



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI, DEI SUOLI E DEL PAESAGGIO

**TECNOLOGIE INNOVATIVE PER IL
MONITORAGGIO DEI RIPRISTINI
VEGETAZIONALI IN ESECUZIONE DELLE
PROCEDURE DI VIA (D. LGS. 152/2006)**

**Innovative technologies for monitoring vegetation restoration
in the execution of VIA procedures (D. Lgs. 152/2006)**

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
ELENA PROVINCIALI

Relatore:
PROF. ROBERTO PIERDICCA

Correlatori:
DOTT. GIULIO TESEI
DOTT. MARCO BONACOSCIA

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

A chi, con la sua presenza, ha reso questo percorso più bello e speciale, donandomi
supporto, sorrisi e momenti indimenticabili.

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	10
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE	11
1.1 Scopo e finalità dei ripristini vegetazionali.....	11
1.2 D. Lgs. 152/2006 e Piano di Monitoraggio Ambientale	13
1.3 Descrizione generale delle tecniche di ripristino vegetazionale	15
1.4 Tecniche di Remote Sensing nel contesto forestale	19
1.5 Obiettivi e scopo della tesi.....	25
CAPITOLO 2 AREA DI STUDIO	27
2.1 Inquadramento territoriale.....	27
2.2 Siti Natura 2000	29
2.3 Descrizione delle tecniche di ripristino vegetazionale utilizzate nell'area di studio ...	33
2.3.1 Inerbimenti.....	34
2.3.2 Rimboschimenti	35
2.3.3 Interventi di ripristino di aree a verde urbano e/o ornamentale	36
2.3.4 Ripristino di formazioni lienare (filari e fasce).....	36
2.3.5 Mascheramento impianti di linea e strade di accesso	36
2.3.6 Cure colturali	36
2.4 Piante previste per il ripristino vegetazionale e il mascheramento degli impianti	37
2.5 Stazioni di monitoraggio.....	39
2.5.1 Stazione di monitoraggio VEP07RE	39
2.5.2 Stazione di monitoraggio VEP06RE	39
2.5.3 Stazione di monitoraggio VEP05RE	39
2.5.4 Stazione di monitoraggio VED03SP	40
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI	41
3.1 Laser scanner	41

3.2 Acquisizione dati in campo.....	44
3.3 Software per l'elaborazione dei dati.....	49
3.3.1 Faro Connect.....	49
3.3.2 CloudCompare.....	51
CAPITOLO 4 RISULTATI.....	54
4.1 Accuratezza della sovrapposizione.....	54
3.1 Risultati qualitativi.....	54
3.1 Risultati quantitativi.....	58
CAPITOLO 5 DISCUSSIONI.....	64
CAPITOLO 6 CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI	68
RINGRAZIAMENTI	73
BIBLIOGRAFIA	74
SITOGRAFIA	80

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 2-1: Habitat presenti nella ZSC IT3240029	31
Tabella 2-2: Elenco specie utilizzate nei ripristini.....	37
Tabella 3-1: Estensione delle aree soggette a rilievo da laser scanner.....	45
Tabella 4-1: Accuratezza della sovrapposizione per ogni stazione di monitoraggio.....	54
Tabella 4-2: Valori medi degli accrescimenti per ogni stazione di monitoraggio	63

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1: Comportamento di una radiazione incidente su una superficie. Bornaz (2006)	20
Figura 1-2: Spettro elettromagnetico. Fonte: https://www.chimica-online.it/download/spettro-elettromagnetico.htm	21
Figura 1-3: Firme spettrali di vegetazione verde, acqua e suolo a confronto. Fonte: https://www.alspergis.altervista.org/lezione/05.html	22
Figura 1-4: E Sensori attivi e passivi. Fonte: https://www.ruralhack.org/telerilevamenti-per-il-monitoraggio-delle-culture/	22
Figura 2-1: Localizzazione dell'area di studio	27
Figura 2-2: Comuni coinvolti nel rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo - San Polo di Piave - Salgareda	28
Figura 2-3: Stazioni di monitoraggio ricadenti nella ZSC IT3240029	31
Figura 2-4: Stazione di monitoraggio con habitat 3260 "Fiumi delle pianure e montani con vegetazione del <i>Ranunculus fluitantis</i> e <i>Calliricho-Batrachio</i> "	32
Figura 2-5: Distribuzione percentuale delle superfici di ripristino interessate da diverse tipologie di ripristino vegetazionale	34
Figura 3-1: Laser scanner Obris TM di FARO	43
Figura 3-2: Stazione di monitoraggio VED03SP	44
Figura 3-3: Stazione di monitoraggio VEP05RE	44
Figura 3-4: Stazione di monitoraggio VEP06RE	44
Figura 3-5: Stazione di monitoraggio VEP07RE	44
Figura 3-6: Localizzazione della stazione VED03SP. Il poligono arancione rappresenta l'area oggetto di verifica dei ripristini, mentre quello giallo l'area di rilevamento di controllo. La linea rossa rappresenta il 2° tratto del metanodotto in progetto, mentre quella verde il metanodotto in rimozione	45
Figura 3-7: Localizzazione della stazione VEP05RE. Il poligono arancione rappresenta l'area oggetto di verifica dei ripristini, mentre quello giallo l'area di rilevamento di controllo.	

La linea rossa rappresenta il 2° tratto del metanodotto in progetto, mentre quella verde il metanodotto in rimozione	46
Figura 3-8: Localizzazione della stazione VEP06RE. Il poligono arancione rappresenta l'area oggetto di verifica dei ripristini, mentre quello giallo l'area di rilevamento di controllo. La linea rossa rappresenta il 2° tratto del metanodotto in progetto, mentre quella verde il metanodotto in rimozione	46
Figura 3-9: Localizzazione della stazione VEP07RE. Il poligono arancione rappresenta l'area oggetto di verifica dei ripristini, mentre quello giallo l'area di rilevamento di controllo. La linea rossa rappresenta il 2° tratto del metanodotto in progetto, mentre quella verde il metanodotto in rimozione	47
Figura 3-10: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VED03SP. La linea blu rappresenta il percorso	47
Figura 3-11: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP05RE (scansione 1). La linea blu rappresenta il percorso.....	48
Figura 3-12: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP05RE (scansione 2). La linea blu rappresenta il percorso.....	48
Figura 3-13: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP05RE (scansione 3). La linea blu rappresenta il percorso.....	48
Figura 3-14: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP06RE. La linea blu rappresenta il percorso	48
Figura 3-15: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP07RE (scansione 1). La linea blu rappresenta il percorso.....	49
Figura 3-16: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP07RE (scansione 2). La linea blu rappresenta il percorso.....	49
Figura 3-17: La linea rossa rappresenta la traiettoria nella stazione di monitoraggio VED03SP della scansione acquisita nel mese di luglio.	50
Figura 3-18: Ogni cerchio rappresenta una fotografia scattata durante la scansione nella stazione di monitoraggio VED03SP acquisita nel mese di luglio.....	50
Figura 3-19: Esempio di misurazione all'interno di una delle foto scattate in automatico dallo strumento durante la scansione	51
Figura 3-20: Esempio di mesh creata con l'uso del plugin CSF Filter (stazione di monitoraggio VEP06RE)	52
Figura 3-21: Esempio di stima dell'altezza della pianta n°11 nel mese di ottobre (stazione di monitoraggio VED03SP)	53

Figura 4-1: Valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VED03SP	55
Figura 4-2: Valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VEP05RE, area 1	56
Figura 4-3: Valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VEP05RE, area 2	56
Figura 4-4: Valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VEP06RE	57
Figura 4-5: Valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VEP07RE, area 1	57
Figura 4-6: Valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VEP07RE, area 2	58
Figura 4-7: Visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VED03SP con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.....	59
Figura 4-8: Visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VEP05RE (area 1) con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.....	59
Figura 4-9: Visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VEP05RE (area 2) con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.....	60
Figura 4-10: Visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VEP06RE con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.....	60
Figura 4-11: Visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VEP07RE (area 1) con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.....	61
Figura 4-12: Visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VEP07RE (area 2) con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo	

la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.....	61
Figura 4-13: Distribuzione mediante quattro box plot, uno per ciascuna delle stazioni di monitoraggio, che illustrano le variazioni di altezza delle piantine tra i mesi di luglio e ottobre	62
Figura 5-1: Distribuzione degli accrescimenti nelle 4 stazioni di monitoraggio. I dati derivano da rilievo tradizionale mediante flessometro. Per ogni stazione di monitoraggio sono state misurate 25 piante campione	66
Figura 6-1: Nuvola di punti acquisita in località Pontebaffoni (RN).....	69
Figura 6-2: Nuvola di punti acquisita in località Miratoio (RN)	69
Figura 6-3: Output georeferenziato sul software QGIS del rilievo svolto in località Pontebaffoni (RN).....	70
Figura 6-4: Output georeferenziato sul software QGIS del rilievo svolto in località Miratoio (RN)	70

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

ALS	Airborne Laser Scanner
DBH	Diameter at Breast Height
GEDI	Global Ecosystem Dynamics Investigation
GNSS	Global Navigation Satellite System
HLS	Hand-Held Laser Scanner
IMU	Inertial Measurement Unit
LiDAR	Light Detection and Ranging
MA	Monitoraggio Ambientale
MLS	Mobile Laser Scanner
NM	Nanometri
PLS	Unmanned Aerial Vehicle Personal/Portable Laser Scanner
PMA	Piano di Monitoraggio Ambientale
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
TH	Tree Height
TLS	Terrestrial Laser Scanner
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VIA	Valutazione d’Impatto Ambientale
WLS	Wearable Laser Scanner

Capitolo 1

INTRODUZIONE

1.1 Scopo e finalità dei ripristini vegetazionali

La vegetazione svolge un ruolo cruciale nel miglioramento ambientale e ultimamente sta suscitando un interesse sempre crescente tra le persone, soprattutto in un contesto globale dove viene dedicata sempre maggiore attenzione a temi legati al cambiamento climatico, alla biodiversità e ai benefici che la vegetazione offre per la salute umana.

La vegetazione svolge infatti un ruolo fondamentale nella fornitura di servizi ecosistemici. Tra questi rientrano la regolazione del clima, molto importante nella lotta contro il cambiamento climatico grazie alla sua capacità di assorbire anidride carbonica (CO₂) e conservare il carbonio assimilato anche per periodi relativamente lunghi, la produzione di ossigeno, andando quindi a ridurre la concentrazione di gas serra nell'atmosfera (Sanesi e Mairota, 2010), ma anche la protezione del suolo, il mantenimento della biodiversità e il miglioramento della qualità dell'aria e dell'acqua. Inoltre, gli alberi contribuiscono al raffreddamento dell'ambiente circostante, contrastando il fenomeno dell'isola di calore, che si manifesta con temperature più elevate nei centri urbani rispetto alle zone rurali limitrofe (Beretta, 2012).

