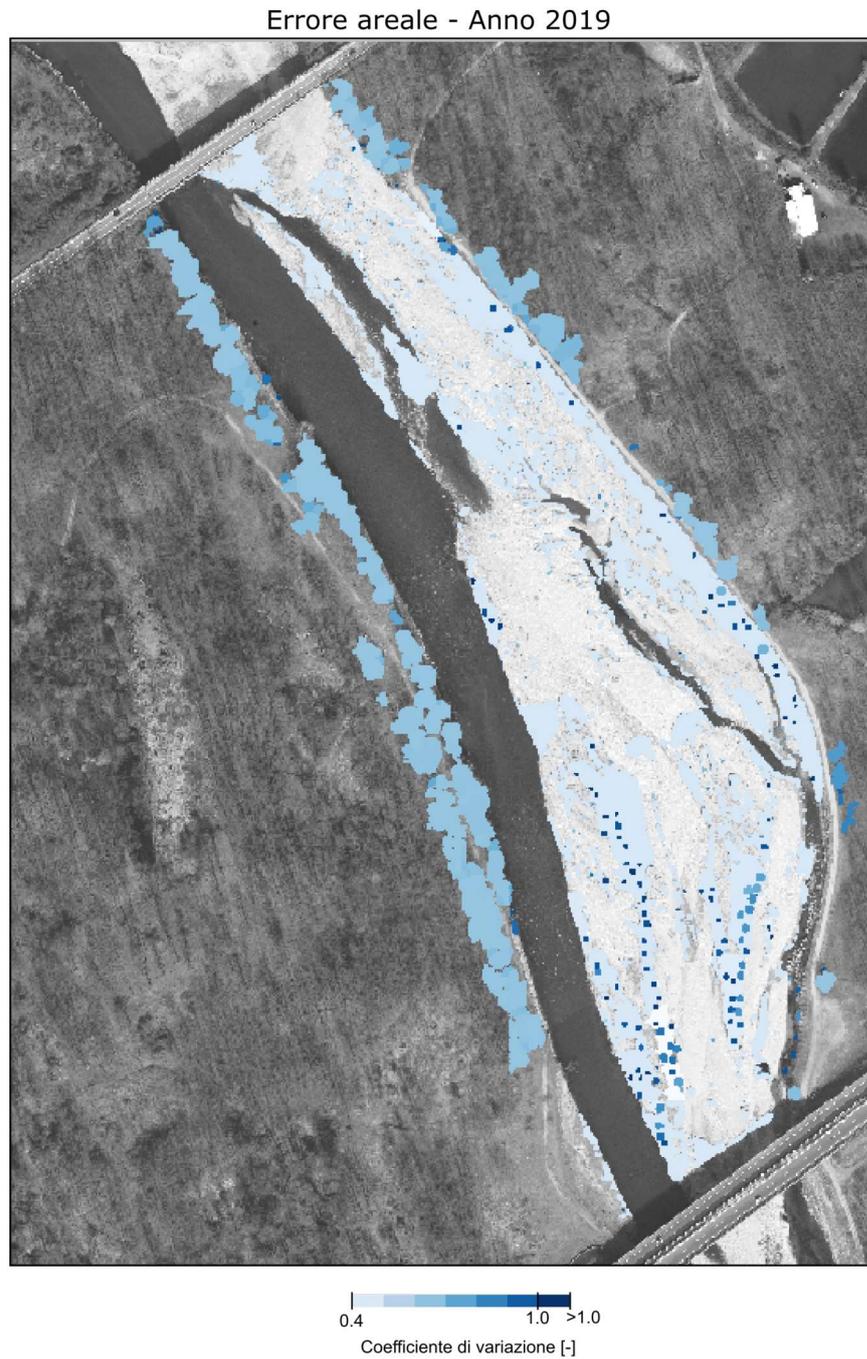


Figura 9.7: Mappa della distribuzione del coefficiente di variazione ($\sigma(B)/E[B]$) associato alla biomassa areale corrispondente all'anno 2019.