In questo scenario è di fondamentale importanza il ripristino di quegli ecosistemi che risultano essere degradati o danneggiati, ma anche cercare di arrestare e prevenire il degrado; il periodo 2021-2030 è stato dichiarato come il Decennio dell'ONU per il ripristino dell'Ecosistema, proclamato tale dall'Assemblea generale delle Nazioni Unite, che ha lo scopo di far riacquistare agli ecosistemi la loro funzionalità ecologica, contribuendo all'adattamento e alla mitigazione al cambiamento climatico (Meli et al, 2022).

Gli impatti del cambiamento climatico hanno aumentato la frequenza di disastri naturali, come incendi, frane e valanghe, che spesso comportano perdite significative della vegetazione e per questo risulta necessario recuperare e ripristinare la vegetazione sia per i benefici che ne comporta sia per prevenire ulteriori danni.

Un concetto chiave è quello di “Build Back Better” (BBB), che implica non solo il ripristino delle condizioni ante-evento dell'area colpita, ma anche una riduzione della vulnerabilità al

fine di minimizzare le perdite nel caso di ulteriori disastri futuri. Questo approccio è definito resilienza evolutiva, ovvero “ricostruire meglio” e ridurre futuri rischi (Zhao et al., 2023).

Oltre che nel caso di calamità naturali, anche la costruzione di opere pubbliche come infrastrutture di trasporto (strade, autostrade, linee ferroviarie) o infrastrutture energetiche (metanodotti) può portare a una significativa perdita della vegetazione.

Nelle aree fortemente degradate o altamente modificate, si procede con interventi di restauro e si parla quindi di ripristino vegetazionale.

Il ripristino vegetazionale è un sottoinsieme del ripristino ambientale e mira nello specifico alla reintroduzione della copertura vegetale per un recupero delle condizioni ante-evento.

L'uso di specie autoctone è fondamentale in questo processo, poiché essendosi evolute all'interno di un determinato habitat sono in grado di ripristinare le funzioni dell'ecosistema e conservare la diversità biologica (Lu et al, 2017).

Tra gli scopi principali dei ripristini vegetazionali vi sono quelli ecologici, legati dunque alla sostenibilità ecologica e alla conservazione delle risorse naturali, tra cui il miglioramento della qualità dell'aria, la creazione di corridoi ecologici per la fauna, essenziali per il collegamento di habitat che sono stati frammentati, la stabilizzazione del suolo e la conservazione della biodiversità.

Nel caso di ripristini a seguito di opere pubbliche si sottolinea l'importanza dei benefici sociali, quindi considerare la riduzione dell'impatto visivo e l'accettazione sociale dei progetti, per limitare la preoccupazione della comunità riguardo gli effetti estetici causati dalle nuove infrastrutture.

Importante è anche il coinvolgimento delle comunità locali, poiché esse possiedono valori tradizionali e locali che, se combinati con la conoscenza scientifica, possono migliorare significativamente l'efficacia delle azioni di recupero ambientale, soprattutto per il successo a lungo termine dei progetti di ripristino (Dai et al, 2024)

Ulteriori tipi di benefici sono quelli economici, infatti il ripristino della natura è importante anche per la crescita economica e per la creazione di nuovi posti di lavoro (Mirzabaev & Wuepper, 2023).

Inoltre i ripristini, come la riforestazione e il recupero di ecosistemi degradati, contribuiscono in maniera significativa al sequestro di carbonio.

In questo contesto, realtà come Snam (Società Nazionale Metanodotti), svolgono un ruolo fondamentale poiché si impegnano al raggiungimento di obiettivi di sostenibilità, mirando non solo a riportare le aree interessate dai lavori alla situazione ex-ante, ma migliorarla piantando più alberi di quelli che erano presenti prima (Snam, 2024). Uno dei loro obiettivi principali è

il raggiungimento della neutralità carbonica entro il 2040 per le emissioni dirette e indirette energetiche, e raggiungere il Net Zero entro il 2050 su tutte le emissioni (<https://www.snam.it/it/esg/la-strategia-per-il-futuro/snam-carbon-neutrality.html>).

Per incentivare le aziende a raggiungere obiettivi di sostenibilità i crediti di carbonio risultano essere uno strumento fondamentale. I crediti di carbonio sono dei certificati che corrispondono a una tonnellata di CO₂ non emessa o assorbita: le aziende che non riescono a ridurre le loro emissioni possono acquisire crediti di carbonio da enti esterni certificati, mettendo in campo attività che vanno a compensare la CO₂ emessa (<https://heracomm.gruppohera.it/cambiamenti/cultura-della-sostenibilita/crediti-di-carbonio-cosa-sono-e-come-ottenerli>).

Queste strategie sono fondamentali per contrastare i cambiamenti climatici e promuovere la sostenibilità, migliorando l'ambiente ma anche incentivando verso una transizione a un'economia sostenibile.

1.2 D. Lgs. 152/2006 e Piano di Monitoraggio Ambientale

Nel contesto della gestione degli impatti causata dalle opere pubbliche, il Decreto Legislativo n. 152/2006 stabilisce l'importanza da un lato di limitare e compensare gli impatti ambientali attraverso misure di mitigazione, al fine di ridurre al minimo gli impatti negativi, e dall'altro di adottare misure di compensazione, ovvero si rende necessario compensare i danni ambientali, che non possono essere mitigati, mediante varie tecniche tra cui i ripristini vegetazionali.

Con la Parte Seconda del D. Lgs. 152/2006, il Monitoraggio Ambientale (MA) è diventato parte fondamentale e integrante del processo della Valutazione d'Impatto Ambientale (VIA).

Il MA ha lo scopo di valutare l'evoluzione dello stato ambientale nelle varie fasi del progetto, al fine di verificare l'efficacia delle misure di mitigazione adottate e poter individuare eventuali impatti negativi, consentendo di intervenire tempestivamente per risolvere tali problematiche.

Risulta quindi necessario un Piano di Monitoraggio Ambientale, che ai sensi dell'Allegato XXI (Sezione II) al D. Lgs. 163/2006 e s.m.i. viene definito come «...l'insieme dei controlli da effettuare attraverso la rilevazione e misurazione nel tempo di determinati parametri biologici, chimici e fisici che caratterizzano le componenti ambientali impattate dalla realizzazione e/o dall'esercizio delle opere».

Nelle Linee Guida per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) delle opere soggette a Valutazione di Impatto Ambientale – Indirizzi metodologici principali,

vengono definiti i criteri e le metodologie per monitorare gli impatti ambientali delle opere soggette a VIA.

Il monitoraggio deve essere effettuato durante tre diverse fasi:

1. Ante-operam: periodo antecedente la fase di inizio dell'attività di cantiere;
2. In corso d'opera: periodo comprendente la fase di cantiere e la successiva realizzazione dell'opera;
3. Post-operam: periodo comprendente la fase di esercizio ed eventuale dismissione dell'opera.

Il monitoraggio in queste ultime due fasi è indispensabile per valutare l'evoluzione delle componenti ambientali monitorate, mentre il monitoraggio ante-operam si rende necessario per avere un quadro di riferimento sulla caratterizzazione delle varie componenti ambientali.

Nei PMA si monitorano vari fattori/componenti ambientali, elencati di seguito:

- Atmosfera;
- Ambiente idrico;
- Suolo e sottosuolo;
- Biodiversità (vegetazione, flora e fauna);
- Agenti fisici (rumore, vibrazioni, radiazioni ionizzanti e non ionizzanti);
- Paesaggio e beni culturali.

Per il monitoraggio delle componenti ambientali sopra indicate, si rende necessario stabilire stazioni e punti di monitoraggio, scelti in aree dove sono previsti impatti negativi per la componente indagata. Il numero delle stazioni/punti di monitoraggio dipende dall'entità degli impatti attesi, dalla sensibilità e criticità del contesto ambientale, e dalla presenza di pressioni esterne alla realizzazione dell'opera.

Vengono poi stabiliti una serie di parametri ambientali da monitorare, che vanno a rappresentare lo stato quali-quantitativo di ciascuna componente ambientale.

A seguito dei monitoraggi devono essere redatti rapporti tecnici sulle attività svolte, comprendenti la descrizione e la localizzazione delle stazioni di monitoraggio, i parametri monitorati e i risultati del monitoraggio. È inoltre necessario predisporre di dati territoriali georeferenziati, per consentire una rappresentazione dei principali elementi progettuali e delle stazioni/punti di monitoraggio sul web GIS. I dati devono essere forniti in formato SHP, con sistema di riferimento WGS84 o ETRS89.

Allo scopo di questo lavoro le attenzioni vengono concentrate sulla componente della biodiversità, in particolare sulla vegetazione, seguendo le indicazioni delle Linee Guida per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) delle opere soggette a

procedure di VIA – Indirizzi metodologici specifici: Biodiversità (Vegetazione, Flora, Fauna) (Capitolo 6.4).

L'obiettivo del monitoraggio sulla vegetazione è la valutazione di eventuali modifiche della struttura, della composizione e dello stato di salute delle fitocenosi; a tale scopo viene fatto un monitoraggio ante-operam, per una caratterizzazione delle fitocenosi presenti, per poi monitorare eventuali alterazioni in fase di corso d'opera e post-operam.

I parametri descrittivi che vengono analizzati durante i monitoraggi sono elencati di seguito:

- Stato fitosanitario: non viene analizzata solo la presenza di patologie o di mortalità, ma vengono anche registrate le eventuali alterazioni della crescita, con misurazioni di diametro e altezza;
- Stato delle popolazioni: viene analizzata sia la comparsa/aumento di specie alloctone, sinantropiche e ruderali, sia le condizioni e trend di specie o gruppi di specie vegetali selezionate.
- Stato degli habitat: vengono svolte analisi qualitative sulla variazione nella composizione specifica e analisi quantitative sulla variazione dell'estensione delle formazioni. Si tiene conto di una serie di indicatori, quali: frequenza delle specie ruderali, esotiche e sinantropiche, conta delle specie target suddivise in classi di età, rapporto tra specie alloctone e autoctone e grado di conservazione/estensione degli habitat di interesse naturalistico.

Il monitoraggio post-operam deve essere svolto per almeno tre anni dalla fine dei lavori.

1.3 Descrizione generale delle tecniche di ripristino vegetazionale

Il termine “ripristino ecologico” si riferisce a tutti quegli interventi finalizzati ad avviare processi naturali per riqualificare e riabilitare un'area degradata. Tuttavia, non sempre è possibile riportare un ecosistema alle sue condizioni originarie, indicate come “condizioni zero”. In questi casi è più appropriato parlare di “riabilitazione”, ovvero il recupero delle condizioni precedenti il disturbo, al fine di ristabilire la funzionalità dell'ecosistema e una biodiversità sufficiente a favorire l'innescio di processi di evoluzione naturale. Nonostante ciò viene comunque accettata la definizione di “ripristino”, così come data dalla SER, ovvero “il ripristino ecologico è un processo di risanamento assistito di un ecosistema degradato, danneggiato o distrutto”.

Importante è costituire un gruppo di lavoro multidisciplinare, in grado di offrire una vasta gamma di competenze e garantire un approccio più efficace per affrontare e risolvere le

problematiche. Come primo passo è fondamentale recuperare i vari dati del contesto in cui il gruppo deve operare, e successivamente stabilire gli obiettivi del ripristino, che possono essere quello di risanare un ecosistema danneggiato oppure di ricostruire un ecosistema preesistente, ove possibile, o costruire un ecosistema diverso dal preesistente se le condizioni ambientali non consentono altrimenti, ad esempio a causa di un ambiente modificato in maniera irreversibile.

I lavori non si concludono con il termine degli interventi, ma devono continuare con dei monitoraggi nel tempo per valutarne l'efficacia e con lavori di manutenzione, fondamentali per garantire un'efficienza nel tempo.

Le tecniche di propagazione delle specie vegetali in interventi di ripristino sono fondamentalmente due: propagazione gamica e propagazione agamica.

La propagazione gamica è quella mediante seme e garantisce una maggiore variabilità genetica, oltre ad essere un metodo efficace ed economico.

La propagazione agamica mantiene invece gli stessi caratteri genetici e quindi uniformità nel materiale di propagazione, e può essere eseguita in diversi modi:

- Per innesto, ovvero una porzione di una pianta, generalmente un ramo o una gemma, viene unita a un'altra pianta munita di apparato radicale. Questo metodo trova scarso impiego nei ripristini poiché richiede costi elevati e ha una bassa utilità pratica;
- Per talea, ovvero prelevando una porzione di una pianta madre (ramo, radice o foglia) che viene poi posta in condizioni idonee per poter sviluppare nuove radici e generare una pianta autonoma. Questo metodo è molto utilizzato nei ripristini per alcune specie come salici e pioppi;
- Per margotta, ovvero una tecnica che consiste nell'incidere un ramo e ricoprendo l'incisione con un substrato umido oppure in alternativa viene tagliata la pianta e la ceppaia viene ricoperta di terra. In entrambi i casi ciò che si vuole favorire è l'emissione delle radici. È un metodo lungo ma utile per piante che presentano una difficile radicazione;
- Per propaggine, ovvero si va a piegare un ramo fino a interrarlo parzialmente nel terreno, ma questo metodo ha una scarsa applicazione nei ripristini;
- Per polloni radicali, ovvero sfruttando la capacità di alcune specie di emettere polloni. Questa tecnica trova largo impiego nei ripristini, soprattutto quando è richiesto materiale reperito localmente (Amprimo et al, 2005).

Un aspetto fondamentale da considerare è la scelta delle specie vegetali da impiegare. Le specie selezionate devono essere autoctone e devono far parte di uno stadio della serie di

vegetazione autoctona, solitamente uno stadio pioniero o intermedio. Questo approccio consente di prevedere la sua evoluzione nel tempo e garantire lo sviluppo di comunità vegetali stabili. Inoltre, le specie devono essere compatibili con le caratteristiche ecologiche dell'area da ripristinare, oltre che facilmente reperibili in vivai locali, che dovrebbero essere contattati con anticipo per consentire il tempo necessario alla riproduzione delle specie richieste.

Le specie arboree costituiscono uno stadio strutturale più complesso, quindi poco adatte all'impianto in contesti difficili da un punto di vista morfologico ed ecologico, ma utilizzate nel caso di ambiti forestali preesistenti.

Le specie arbustive invece vengono usate in contesti in cui lo scopo è quello di stabilizzare il suolo, in quanto le radici degli arbusti possono raggiungere una profondità di 60 cm, mentre quelle degli alberi non sempre raggiungono tali profondità.

Le specie erbacee vengono utilizzate per ripristinare aree prative o nel caso in cui non sia possibile l'impianto di specie arboree o arbustive, a causa del substrato o di un'eccessiva pendenza. I miscugli comprendono solitamente sia graminacee, con le loro radici fascicolate, sia leguminose, che fissano il suolo con le loro radici fittonanti. Nel caso di suolo praticamente assente si prediligono le leguminose, che favoriscono la successiva colonizzazione da parte di altre specie più evolute. Una tecnica molto vantaggiosa è quella dell'uso di fiorume locale, anche se molto costoso; in alternativa si utilizzano specie a rapida scomparsa, che lasciano poi posto allo sviluppo di specie autoctone (Bianco et al, 2010).

Per meglio illustrare le tecniche generali di ripristino, di seguito si riportano alcuni casi pratici tratti da piani di ripristino esistenti.

Vengono per prime analizzate le pratiche messe in atto nei ripristini che coinvolgono aree boschive e prative.

Una pratica comune, riscontrata in diversi casi studio, consiste nella preparazione del letto di semina, ovvero accantonare in cumuli appositi i primi centimetri (40-50 cm) di terreno, ricchi di humus, e riutilizzarli successivamente come strato superficiale; il terreno che deriva da scavi più profondi viene accantonato separatamente e si deve poi cercare di mantenere l'originaria stratificazione degli strati (Amoroso et al, 2024; Bertuccio et al, 2015; Colombo & Pirra, 2013).

Per il ripristino delle superfici prative, le tecniche di inerbimento più comuni sono la semina a spaglio, che può essere realizzata meccanicamente o manualmente, e l'idrosemina. La prima è particolarmente adatta per superfici pianeggianti ed è buona pratica rastrellare successivamente il terreno per garantire un corretto interrimento del seme. L'idrosemina invece è una miscela di semi e acqua, a cui possono essere aggiunti agenti adesivi e/o

fertilizzanti. Questa viene preferita in contesti più delicati, come terreni sottili, erodibili o caratterizzati da pendenze elevate (Amoroso et al., 2024; Colombo & Pirra, 2013; Studio Tecnico Conte & Pegorer, 2021; TAP, n.d.).

Per il ripristino di superfici boschive, si esegue invece la piantumazione di alberi e arbusti, preferibilmente di specie autoctone. Si esegue inizialmente lo sfalcio di infestanti e altra vegetazione, se presente, e successivamente lo spietramento. Si passa poi all'apertura di buche che devono contenere la zolla e devono essere di dimensioni doppie in larghezza rispetto alla zolla e profonde quanto la radice. Se necessario si può inserire acqua e fertilizzante nel foro prima del rinterro. È buona pratica eseguire un'irrigazione dopo la messa a dimora delle piante. (Studio Tecnico Conte & Pegorer, 2021; TAP, n.d.; Amoroso et al., 2024). Può anche essere eseguita la pacciamatura mediante biodischi, per ridurre lo stress idrico e diminuire l'antagonismo da parte di infestanti intorno al colletto della piantina, o dischi pacciamanti, che hanno lo scopo di favorire l'attecchimento ed eseguire un controllo delle infestanti (Amoroso et al., 2024; Studio Tecnico Conte & Pegorer, 2021). A protezione delle piantine è consigliabile l'installazione di protezioni individuali, come shelter in plastica anticinghiale (Amoroso et al., 2024).

Per quanto riguarda il sesto d'impianto, è preferibile ricreare un ambiente il più naturaliforme possibile, disponendo quindi le piante con un sesto irregolare (Amoroso et al., 2024; Bertuccio et al, 2015).

A seguito di questi interventi, si richiede anche una successiva manutenzione, per garantire la crescita e la stabilizzazione delle specie nel tempo. Le cure colturali vengono eseguite negli anni successivi la fine degli interventi, solitamente per i 3 o 5 anni successivi, e consistono principalmente nella sostituzione delle piante che non hanno attecchito (nel caso di alberi o arbusti) e un'ulteriore semina nelle aree erbacee se la copertura risulta essere insufficiente. Deve essere eseguita anche la rimozione delle infestanti, irrigazioni di soccorso e fertilizzazioni, nel caso risultino essere necessarie. Può essere eseguita anche la zappatura del terreno intorno alle piantine, con lo scopo di aumentare la permeabilità e limitare l'aggressione da parte di infestanti (Amoroso et al., 2024; Bertuccio et al., 2015; TAP, n.d.).

Per quanto riguarda invece gli interventi di ripristino di ecosistemi marini, l'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale) offre un repertorio nazionale dove sono stati censiti 30 interventi di ripristino dislocati in tutto il territorio nazionale. Questa iniziativa nasce in risposta al crescente degrado di tali ecosistemi, causato principalmente dall'aumento della pressione antropica.

Uno dei principali fattori di degrado è l'eccessivo turismo, che provoca un aumento del calpestio e causa una progressiva perdita della vegetazione. In alcuni casi, per contrastare questo effetto, si interviene realizzando compartimenti chiusi per favorire il recupero della vegetazione (ISPRA, n.d. a; ISPRA, n.d. b). In altri casi, sono state utilizzate delle tecniche di ingegneria tradizionale, come la realizzazione di passerelle per incanalare l'accesso alla spiaggia e barriere basali per proteggere il piede dunale, impedendo al contempo l'accesso in tali aree. Inoltre, nelle aree interdette al pubblico, è stata eseguita la piantumazione di specie psammofile, contribuendo al ripristino dell'ecosistema dunale (Perra, n.d.). In altre situazioni si è anche cercato di regolare l'accesso ai sentieri, permettendo il passaggio dei turisti in alcuni tratti e chiudendone altri, dove sono state piantate specie autoctone (ISPRA, n.d. c).

In contesti di ricolonizzazione e ricostruzione dell'area, una specie di particolare rilevanza è l'*Ammophila littoralis*, spesso utilizzata per promuovere il ripristino dell'ecosistema. Tuttavia, questa specie ha mostrato uno scarso attecchimento in alcune situazioni, dove si è deciso in alternativa di recintare le aree di intervento e procedere con la piantumazione di altre specie che hanno consentito di raggiungere un'elevata copertura in tempi relativamente brevi (ISPRA, n.d. d). Diversamente, in altri casi, l'*Ammophila arenaria* è riuscita a colonizzare rapidamente l'ambiente, andando a occupare lo spazio disponibile in modo efficace (ISPRA, n.d. e).

Nel caso di nuovi impianti, è frequente l'impiego di schermi frangivento, che svolgono un ruolo fondamentale nel favorire l'insediamento delle piante durante gli stadi iniziali, garantendo così un'alta percentuale di attecchimento (ISPRA, n.d. f; ISPRA, n.d. g). Infine, in altre situazioni, l'obiettivo principale consiste nel limitare la diffusione delle specie alloctone, che possiedono una notevole capacità competitiva nei confronti delle specie locali, andando a ridurre la biodiversità. In tali contesti, si è cercato di raccogliere il materiale di propagazione direttamente sul territorio, stoccandolo temporaneamente ex situ per poi reintrodurlo mediante semina e piantumazione, cercando di rispettare la naturale sequenza spaziale delle associazioni vegetali caratteristiche di questi ecosistemi (ISPRA, n.d. h).