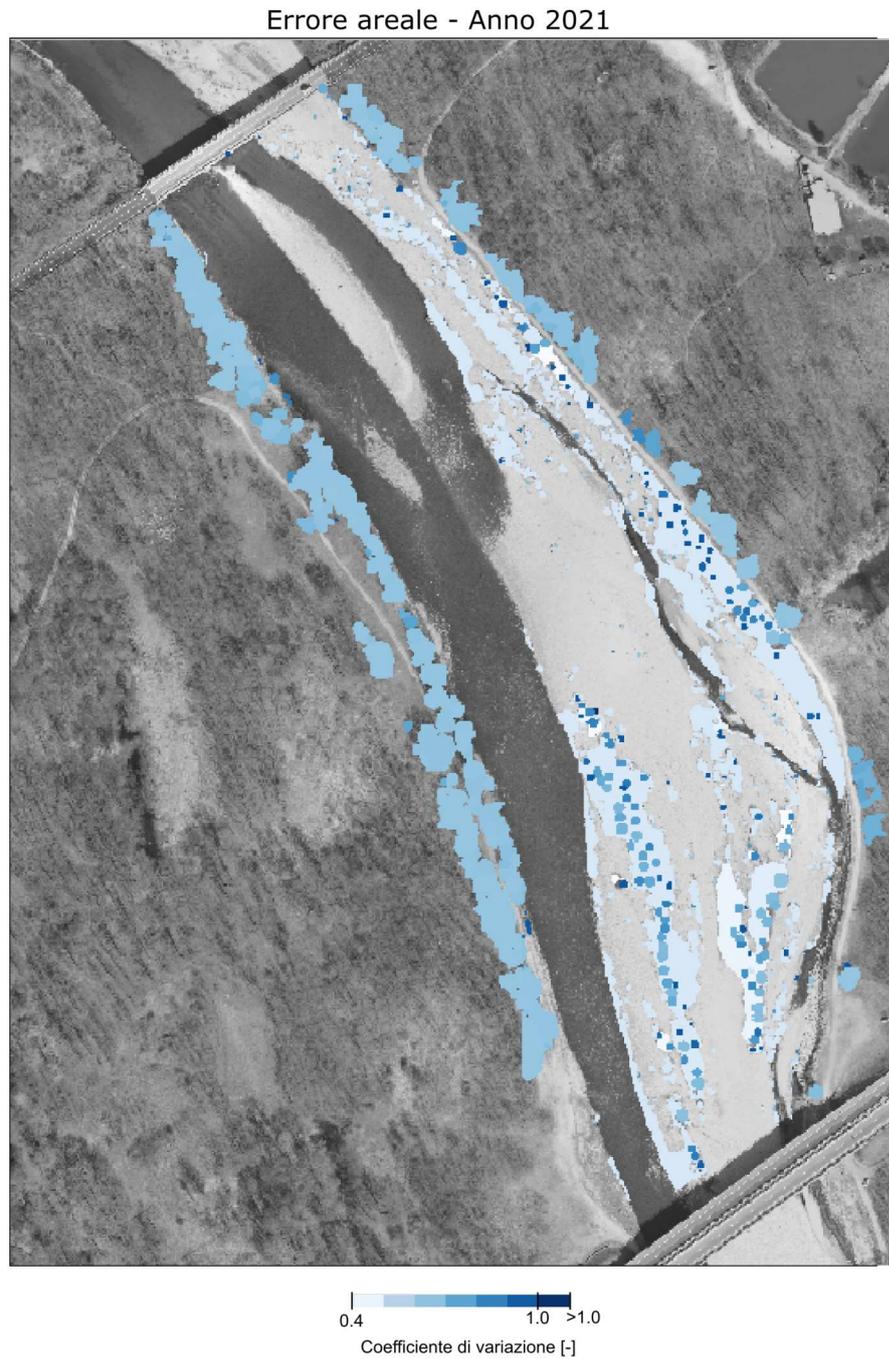


Figura 9.8: Mappa della distribuzione del coefficiente di variazione ($\sigma(B)/E[B]$) associato alla biomassa areale corrispondente all'anno 2021.

Capitolo 10

Conclusioni

Lo studio dei complessi fenomeni ecomorfodinamici che caratterizzano i corsi d'acqua pedemontani e vallivi, indipendentemente dal loro regime idrologico (torrentizio o fluviale che sia), richiedono una conoscenza dettagliata dei corridoi ripariali. Ad esempio, la rugosità è una caratteristica idraulica indispensabile per studiare le interazioni del flusso con le macro-unità presenti e comprendere i processi morfologici in atto. Per stabilire un suo valore corretto, nelle aree direttamente interessate dal deflusso o potenzialmente allagabili, è necessario avere informazioni sulla geometria delle piante, la loro distribuzione spaziale e la biomassa coinvolta.