Questi esempi di piani di ripristino evidenziano come le tecniche applicate possono variare a seconda dei contesti e degli obiettivi del piano, ma tutte mirano a favorire la rigenerazione degli ecosistemi.

1.4 Tecniche di Remote Sensing

I monitoraggi dei ripristini vegetazionali svolti in maniera "tradizionale", richiedono tempi prolungati e un notevole impiego di manodopera. Queste tecniche risultano essere limitate dal

punto di vista delle superfici monitorate, rendendole molto laboriose per superfici di monitoraggio di aree particolarmente estese o difficilmente accessibili. Inoltre, la natura manuale dei rilievi svolti in campo introduce inevitabilmente un elemento di soggettività, che può influenzare la qualità dei dati raccolti.

In questo contesto le tecniche di *Remote Sensing* si stanno affermando sempre maggiormente come strumenti innovativi per superare le limitazioni dei rilievi tradizionali.

Con il termine *Remote Sensing* o Telerilevamento, si intende una tecnica che permette di acquisire informazioni su un oggetto o una superficie senza che ci sia un diretto contatto con questi. Nel momento in cui una radiazione elettromagnetica colpisce un oggetto, essa viene in parte assorbita, in parte riflessa e in parte trasmessa (Figura 1-1) (Bornaz, 2006).

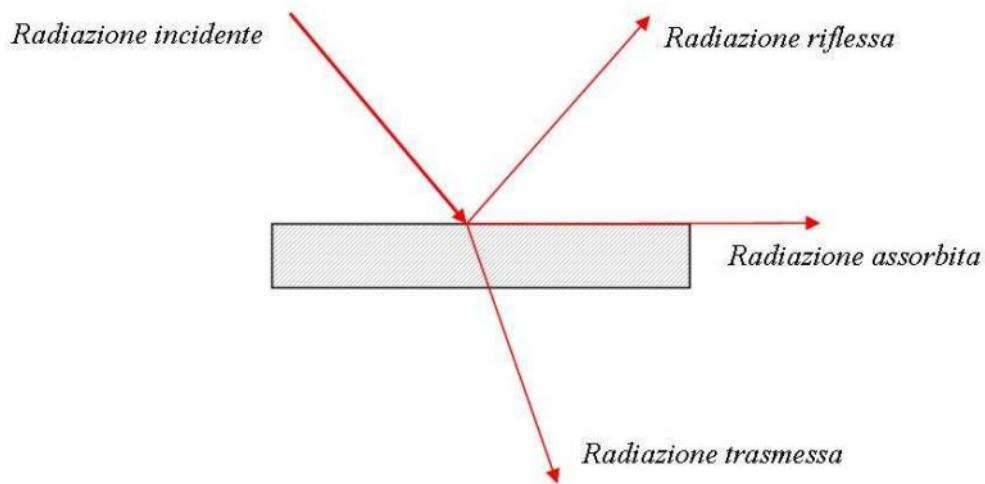


Figura 1-1: Comportamento di una radiazione incidente su una superficie. Bornaz (2006).

La radiazione elettromagnetica viene definita come l'emissione o il trasferimento di energia nella forma di onde elettromagnetiche e di fotoni. In base alle diverse lunghezze d'onda, le radiazioni elettromagnetiche interagiscono in modo diverso con le superfici, cambiando il modo in cui vengono assorbite, riflesse o trasmesse. Lo spettro elettromagnetico è la rappresentazione grafica delle onde secondo la loro lunghezza d'onda (Figura 1-2).

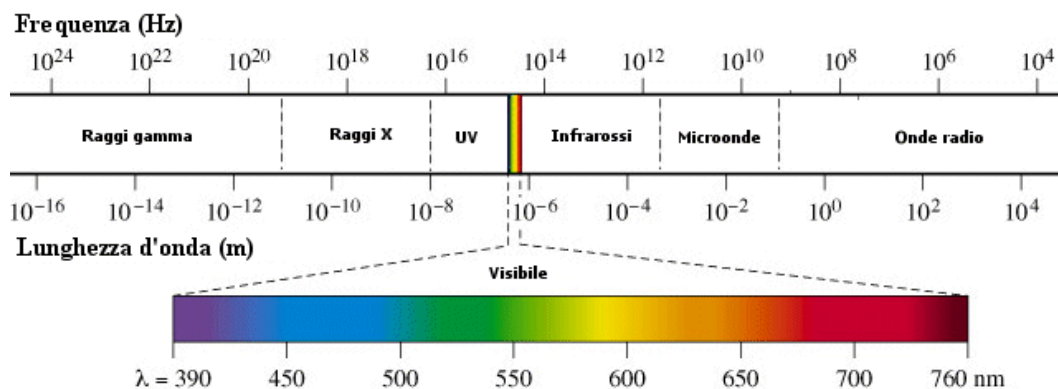


Figura 1-2: Spettro elettromagnetico. Fonte: <https://www.chimica-online.it/download/spettro-elettromagnetico.htm>

La luce visibile comprende una piccola porzione dello spettro elettromagnetico, compresa tra i 390 e i 760 nm. La divisione tra le varie regioni (onde radio, microonde, infrarosso, luce visibile, ultravioletto, raggi X e raggi gamma) non è netta, ma c'è una transizione graduale tra una regione e l'altra (Zwinkles, 2015).

L'assorbimento, la riflessione e la trasmissione della radiazione elettromagnetica incidente variano da oggetto a oggetto, rendendo possibile caratterizzarli sulla base del loro comportamento spettrale. La variazione di riflettività della radiazione incidente alle diverse lunghezze d'onda può essere rappresentata mediante una curva: la firma spettrale.

Le firme spettrali sono ampiamente usate in ambito forestale per monitorare ad esempio lo stato di salute della vegetazione. Le foglie di piante in buona salute, grazie alla presenza dei diversi pigmenti fogliari, mostrano un alto assorbimento nella regione visibile dello spettro (400-700 nm), in particolare nella regione delle lunghezze d'onda del blu e del rosso, mentre assorbono in maniera minore, quindi c'è una maggior riflessione, nel verde, e per tale motivo le foglie appaiono di questo colore. La riflettanza è invece elevata nella regione dell'infrarosso vicino, a causa della struttura dei tessuti fogliari.

Lo stress delle piante porta a una minore presenza di clorofilla e a una maggiore concentrazione di altri pigmenti come carotenio e xantofilla. Questo comporta un aumento della riflettanza nelle lunghezze d'onda maggiori del visibile, verso il giallo/arancione e rosso, per questo le foglie in questo contesto si presentano di tali colori. Allo stesso tempo diminuisce la riflettanza nell'infrarosso vicino (Pinter et al., 2003)

Assume particolare importanza nell'analisi dello stato di salute della vegetazione il *red edge*, situato tra il rosso e l'infrarosso vicino, essendo particolarmente indicativo nella variazione del contenuto di clorofilla e quindi dello stress della pianta (Merton, 1998).

Le firme spettrali permettono inoltre di discriminare le diverse classi di copertura del territorio, come suolo nudo, acqua e vegetazione (Figura 1-3).

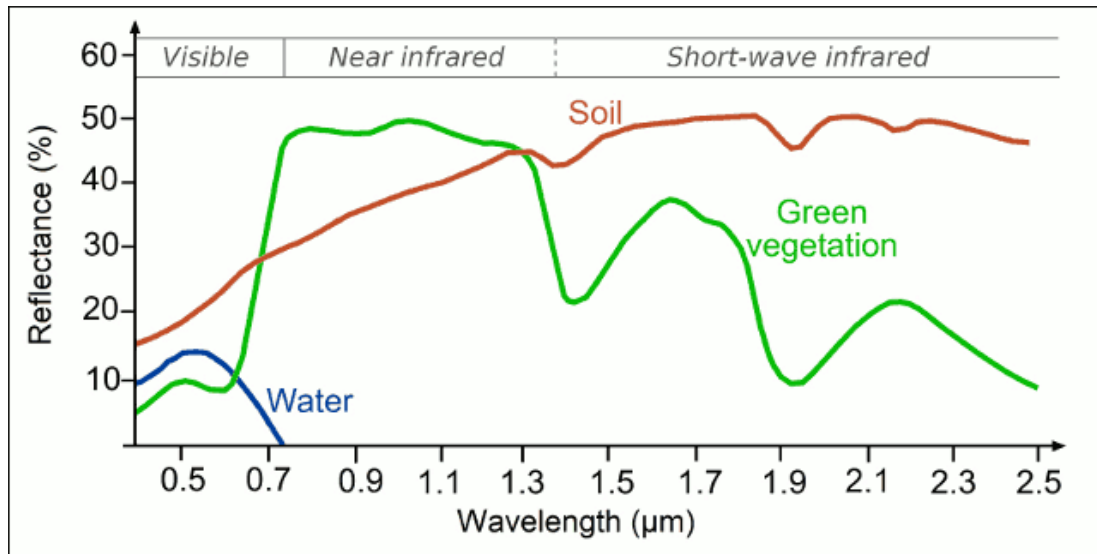


Figura 1-3: Firme spettrali di vegetazione verde, acqua e suolo a confronto. Fonte: <https://www.alspergis.altervista.org/lezione/05.html>

I dati telerilevati possono essere acquisiti mediante sensori attivi o passivi.

I sensori passivi sfruttano la radiazione emessa dal sole che va a colpire gli oggetti e l'energia riflessa viene catturata dal sensore; quelli attivi fungono sia da generatori di radiazione elettromagnetica, che da ricevitori (Figura 1-4).

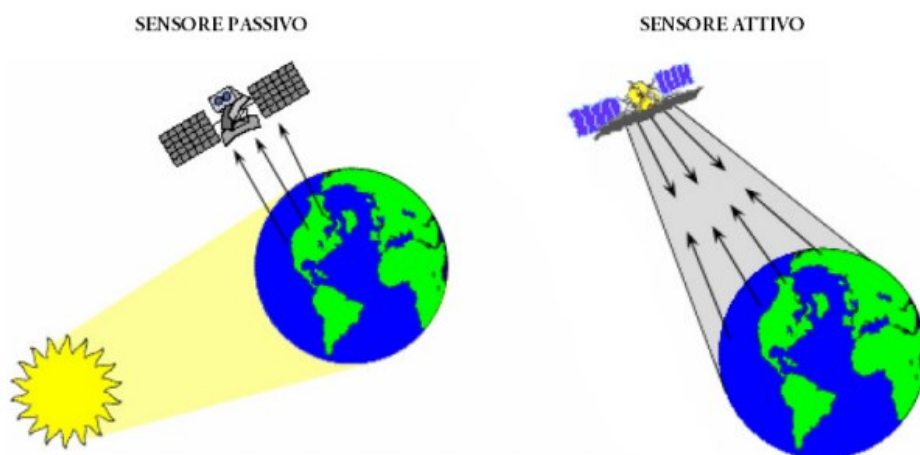


Figura 1-4: Sensori attivi e passivi. Fonte: <https://www.ruralhack.org/telerilevamenti-per-il-monitoraggio-delle-colture/>

I sensori possono inoltre essere classificati come multispettrali e iperspettrali: i primi registrano informazioni su un numero limitato di bande, generalmente tra tre e dieci, spesso ampie e non sempre contigue; i secondi invece riescono a registrare in centinaia di bande, di solito caratterizzate da stretti intervalli di lunghezze d'onda. Quest'ultimi sono utili per analisi più specifiche e dettagliate.

I sensori si caratterizzano per la loro risoluzione, che è di quattro tipi:

1. Risoluzione spaziale o geometrica: si riferisce all'area del suolo corrispondente alla dimensione del *pixel*;
2. Risoluzione spettrale: corrisponde al numero di bande spettrali a cui è sensibile lo strumento;
3. Risoluzione radiometrica: esprime i toni di grigio impiegati per rappresentare i dati raccolti dal sensore. È espressa in bit: maggiore è il numero di bit, maggiori saranno i toni di grigio registrati;
4. Risoluzione temporale: definita come la quantità di tempo che intercorre tra due riprese successive della stessa area (Fabbri, 2009).

Tra i sensori di telerilevamento attivo assume particolare importanza il LiDAR (Light Detection and Ranging), che si basa sulla capacità di emettere impulsi di luce laser, che vengono riflessi dagli oggetti per poi tornare al sensore. Quello che si ottiene è una nuvola di punti 3D, che rappresenta la superficie da cui sono stati riflessi gli impulsi (Lausch et al., 2017).

Una caratteristica distintiva di questa tecnologia è la sua versatilità, potendo essere installata su varie piattaforme.

I dati ottenibili da satelliti con sensori Lidar, permettono di ottenere dati dettagliati su aree molto ampie, contribuendo a migliorare la gestione delle foreste (Rosette et al., 2011). Uno tra i più importanti e utilizzati in ambito forestale è lo strumento GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation), un LiDAR installato sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS). Questa tecnologia è progettata per analizzare la struttura tridimensionale delle foreste, quindi per ottenere dati sull'altezza degli alberi, sulla struttura verticale e sulla quantità di biomassa (<https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/gedi-lidar>). GEDI è stato lanciato sulla ISS il 5 dicembre 2018, inizialmente con una prospettiva di missione di due anni, per poi estenderla due volte e tornare nell'aprile del 2024, dopo circa un anno di ibernazione (<https://gedi.umd.edu/mission/timeline/>).

È particolarmente utile per analisi su vastissima scala, come per la stima delle altezze della cima della chioma a livello globale (Lang et al., 2022), ma anche per la determinazione di altri parametri, come la biomassa fuori terra (Roda et al., 2021).

I sensori LiDAR possono essere montati anche su piattaforme aeree, per la delimitazione automatica delle aree forestali (Eysin et al., 2012), ma anche per la stima del DBH (Zhang et al., 2023), delle altezze e della biomassa fuori terra (Edson & Wing, 2011). In questa tipologia rientrano gli ALS (Airborne Laser Scanner), una tecnologia di scansione aerea per la caratterizzazione della struttura verticale e orizzontale di popolamenti forestali. Questa tecnologia consente di integrare o sostituire i dati di campo, riducendo la necessità di manodopera e migliorando l'efficienza nella raccolta dei dati su ampia scala (Goodboy et al., 2021). L'ALS offre infatti il vantaggio di poter coprire grandi aree con tempi ridotti, mostrando buoni risultati sull'analisi della distribuzione della chioma, ma richiedendo metodi più complessi per ricavare il DBH. (Arslan et al., 2022). Inoltre, gli impulsi ALS sono in grado di penetrare parzialmente la vegetazione, consentendo misurazioni sotto chioma (Toivonen et al., 2023).

Sensori LiDAR possono essere montati anche su dispositivi terrestri, per fornire informazioni di dettaglio.

Tra quest'ultimi distinguiamo i laser scanner statici (TLS) e i laser scanner mobili (MLS).

L'uso dei TLS (Terrestrial Laser Scanner) è stato introdotto all'inizio degli anni 2000 per l'estrazione di parametri forestali di base, come altezza e diametro degli alberi, e da tecnica sperimentale è diventata ora una tecnologia ampiamente utilizzata in questo campo (Calders et al., 2020).

I laser scanner statici vengono utilizzati per acquisire dati da una posizione fissa e possono essere impiegati in modalità di scansione singola o multipla. La scansione singola permette l'acquisizione di dati in maniera estremamente rapida, ideale se non è richiesto un elevato livello di accuratezza. Tuttavia, il limite principale di questo tipo di acquisizione è dato dall'occlusione dovuta al terreno e alla vegetazione, che può compromettere la qualità dei dati raccolti. In alternativa il laser scanner può essere usato in modalità di scansione multipla, catturando quindi la stessa area da diverse angolazioni. In questo modo si minimizzano le occlusioni e si ottiene una maggiore precisione dei dati, migliorando l'acquisizione dei parametri della vegetazione (Tian et al., 2021). La modalità di scansione multipla garantisce quindi una maggiore accuratezza nella stima delle caratteristiche biometriche degli alberi, anche se i tempi di acquisizione dei dati in questa modalità risultano essere maggiori rispetto alla modalità di scansione singola (Krok et al., 2020).

La scansione singola in foreste dense riesce a misurare solo circa il 70% degli alberi, anche se con accuratezza simile (Liang et al., 2016).

Stanno mostrando ultimamente la loro efficacia anche i laser scanner mobili (Liang et al., 2018). Quest'ultimi mostrano il vantaggio nel tempo di acquisizione dei dati e risultano quindi essere particolarmente adatti nel caso di aree molto ampie (Cabo et al., 2018).

I MLS (Mobile Laser Scanner) includono diverse tipologie, tra cui dispositivi montati su autoveicoli, oltre a quelli indossabili o portatili. Quest'ultimi, a differenza di quelli installati su autoveicoli, non sono limitati dalla presenza di strade forestali, rendendoli particolarmente utili in contesti non accessibili a questi mezzi (Bienert et al., 2018).

Studi in ambito forestale hanno confrontato l'accuratezza dei dati acquisiti mediante laser scanner statici e mobili. I TLS permettono di ottenere nuvole di punti più dense e accurate, ma hanno tempi di acquisizione più lunghi e sono quindi adatti per ricoprire aree di dimensioni ridotte. D'altro canto, i MLS, come già sottolineato, consentono una maggiore velocità di acquisizione dei dati, ma producono nuvole di punti più rumorose e sfocate. Nel complesso emerge comunque che i dati acquisiti tramite MLS forniscono buoni risultati per quanto riguarda la misurazione dei parametri forestali di base, ovvero DBH e TH. Questi risultati sono simili a quelli ottenuti mediante TLS, come evidenziato da studi recenti (Bienert et al., 2018; Vandendaele et al., 2022; Donager et al., 2021).

Una tipologia di MLS utilizzata nell'ambito della pianificazione forestale è il laser scanner portatile per raccogliere dati sui parametri dendrometrici, mostrandosi efficace, ma evidenziando alcune limitazioni legate alla complessità strutturale delle foreste e alla densità del sottobosco (Sofia et al., 2021).

1.5 Obiettivi e scopo della tesi

Nel contesto dei ripristini vegetazionali è fondamentale monitorare l'accrescimento delle specie nel tempo, sia in termini di altezza che di copertura vegetale, al fine di valutare il successo dei ripristini.

Questo permettere di valutare l'efficacia degli interventi effettuati ed evidenziare eventuali criticità al raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Alcuni studi si sono occupati di monitorare la crescita delle piante nel tempo (Guo et al., 2019) e l'aumento del diametro (Liang et al., 2012), anche mediante l'installazione di una stazione di TLS permanente e automatizzata, finalizzata a valutare l'accrescimento dei parametri forestali (DBH e TH) e della germinazione e crescita delle foglie con scansioni costanti e ripetute nel tempo (Campos et al., 2021).

Nel contesto dei ripristini vegetazionali risultano ancora poche le applicazioni di questa tecnologia e limitate a pochi casi pratici. Tuttavia, hanno mostrato il loro grande potenziale anche in tali contesti, attraverso la misurazione di alcuni parametri (TH, DBH, biomassa fuori terra) a livello di singolo albero (Camarretta et al., 2021), ma non sempre i dati ottenuti si sono mostrati sufficienti per una segmentazione automatica delle singole piante e una loro completa caratterizzazione. (Levick et al., 2021).

Emerge dunque che l'applicazione di questa tecnologia nei contesti di ripristino vegetazionale è ancora limitata a poche applicazioni pratiche e richiede ulteriori studi per migliorarne l'efficacia, ridurre la complessità operativa e renderla una metodologia efficace e pratica per il monitoraggio.

Con il presente lavoro di tesi si intende analizzare e valutare l'efficacia delle tecnologie basate sul LiDAR nell'ambito del monitoraggio dei ripristini vegetazionali, un settore dove l'innovazione tecnologica può giocare un ruolo cruciale.

Questi strumenti risultano particolarmente rilevanti nei progetti sottoposti a VIA, i quali richiedono, come previsto dai PMA, un monitoraggio costante di varie componenti/fattori ambientali, tra cui la componente vegetazionale.

Ciò è particolarmente rilevante nelle aree interessate dai lavori di scavo e nelle zone limitrofe, dove la vegetazione originaria è stata rimossa e successivamente sostituita con nuove piantumazioni.

I rilievi tradizionali risultano estremamente dispendiosi in termini di tempo e richiedono un notevole impiego di manodopera, soprattutto quando le aree da monitorare risultano essere particolarmente estese. Inoltre, un altro limite dal punto di vista pratico è etichettare in modo durevole e ben identificabile gli individui.

L'uso del LiDAR supera invece queste limitazioni, consentendo di raccogliere dati in tempi brevi e quindi di superfici maggiori, garantendo anche una maggiore oggettività dei risultati.

Il principale *output* dell'uso di questa tecnologia è una nuvola di punti (*point cloud*) dalla quale è possibile estrarre sia informazioni qualitative, come la struttura della vegetazione, sia quantitative, come l'altezza della vegetazione.