Per comprendere il cambiamento della vegetazione e per caratterizzarla dal punto di vista fisico è essenziale condurre del monitoraggio e, quindi, risulta utile l'impiego del Light Detection and Ranging (LiDAR), come il presente lavoro dimostra. Lo strumento Airborne Laser Scanner (ALS) ha fornito e fornisce tutt'oggi un grande compromesso tra qualità di acquisizione, costo, superficie rilevata e tempo necessario divenendo uno strumento indispensabile per rilievi su ampia scala.

I rilievi condotti dal Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (CNR - IRPI) con Airborne Laser Scanner (ALS) nell'anno 2019 e 2021 sul segmento del torrente Orco, compreso tra Courgnè e Chivasso, hanno permesso di elaborare una metodologia interamente automatica per individuare le specie arboree ed arbustive presenti in una determinata area di interesse e caratterizzarle geometricamente. Con questi scopi è stata validata la tecnica *ConcaveHull Slicing Method* proposta da Yan et al. (2019) per il calcolo del volume coinvolto da una nuvola di punti anche attraverso l'ausilio di misurazioni con Laser Scanner terrestre (TLS) e rilievi di campo. Il confronto tra i volumi valutati con ALS e quelli valutati con TLS ha permesso di comprendere l'accuratezza della metodologia in relazione alla tecnica utilizzata. Il TLS fornisce valori di volume più conformi a quanto ottenuto dalle misurazioni dirette in campo, grazie alla maggiore risoluzione dello strumento, mentre l'ALS provoca una ben nota sottostima delle altezze rilevate determinando anche una sottostima nella valutazione del volume. Tuttavia, la correlazione tra i valori di volume ottenuti per i 18 arbusti oggetto di studio è risultata particolarmente robusta ed ha permesso di elaborare un metodo di correzione sulla base delle reali misure di campo. La tecnica implementata è stata propedeutica

per il calcolo e la mappatura della biomassa areale su ampia scala. A tal fine vi è stata anche la necessità di ricercare e definire un'opportuna densità vegetale. Questo valore infatti può portare a una grande incertezza nei risultati elaborati se non opportunamente identificato e vari autori, come Brown (1981) e Pereira et al. (1995), hanno adottato criteri diversi per la sua valutazione in particolare per le specie arboree. Nel presente caso studio, se ne è ricercato uno consistente con la metodologia adottata per il calcolo del volume, valutandolo sperimentalmente in sito.

Successivamente il *ConcaveHull Slicing Method* è stato inserito in una metodologia più ampia, denominata *Extensive Biomass Estimation (EBE)*, capace di identificare le aree vegetate, attraverso un attento processing delle ortofoto reperite durante i voli LiDAR e di isolare i singoli pattern di vegetazione con l'obiettivo di caratterizzarne la biomassa e creare una mappa di biomassa areale. La disponibilità di dati presenti per l'anno 2019 e 2021 ha permesso di applicare tale procedura e comprendere i processi morfologici in atto nell'area di studio.

Il presente lavoro si inserisce nell'ampio tema riguardante lo studio dei processi eco-morfodinamici caratteristici dei corsi d'acqua, ma lo sguardo va anche alle sfide del futuro, con l'obiettivo di fornire uno strumento utile per lo studio degli ecosistemi forestali, della tutela del territorio e all'importante ruolo che la vegetazione svolge nella lotta ai cambiamenti climatici.

Bibliografia

- AIPO. Programma di gestione dei sedimenti per il torrente orco. *PROGRAMMA GENERALE DI GESTIONE DEI SEDIMENTI (PGS) PER I CORSI D'ACQUA PIEMONTESI*, 2008.
- H.-E. Andersen, R. J. Mcgaughey, and S. E. Reutebuch. Assessing the influence of flight parameters, interferometric processing, slope and canopy density on the accuracy of x-band ifsar-derived forest canopy height models. *International journal of remote sensing*, 29(5):1495–1510, 2008.
- S. Asaeeedi, F. Didehvar, and A. Mohades. α -concave hull, a generalization of convex hull. *Theoretical Computer Science*, 702:48–59, 2017.
- J. Bendix and C. R. Hupp. Hydrological and geomorphological impacts on riparian plant communities. *Hydrological processes*, 14(16-17):2977–2990, 2000.
- W. Bertoldi, A. Siviglia, S. Tettamanti, M. Toffolon, D. Vetsch, and S. Francalanci. Modeling vegetation controls on fluvial morphological trajectories. *Geophysical Research Letters*, 41(20):7167–7175, 2014.
- D. M. Bowman, R. J. Brienen, E. Gloor, O. L. Phillips, and L. D. Prior. Detecting trends in tree growth: not so simple. *Trends in plant science*, 18(1):11–17, 2013.
- J. K. Brown. Bulk densities of nonuniform surface fuels and their application to fire modeling. *Forest Science*, 27(4):667–683, 1981.
- C. Camporeale, E. Perucca, L. Ridolfi, and A. Gurnell. Modeling the interactions between river morphodynamics and riparian vegetation. *Reviews of Geophysics*, 51(3):379–414, 2013.
- R. Cartisano, W. Mattioli, P. Corona, G. S. Mugnozza, M. Sabatti, B. Ferrari, D. Cimini, and D. Giuliarelli. Assessing and mapping biomass potential productivity from poplar-dominated riparian forests: A case study. *Biomass and bioenergy*, 54:293–302, 2013.
- G. Caudullo and D. De Rigo. *Populus alba* in europe: Distribution, habitat, usage and threats. *European Atlas of Forest Tree Species; San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A., Eds*, pages 134–135, 2016.