Nel presente lavoro, i rilievi sono stati ripetuti in più momenti temporali, rendendo possibile un confronto tra le nuvole di punti acquisite in tempi diversi. Questo approccio rende possibile valutare l'accrescimento delle piante, che è un segnale diretto della loro vitalità e quindi del successo del ripristino.

Capitolo 2

AREA DI STUDIO

2.1 Inquadramento territoriale

L'area di studio è situata nella provincia di Treviso, nella regione Veneto, e si colloca nel contesto del rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave – Salgareda e la relativa messa fuori esercizio degli impianti esistenti (Figura 2-1).



Figura 2-1: Localizzazione dell'area di studio

Per il rifacimento di questo metanodotto, dove possibile, viene privilegiato l'utilizzo del metanodotto già esistente, al fine di limitare i danni causati dall'attività di posa della nuova tubazione in nuove superfici.

Il tracciato del metanodotto si divide in due tratti:

- Il primo tratto si estende per 17,352 km, inizia nel comune di Vazzola e termina in quello di Salgareda;
- Il secondo tratto si estende per 19,119 km, inizia nel comune di Vazzola e termina in quello di Pieve di Soligo.

Di seguito viene riportato l'elenco dei 12 comuni attraversati dal metanodotto: Conegliano, Ponte di Piave, Refrontolo, Mareno di Piave, Susegana, San Polo di Piave, Santa Lucia di Piave, San Pietro di Feletto, Pieve di Soligo, Ormelle, Salgareda e Vazzola (<https://www.arpa.veneto.it/++api++/servizi/altri-servizi/grandi-opere/i-progetti/rifacimento-metanodotti-snam-pieve-di-soligo-san-polo-di-piave-salgareda>) (Figura 2-2).

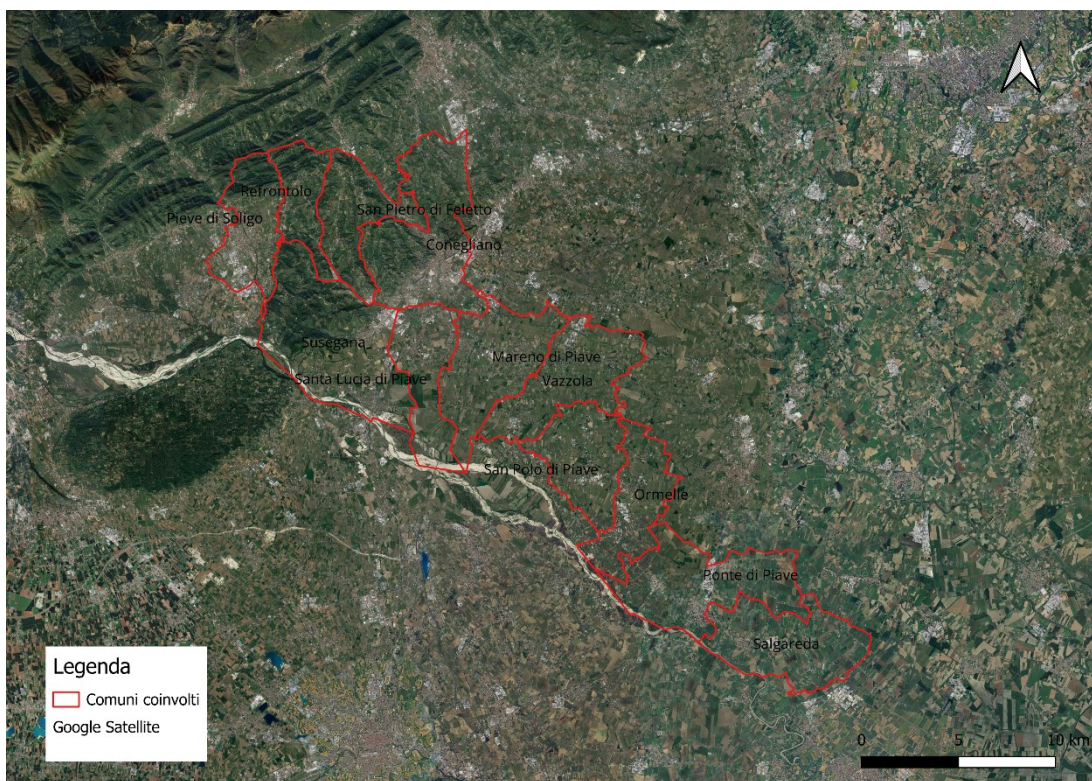


Figura 2-2: Comuni coinvolti nel rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave - Salgareda

Secondo le informazioni derivanti dal Progetto di ripristino vegetazionale del rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo - San Polo di Piave - Salgareda DN 300 (12") - DP 75 bar e opere connesse (Documento riservato di proprietà Snam Rete Gas), il primo tratto del metanodotto si sviluppa in un contesto di bassa e alta pianura. Il paesaggio di bassa pianura è caratterizzato prevalentemente da sistemi rurali. In questa zona, l'uso del suolo è dominato da coltivazioni agricole, con una marcata presenza di vigneti. Il paesaggio di alta pianura è

caratterizzato da coltivi di medie dimensioni alternati da vigneti di grande estensione. Inoltre, questo paesaggio si caratterizza per la presenza di numerosi corsi d'acqua.

Il secondo tratto si sviluppa in un contesto di alta pianura e di collina. Nell'area collinare, la vegetazione è costituita da estese coperture boschive che rivestono i versanti, variando nella composizione floristica a seconda dell'esposizione. Sui versanti settentrionali prevalgono *ostryo-querceti* e *castagneti*, spesso accompagnati dalla presenza della *Robinia pseudoacacia*. Nei versanti meridionali dominano invece *orno-ostrieti* e *robinieti misti*.

Per quanto riguarda i coltivi si caratterizzano per la presenza principale di vigneti (Snam Rete Gas, 2022a).

2.2 Siti Natura 2000

La Rete Natura 2000 è una rete ecologica presente in tutto il territorio dell'Unione Europea finalizzata alla conservazione della biodiversità. È costituita da Siti di Interesse Comunitario (SIC), successivamente designati come Zone Speciali di Conservazione (ZSC), istituite ai sensi della Direttiva 92/43/CEE "Habitat", e Zone di Protezione Speciale (ZPS), istituite ai sensi della Direttiva 2009/147/CE "Uccelli". In Italia, SIC, ZSC e ZPS coprono circa il 19% del territorio terrestre e oltre il 6% di quello marino (<https://www.mase.gov.it/pagina/rete-natura-2000>).

La Direttiva Habitat (92/43/CEE) nasce con lo scopo di "salvaguardare la biodiversità mediante la conservazione degli habitat naturali, nonché della flora e della fauna selvatiche nel territorio europeo degli Stati membri al quale si applica il trattato" (art 2). Nell'Allegato I della Direttiva vengono elencati gli habitat naturali di interesse comunitario la cui conservazione richiede la designazione di aree speciali di conservazione, negli Allegati II, IV e V sono indicate le specie animali e vegetali di interesse comunitario: l'Allegato II elenca quelle la cui tutela necessita di aree speciali di conservazione, l'Allegato IV identifica le specie che richiedono una protezione rigorosa e l'Allegato V include le specie il cui prelievo o sfruttamento è soggetto a misure di gestione.

La Direttiva Uccelli (2009/147/CE) è una normativa adottata per la protezione degli uccelli selvatici, dei loro habitat e delle specie migratorie nel territorio europeo.

L'obiettivo principale è garantire la conservazione di tutte le specie di uccelli presenti negli Stati membri, proteggendoli dalla caccia e dalla distruzione degli habitat essenziali per la loro sopravvivenza.

Per ciascun sito Natura 2000 esiste un formulario specifico, nel quale sono riportate informazioni sull'identificazione, la localizzazione e la descrizione del sito, informazioni ecologiche sui tipi di habitat e sulle specie e stato di protezione e informazioni sulla gestione.

Le stazioni di monitoraggio del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave – Salgareda VED01SP, VED02SP, VED03SP, VEP04RE e VEP05RE ricadono nella Zona Speciale di Conservazione (ZSC) IT3240029 “Ambito fluviale del Livenza e corso inferiore del Monticano”, disegnata con DM 28/07/2018 del MATTM, come indicato nell'Allegato 1 (Monitoraggio Habitat) del Piano di Monitoraggio Ambientale. Nel dettaglio tali stazioni sono posizionate lungo il corso del torrente Crevada che risulta completamente compreso all'interno della ZSC (Snam, 2020a).

Secondo le informazioni del formulario standard, la ZSC sopra citata si estende per un'area complessiva di 1955 ettari. Il sito inoltre ricade nella regione biogeografica Continentale, con quote comprese tra i 4 e i 150 m e quota media sui 18 m s.l.m. Caratteristici del sito sono i corpi d'acqua interni (acque stagnanti e correnti), che ricoprono l'85% della superficie del sito, seguiti da torbiere, stagni, paludi e vegetazione di cinto (8%).

All'interno della ZSC IT3240029 è stata indicata la presenza di 9 specie di uccelli elencati nell'Allegato I della Direttiva 2009/147/CE “Uccelli” (*Circus aeruginosus*, *Porzana porzana*, *Chlidonias niger*, *Tringa glareola*, *Nycticorax nycticorax*, *Ixobrychus minutus*, *Crex crex*, *Alcedo atthis* e *Lanius collurio*) e 2 non elencati nell'allegato I (*Anas platyrhynchos* e *Picus viridis*). Per quanto riguarda le specie dell'Allegato II della Direttiva 92/43/CEE “Habitat” nella ZSC è stata indicata la presenza di 2 specie di anfibi (*Bombina variegata* e *Rana latastei*) e 4 specie di pesci (*Lethenteron zanandreae*, *Salmo marmoratus*, *Alosa fallax* e *Sabanejewia larvata*).

Riguardo gli habitat dell'allegato I della Direttiva 92/43/CEE secondo l'ultimo aggiornamento disponibile dal formulario standard è indicata la presenza dei seguenti 3 habitat:

- 3260 “Fiumi delle pianure e montani con vegetazione del *Ranunculion fluitantis* e *Callitricho-Batrachion*”.
- 6430 “Bordure planiziali, montane e alpine di megaforbie idrofile”
- 91E0* “Foreste alluvionali di *Alnus glutinosa* e *Fraxinus excelsior* (*Alno-Padion*, *Alnion incanae*, *Salicion albae*)”.

Nella Tabella 2-1 viene riportata la copertura percentuale dei tre habitat (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, 2023).