- Q. Chen, D. Baldocchi, P. Gong, and M. Kelly. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(8):923–932, 2006.
- W. Chen, C. Cao, H. Tian, and J. Zhao. Shrub biomass estimation in semi-arid sandland ecosystem based on remote sensing technology. *glob. ecol. conserv.* e00479, 2018.
- L. Cheng, Y. Wu, S. Chen, W. Zong, Y. Yuan, Y. Sun, Q. Zhuang, and M. Li. A symmetry-based method for lidar point registration. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(1):285–299, 2017.
- D. Corenblit, J. Steiger, A. M. Gurnell, E. Tabacchi, and L. Roques. Control of sediment dynamics by vegetation as a key function driving biogeomorphic succession within fluvial corridors. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 34(13):1790–1810, 2009.
- C. Eloy. Leonardo’s rule, self-similarity, and wind-induced stresses in trees. *Physical review letters*, 107(25):258101, 2011.
- J. Estornell, L. Ruiz, B. Velázquez-Martí, and A. Fernández-Sarría. Estimation of shrub biomass by airborne lidar data in small forest stands. *Forest Ecology and Management*, 262(9):1697–1703, 2011.
- A. Falcão. Dunas—a growth model for the national forest of leiria. *Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation*, pages 20–26, 1997.
- P. A. Fernandes and J. P. Pereira. Caracterizagao de combustiveis na ~ erra da arrhbida. *Silva Lusitana*, 50(2):237–260, 1993.
- A. Fernández-Sarría, L. Martínez, B. Velázquez-Martí, M. Sajdak, J. Estornell, and J. Recio. Different methodologies for calculating crown volumes of platanus hispanica trees using terrestrial laser scanner and a comparison with classical dendrometric measurements. *Computers and electronics in agriculture*, 90:176–185, 2013.
- A. Ferraz, S. Saatchi, C. Mallet, S. Jacquemoud, G. Gonçalves, C. A. Silva, P. Soares, M. Tomé, and L. Pereira. Airborne lidar estimation of aboveground forest biomass in the absence of field inventory. *Remote Sensing*, 8(8):653, 2016.
- M. Flood. Laser altimetry: From science to commerical lidar mapping. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 67(11), 2001.
- M. García, D. Riaño, E. Chuvieco, and F. M. Danson. Estimating biomass carbon stocks for a mediterranean forest in central spain using lidar height and intensity data. *Remote Sensing of Environment*, 114(4):816–830, 2010.
- J. Garcia-Gonzalo, T. Pukkala, and J. G. Borges. Integrating fire risk in stand management scheduling. an application to maritime pine stands in portugal. *Annals of Operations Research*, 219(1):379–395, 2014.

- D. L. Gaveau and R. A. Hill. Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5):650–657, 2003.
- L. A. Goodman. On the exact variance of products. *Journal of the American statistical association*, 55(292):708–713, 1960.
- T. Gordon, H. Harding, F. Clever, I. Davidson, W. Davison, D. Montgomery, R. Weatherhead, F. Windsor, J. Armstrong, A. Bardonnnet, et al. Fishes in a changing world: learning from the past to promote sustainability of fish populations. *Journal of fish biology*, 92(3):804–827, 2018.
- S. Gupta, H. Weinacker, and B. Koch. Comparative analysis of clustering-based approaches for 3-d single tree detection using airborne fullwave lidar data. *Remote Sensing*, 2(4):968–989, 2010.
- A. Gurnell. Plants as river system engineers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(1):4–25, 2014.
- A. M. Gurnell, W. Bertoldi, and D. Corenblit. Changing river channels: The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. *Earth-Science Reviews*, 111(1-2):129–141, 2012.
- H. Hasenauer. Dimensional relationships of open-grown trees in austria. *Forest Ecology and Management*, 96(3):197–206, 1997.
- B. Höfle and N. Pfeifer. Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 62(6):415–433, 2007.
- L. Huylenbroeck, N. Latte, P. Lejeune, B. Georges, H. Claessens, and A. Michez. What factors shape spatial distribution of biomass in riparian forests? insights from a lidar survey over a large area. *Forests*, 12(3):371, 2021.
- Y. Jiang, C. Li, F. Takeda, E. A. Kramer, H. Ashrafi, and J. Hunter. 3d point cloud data to quantitatively characterize size and shape of shrub crops. *Horticulture research*, 6, 2019.
- L. Korhonen, J. Vauhkonen, A. Virolainen, A. Hovi, and I. Korpela. Estimation of tree crown volume from airborne lidar data using computational geometry. *International journal of remote sensing*, 34(20):7236–7248, 2013.
- L. Kui, J. C. Stella, A. Lightbody, and A. C. Wilcox. Ecogeomorphic feedbacks and flood loss of riparian tree seedlings in meandering channel experiments. *Water Resources Research*, 50(12):9366–9384, 2014.
- A. Kukko, S. Kaasalainen, and P. Litkey. Effect of incidence angle on laser scanner intensity and surface data. *Applied optics*, 47(7):986–992, 2008.

- M. Latella, M. Bertagni, P. Vezza, and C. Camporeale. An integrated methodology to study riparian vegetation dynamics: From field data to impact modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(8):e2020MS002094, 2020.
- M. Latella, F. Sola, and C. Camporeale. A density-based algorithm for the detection of individual trees from lidar data. *Remote Sensing*, 13(2):322, 2021.
- B. Lecigne, S. Delagrangé, and C. Messier. Exploring trees in three dimensions: Voxr, a novel voxel-based r package dedicated to analysing the complex arrangement of tree crowns. *Annals of botany*, 121(4):589–601, 2018.
- M. Lemmens. Terrestrial laser scanning. In *Geo-information*, pages 101–121. Springer, 2011.
- A. LIDAR. Lidar remote sensing for ecosystem studies.
- M. E. McDill and R. L. Amateis. Measuring forest site quality using the parameters of a dimensionally compatible height growth function. *Forest Science*, 38(2):409–429, 1992.
- J. E. Means, S. A. Acker, B. J. Fitt, M. Renslow, L. Emerson, C. J. Hendrix, et al. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(11):1367–1372, 2000.
- A. Michez, H. Piégay, P. Lejeune, and H. Claessens. Multi-temporal monitoring of a regional riparian buffer network (> 12,000 km) with lidar and photogrammetric point clouds. *Journal of environmental management*, 202:424–436, 2017.
- M. Mielcarek, K. Stereńczak, and A. Khosravipour. Testing and evaluating different LiDAR-derived canopy height model generation methods for tree height estimation. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 71:132–143, 2018a.
- M. Mielcarek, K. Stereńczak, and A. Khosravipour. Testing and evaluating different lidar-derived canopy height model generation methods for tree height estimation. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 71:132–143, 2018b.
- P. D. Miles. *Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America*, volume 38. US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 2009.
- B. Mitchell, M. Waltermann, T. Mellin, C. Wilcox, A. M. Lynch, J. Anhold, D. A. Falk, J. Koprowski, D. Laes, D. Evans, et al. Mapping vegetation structure in the pinaleno mountains using lidar-phase 3: Forest inventory modeling. *RSAC-100007-RPT1*. Salt Lake City, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Remote Sensing Applications Center. 17 p., 2012.