Tabella 2-1: Habitat presenti nella ZSC IT3240029

Codice habitat	Descrizione dell'habitat	Prioritario	Copertura (%)
3260	Fiumi delle pianure e montani con vegetazione del <i>Ranunculion fluitantis</i> e <i>Callitricho-Batrachion</i>	No	10
6430	Bordure planiziali, montane e alpine di megaforbie idrofile	No	6
91E0	Foreste alluvionali di <i>Alnus glutinosa</i> e <i>Fraxinus excelsior</i> (<i>Alno-Padion</i> , <i>Alnion incanae</i> , <i>Salicion albae</i>)	Sì	10



Figura 2-3: stazioni di monitoraggio ricadenti nella ZSC IT3240029

Nelle stazioni di monitoraggio sopra indicate non è stato individuato nessuno dei tre habitat. Tuttavia nelle stazioni VEP05RE e VED02SP sono state riscontrate analogie con i boschi ripariali che si sviluppano lungo fiumi, torrenti dell'Italia settentrionale riferibili all'habitat 91E0* "Foreste alluvionali di *Alnus glutinosa* e *Fraxinus excelsior* (*Alno-Padion*, *Alnion*

incanae, *Salicion albae*)”. In questi contesti, però, risultano fortemente degradati, in particolare nella la stazione VEP05RE dove è stata osservata una netta dominanza di *Robinia pseudoacacia* (specie aliena invasiva). Di conseguenza, la presenza dell’habitat 91E0*, non può essere considerata giustificata

Nella stazione VEP01PO, situata nel comune di San Polo di Piave, è stata rilevata la presenza di una comunità acquatica riconducibile all’habitat 3260 “Fiumi delle pianure e montani con vegetazione del *Ranunculon fluitantis* e *Callitricho-Batrachion*”, nonostante essa non ricada all’interno della Zona Speciale di Conservazione IT3240029.

Analogamente, nella stazione di monitoraggio VED04PP, situata nel comune di Ponte di Piave e anch’essa esterna alla Zona Speciale di Conservazione IT3240029, è stata riscontrata la presenza di una comunità acquatica nel corso d’acqua. Sebbene gli argini del canale siano caratterizzati esclusivamente da uno strato erbaceo, il corso d’acqua ospita specie quali *Stuckenia pectinata*, *Myosotis scorpioides* e *Berula erecta*, tipiche dell’alleanza *Batrachion fluitantis*. Anche in questo caso si tratta di una comunità riconducibile all’habitat 3260 “Fiumi delle pianure e montani con vegetazione del *Ranunculon fluitantis* e *Callitricho-Batrachion*”, (Snam, 2020a).



Figura 2-4: stazioni di monitoraggio con habitat 3260 “Fiumi delle pianure e montani con vegetazione del *Ranunculon fluitantis* e *Callitricho-Batrachion*”

2.3 Descrizione delle tecniche di ripristino vegetazionale utilizzate nell'area di studio

L'area coinvolta nel rifacimento del metanodotto è stata sottoposta a interventi di ripristino vegetazionale, con l'obiettivo di riportare la copertura vegetazionale alle condizioni antecedenti l'inizio dei lavori.

Nel progetto di ripristino vegetazionale: Rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave – Salgareda DN 300 (12") - DP 75 bar e opere connesse e nell'Allegato 3: Specifiche Tecniche (Documenti riservati di proprietà Snam Rete Gas), sono descritte dettagliatamente le tecniche di ripristino vegetazionale adottate per le varie aree, di cui si presenta di seguito una sintesi.

Prima di poter attuare i vari interventi di ripristino vegetazionale, come inerbimenti e rimboschimenti, è fondamentale cercare di preservare la stratificazione originaria del suolo.

La prima fase consiste nella rimozione e nell'accantonamento dello strato più superficiale del suolo, ovvero quello interessato dalla presenza di radici, in quanto risulta essere ricco di sostanza organica ed elementi nutritivi. Successivamente lo scavo prosegue fino alla profondità richiesta per la messa in posa della condotta e il materiale di risulta viene accantonato separatamente, cercando di mantenere la stratificazione originaria degli strati.

Nei versanti in pendenza sarà necessario adottare tecniche di ingegneria naturalistica per migliorarne la stabilità.

La superficie totale interessata da ripristini vegetazionali si estende per 97.899 m² e nella Figura 2-5 viene riportata la distribuzione percentuale, sulla base della superficie interessata, delle varie tipologie di ripristino vegetazionale (Snam Rete Gas, 2022a).

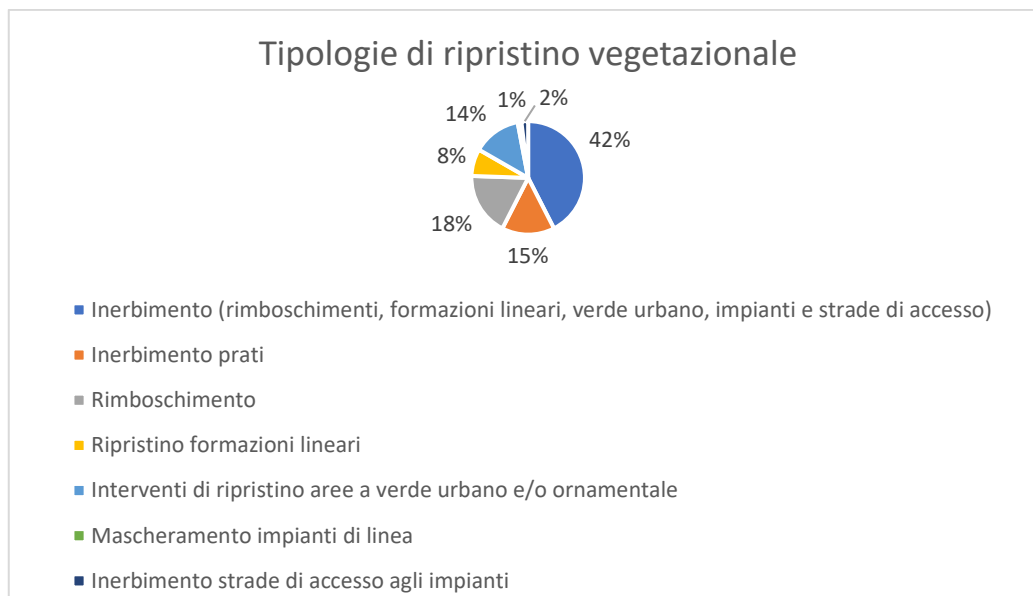


Figura 2-5: Distribuzione percentuale delle superfici di ripristino interessate da diverse tipologie di ripristino vegetazionale

Di seguito verranno descritte le varie tecniche di ripristino vegetazionale attuate nelle diverse aree e le cure colturali previste, con le informazioni derivanti dal progetto di ripristino vegetazionale: Rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave – Salgareda DN 300 (12") - DP 75 bar e opere connesse, e dall'Allegato 3: Specifiche Tecniche (Documenti riservati di proprietà Snam Rete Gas).

2.3.1 Inerbimenti

Con il termine inerbimento si intende il ripristino della copertura erbacea.

L'inerbimento di fasce boscate o cenosi con copertura arborea e arbustiva, aree a verde urbano e/o ornamentale e di aree di mascheramento degli impianti, comprende una superficie complessiva di 41.593 m². L'inerbimento può essere eseguito in due modalità:

1. Semina idraulica o idrosemina: questa tecnica prevede lo spargimento meccanico di una miscela composta da semi, acqua e altri componenti quali concimi (chimici e organici) e collanti, che garantiscono una maggiore aderenza al terreno. Questa tipologia di semina garantisce omogeneità su tutta la superficie interessata;
2. Semina a mano: eseguita dove l'idrosemina non è possibile. Consiste nello spargimento manuale dei materiali per l'inerbimento.

Le specie selezionate sono quelle compatibili con le caratteristiche del territorio, che garantiscono una rapida copertura e favoriscono la ricolonizzazione della flora autoctona.

L'inerbimento di prati comprende invece una superficie di 14.713 m² e viene eseguito mediante idrosemina con fiorume locale derivante da sfalcio di piante erbacee (successivamente sottoposte a essiccazione naturale) e integrato, se necessario, con fiorume commerciale. Anche in questo caso alla miscela vengono aggiunti concimi (chimici e organici) e sostanze collanti. Nel caso in cui non ci sia possibilità di reperimento del fiorume, si andranno a utilizzare semi di specie autoctone.

I semi delle specie erbacee devono essere semi di ottima qualità e delle specie indicate negli allegati del progetto. Devono essere contenuti nelle loro confezioni originali, che devono essere sigillate, e deve essere indicata la data di scadenza. Devono inoltre essere muniti di certificato di identità e autenticità e deve essere indicato il grado di purezza e di germinabilità.

I semi delle specie arboree e arbustive possono essere di prima categoria (ovvero provenienti da arboreti da seme) o di seconda categoria (provenienti da boschi classificati da seme). Tali caratteristiche sono valide anche per i semi utilizzati nei rimboschimenti.

Tutti i semi devono avere la certificazione E.N.S.E. – Italia (Ente Nazionale Sementi Elette) (Snam Rete Gas, 2022a ; Snam Rete Gas, 2018).

2.3.2 Rimboschimenti

I rimboschimenti hanno interessato una superficie complessiva di 17.661 m², di cui 2.776 m² (pari al 15,72%) sono sottoposti a monitoraggio. Questa percentuale supera il requisito minimo previsto dall'ARPAV, che richiedeva il monitoraggio di almeno il 10% delle superfici soggette a rimboschimento.

A seguito dello sfalcio della vegetazione, sono stati messi a dimora i seguenti elementi:

- Semi: in solchetti (3 semi ogni 1,5 metri) e/o in buche (almeno 3 semi per ogni buca). In entrambi i casi, i semi vengono ricoperti con uno strato di terra. In alternativa si procede con la semina a spaglio, cercando di distribuire i semi in maniera omogenea sul terreno.
- Piante forestali e talee radicate: in buche di dimensioni 0,40 x 0,40 x 0,40 metri oppure in buche scavate a colpo di zappa.
- Talee: interrate per un quarto della loro lunghezza, con l'orientamento nel verso di crescita.
- Piante rampicanti, arboree e arbustive adulte: devono essere fornite in zolla o contenitore e messe all'interno di buche di dimensioni almeno doppie del pane di terra.

Per la messa a dimora delle piante, è importante seguire alcune regole fondamentali, come evitare di interrare il colletto, ricoprire attentamente tutte le radici e verificare che non ci siano

vuoti tra le radici, il pane di terra e la buca. Inoltre, le piante dovrebbero provenire da vivai situati nelle vicinanze del cantiere.

Viene eseguita anche posa di pacciamatura, realizzata con diversi materiali.

Nei rimboschimenti a piantagione diffusa viene utilizzato un sesto d'impianto di 1,5 x 2 m e le piantine utilizzate hanno un'altezza compresa tra i 60 e gli 80 cm. (Snam Rete Gas, 2022a; Snam Rete Gas, 2018).