- A. Moreira and M. Y. Santos. Concave hull: A k-nearest neighbours approach for the computation of the region occupied by a set of points. 2007.
- D. J. Nowak. *Urban forest development and structure: analysis of Oakland, California*. PhD thesis, University of California, Berkeley, 1991.
- D. J. Nowak. *Understanding i-tree: summary of programs and methods*. US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 2020.
- J.-S. Park and S.-J. Oh. A new concave hull algorithm and concaveness measure for n-dimensional datasets. *Journal of Information Science and Engineering*, 28(3):587–600, 2012.
- A. Patrick and C. Li. High throughput phenotyping of blueberry bush morphological traits using unmanned aerial systems. *Remote Sensing*, 9(12):1250, 2017.
- J. Pereira, N. Sequeira, and J. Carreiras. Structural-properties and dimensional relations of some mediterranean shrub fuels. *International Journal of Wildland Fire*, 5(1):35–42, 1995.
- Politecnico di Torino. *Relazione idrologica-idraulica torrente orco*, 2020.
- A. d. C. Ricardo. *Modelação da probabilidade de ocorrência de incêndio em povoamentos florestais de Portugal Continental*. PhD thesis, 2010.
- I. Rosa, J. Pereira, and S. Tarantola. Atmospheric emissions from vegetation fires in portugal (1990–2008): estimates, uncertainty analysis, and sensitivity analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(6):2625–2640, 2011.
- T. P. d. Silva, J. M. C. Pereira, J. C. Paúl, M. T. N. Santos, and M. J. P. Vasconcelos. Estimativa de emissões atmosféricas originadas por fogos rurais em portugal. *Silva Lusitana*, 14(2):239–263, 2006.
- S. M. Simões. *Expansão ao alentejo e algarve de uma curva de acumulação pós-fogo para a biomassa arbustiva*. B.S. thesis, ISA, 2006.
- L. Solari, M. Van Oorschot, B. Belletti, D. Hendriks, M. Rinaldi, and A. Vargas-Luna. Advances on modelling riparian vegetation—hydromorphology interactions. *River Research and Applications*, 32(2):164–178, 2016.
- J. R. Taylor. *Error analysis*. Universal Science Books, Sausalito, CA, 1997.
- C. Tomsett and J. Leyland. Remote sensing of river corridors: A review of current trends and future directions. *River Research and Applications*, 35(7):779–803, 2019.
- J. Vauhkonen, T. Tokola, P. Packalén, and M. Maltamo. Identification of scandinavian commercial species of individual trees from airborne laser scanning data using alpha shape metrics. *Forest Science*, 55(1):37–47, 2009.

- C. J. Vörösmarty, P. B. McIntyre, M. O. Gessner, D. Dudgeon, A. Prusevich, P. Green, S. Glidden, S. E. Bunn, C. A. Sullivan, C. R. Liermann, et al. Global threats to human water security and river biodiversity. *nature*, 467(7315):555–561, 2010.
- W. Wagner. Radiometric calibration of small-footprint full-waveform airborne laser scanner measurements: Basic physical concepts. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6):505–513, 2010.
- Y. Wang, L. Cheng, Y. Chen, Y. Wu, and M. Li. Building point detection from vehicle-borne lidar data based on voxel group and horizontal hollow analysis. *Remote Sensing*, 8(5):419, 2016.
- G. B. West, J. H. Brown, and B. J. Enquist. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 276(5309):122–126, 1997.
- A. Winer, D. Fitz, P. Miller, E. Stephens, and F. Burlison. Investigation of the role of natural hydrocarbons in photochemical smog formation in california. final report 19 jun 79-18 sep 80. Technical report, California Univ., Riverside (USA). Statewide Air Pollution Research Center, 1981.
- B. Wu, B. Yu, W. Yue, S. Shu, W. Tan, C. Hu, Y. Huang, J. Wu, and H. Liu. A voxel-based method for automated identification and morphological parameters estimation of individual street trees from mobile laser scanning data. *Remote Sensing*, 5(2):584–611, 2013.
- M. A. Wulder, J. C. White, R. F. Nelson, E. Næsset, H. O. Ørka, N. C. Coops, T. Hilker, C. W. Bater, and T. Gobakken. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote sensing of environment*, 121:196–209, 2012.
- W. Y. Yan, A. Shaker, A. Habib, and A. P. Kersting. Improving classification accuracy of airborne lidar intensity data by geometric calibration and radiometric correction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67:35–44, 2012.
- Z. Yan, R. Liu, L. Cheng, X. Zhou, X. Ruan, and Y. Xiao. A concave hull methodology for calculating the crown volume of individual trees based on vehicle-borne lidar data. *Remote Sensing*, 11(6):623, 2019.
- X. Yu, J. Hyypä, M. Holopainen, and M. Vastaranta. Comparison of area-based and individual tree-based methods for predicting plot-level forest attributes. *Remote Sensing*, 2(6):1481–1495, 2010.