2.3.3 Interventi di ripristino a aree a verde urbano e/o ornamentale

Gli interventi di ripristino nelle aree a verde urbano e/o ornamentale interessano una superficie di 13.436 m². In questo caso, vengono reintrodotti le stesse specie presenti prima dell'inizio dei lavori, utilizzando piante già adulte con un'altezza compresa tra 1,25 e 1,50 m, mantenendo lo stesso sesto d'impianto originale. Per proteggere le nuove piante viene installata una rete "anticinghiale" (Snam Rete Gas, 2022a).

2.3.4 Ripristino di formazioni lineari (filari e fasce)

Gli interventi di ripristino di filari e fasce ricoprono una superficie di 7.573 m². Vengono piantate specie arboree e arbustive corrispondenti a quelle presenti prima dei lavori. Le piante devono avere un'altezza compresa tra i 60 e gli 80 cm; il sesto d'impianto per i filari è di 1,5 x 1,5 m lungo la fila, mentre per le fasce è di 1,5 x 2 m. A protezione delle piante vengono posizionate delle reti "anticinghiale" (Snam Rete Gas, 2022a).

2.3.5 Mascheramento impianti di linea e strade di accesso

Il mascheramento degli impianti si estende complessivamente su di una superficie di 1.050 m². Le specie utilizzate in questo contesto sono specie arboree e arbustive autoctone, che si adattano al meglio alle condizioni dell'area. Le piante messe a dimora devono avere un'altezza compresa tra i 60 e gli 80 cm e vengono disposte secondo un sesto d'impianto di 1,5 x 1,5 m. È fondamentale l'uso di protezioni individuali, costituite da reti in plastica.

Contestualmente è previsto l'inerbimento delle strade di accesso agli impianti, che coprono una superficie di 1.873 m² (Snam Rete Gas, 2022a).

2.3.6 Cure colturali

Per tutte le tipologie di ripristino deve essere eseguita un'irrigazione al momento dell'impianto e un'irrigazione di soccorso, nel caso le piante si trovino in condizioni di elevato stress idrico.

Inoltre, attraverso una concimazione organica e minerale, vanno reintegrati nel terreno tutti quegli elementi nutritivi che la pianta ha assorbito durante la sua crescita.

Nei successivi 5 anni dai ripristini, per tutte le tipologie descritte, devono inoltre essere eseguite le cure colturali necessarie, due volte all'anno, oltre alla sostituzione delle piante che non hanno attecchito. È necessario effettuare lo sfalcio attorno al fusto della pianta, soprattutto nel caso di vegetazione particolarmente aggressiva, ed eseguire la potatura delle piantine.

Inoltre, per favorire gli scambi gassosi e aumentare la permeabilità deve essere eseguita la zappatura del terreno per circa 50 cm di diametro dal fusto (Snam Rete Gas, 2022a).

2.4 Piante previste per il ripristino vegetazionale e il mascheramento degli impianti

Come previsto dal progetto di ripristino vegetazionale del rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave -Salgareda DN 300 (12") - DP 75 bar e opere connesse, in particolare nell'allegato 2: Elenco piante arboree ed arbustive previste per il ripristino vegetazionale e il mascheramento degli impianti (Documento riservato di proprietà Snam Rete Gas), si stima un totale di 8.297 tra alberi e arbusti da utilizzare per i ripristini, di cui un 97% con un'altezza compresa tra i 60 e gli 80 cm, mentre il restante 3% tra 1.25 e 1.50 m.

Di seguito vengono indicate le specie utilizzate per i ripristini (Tabella 2-2) (Snam Rete Gas, 2022b).

Tabella 2-2: Elenco specie utilizzate nei ripristini

Specie	Numero
<i>Acer campestre</i>	1031
<i>Acer pseudoplatanus</i>	222
<i>Alnus glutinosa</i>	318
<i>Berberis vulgaris</i>	499
<i>Carpinus alba</i>	179
<i>Castanea sativa</i>	143
<i>Cercis siliquastrum</i>	44
<i>Cornus mas</i>	1063

<i>Cornus sanguinea</i>	740
<i>Corylus avellana</i>	120
<i>Crataegus monogyna</i>	428
<i>Cupressus sempervirens</i>	6
<i>Euonymus europeas</i>	121
<i>Fraxinus excelsior</i>	80
<i>Fraxinus ornus</i>	313
<i>Juglans regia</i>	141
<i>Ligustrum vulgare</i>	4
<i>Ostrya carpinifolia</i>	90
<i>Platanus hybrida</i>	17
<i>Populus alba</i>	475
<i>Populus nigra</i>	2
<i>Populus tremula</i>	179
<i>Prunus avium</i>	214
<i>Prunus cerasifera</i>	3
<i>Quercus petrea</i>	40
<i>Quercus pubescens</i>	206
<i>Quercus robur</i>	158
<i>Salix alba</i>	454
<i>Sorbus aria</i>	38
<i>Sorbus torminalis</i>	125

<i>Tilia cordata</i>	106
<i>Ulmus minor</i>	551
<i>Viburnum lantana</i>	187

2.5 Stazioni di monitoraggio

Le stazioni di monitoraggio oggetto del presente studio sono quattro: VEP07RE, VEP06RE, VEP05RE e VED03SP. Di seguito viene riportata una sintesi della situazione ante-opera, come descritta nel Piano di Monitoraggio Ambientale del Rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave – Salgareda DN 300 (12") - DP 75 bar e opere connesse, in particolare nell'allegato 2: monitoraggio flora e vegetazione (Documento riservato di proprietà Snam Rete Gas) (Snam Rete Gas, 2020a).

2.5.1 Stazione di monitoraggio VEP07RE

La stazione di monitoraggio VEP07RE è situata nel comune di Refrontolo (TV), ad un'altitudine di 154 m s.l.m.

Il contesto ambientale è caratterizzato principalmente da terreni agricoli dominati da vigneti, mentre nei terreni più acclivi sono presenti aree boschive, dove nello strato arboreo domina la *Robinia pseudoacacia*, accompagnata da altre latifoglie come *Carpinus betulus* e *Corylus avellana* (Snam Rete Gas, 2020a).

2.5.2 Stazione di monitoraggio VEP06RE

La stazione di monitoraggio VEP06RE è situata nel comune di Refrontolo (TV), ad un'altitudine di 166 m s.l.m.

Il contesto ambientale è caratterizzato principalmente da terreni agricoli dominati da vigneti, mentre nei terreni più acclivi sono presenti aree boschive, dove nello strato arboreo domina la *Robinia pseudoacacia*, accompagnata da altre latifoglie come *Corylus avellana*, *Quercus robur* e *Fraxinus ornus* (Snam Rete Gas, 2020a).

2.5.3 Stazione di monitoraggio VEP05RE

La stazione di monitoraggio VEP05RE è situata nel comune di Refrontolo (TV), ad un'altitudine di 111 m s.l.m.

Il contesto ambientale è caratterizzato principalmente da terreni agricoli dominati da vigneti, mentre nei versanti della vallata sono presenti aree boschive, dove nello strato arboreo domina la *Robinia pseudoacacia*, accompagnata da altre latifoglie come *Corylus avellana*, *Alnus glutinosa* e *Acer campestre*.

Tale stazione di monitoraggio ricade nella ZCS IT3240029 “Ambito fluviale del Livenza e corso inferiore del Monticano” (Snam Rete Gas, 2020a).

2.5.4 Stazione di monitoraggio VED03SP

La stazione di monitoraggio VED03SP è situata nel comune di San Pietro di Feletto (TV), ad un’altitudine di 98 m s.l.m.

Il contesto ambientale è caratterizzato principalmente da terreni agricoli dominati da vigneti, mentre nei terreni più acclivi sono presenti aree boschive antropogene, dove nello strato arboreo domina la *Robinia pseudoacacia*, accompagnata da altre latifoglie come *Fagus sylvatica* e *Corylus avellana*.

Tale stazione di monitoraggio ricade nella ZCS IT3240029 “Ambito fluviale del Livenza e corso inferiore del Monticano” (Snam Rete Gas, 2020a).

Capitolo 3

MATERIALI E METODI

3.1 Laser scanner

Il laser scanner è uno strumento utilizzato per creare modelli digitali dettagliati di oggetti e/o di aree territoriali (Bornaz, 2006). Il laser (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*) nasce da un'intuizione di Albert Einstein nel 1917, quando ipotizzò che fosse possibile indurre un atomo a emettere una radiazione di una certa frequenza andando a stimolarlo con una radiazione dello stesso tipo (Bartolucci, 2009). Il primo dispositivo laser fu poi brevettato nel 1958 dai fisici statunitensi Arthur Townes e Charles Schawlow.

Il laser trasforma l'energia da una fonte primaria in un fascio di radiazione elettromagnetica (Bornaz, 2006).

La luce laser deve avere tre caratteristiche fondamentali:

- Unidirezionalità: la luce laser emessa è altamente direzionale, ovvero si propaga in una direzione ben definita a grande distanza;
- Monocromaticità: la luce laser è caratterizzata da onde della stessa frequenza;
- Coerenza: la luce laser è coerente, ovvero le onde (della stessa frequenza) si sommano dando origine a un fascio di luce ad alta intensità e potenza (Bartolucci, 2009).

Il principio di funzionamento del laser scanner si basa sull'emissione di impulsi di luce laser che colpiscono un oggetto e vengono riflessi verso il sensore. Misurando il diverso tempo di ritorno di questi impulsi, è possibile calcolare la distanza tra lo strumento e l'oggetto in esame, consentendo così la discriminazione automatica di tutto ciò che si trova sopra il terreno (Rinaudo, 2009).

Un'informazione cruciale registrata dal laser scanner è la luminanza, ossia la quantità di segnale laser che torna allo strumento, che dipende da alcune caratteristiche degli oggetti come il tipo di materiale, la porosità, l'umidità e il colore.

Il risultato di questi dati è una nuvola di punti (*point cloud*), con migliaia di punti acquisiti al secondo, per ognuno dei quali sono note le coordinate x, y e z (Bartolucci, 2009).

Poiché nella presente tesi è stato utilizzato un sistema MLS, viene fornita una descrizione più dettagliata di questa tecnologia.

I sistemi Mobile Laser Scanner (MLS) permettono di acquisire dati con una precisione centimetrica e una risoluzione che dipende dalla velocità di acquisizione e dalla distanza degli oggetti rilevati.

I MLS possono essere classificati in base al metodo di trasporto:

- *Human-based*: sistemi trasportati dagli operatori, tra cui:
 - PLS (*Personal/Portable Laser Scanner*): dispositivi portati manualmente.
 - WLS (*Wearable Laser Scanner*): dispositivi indossati dall'operatore.
- *Wheel-based*: montati su carrelli, biciclette o veicoli.
- *Boat-based*: installati su imbarcazioni.
- *Sledge-based*: trasportati da slitte.

Un MLS si localizza grazie a un ricevitore GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e a un'unità IMU (*Inertial Measurement Unit*). Inoltre, è disponibile la tecnologia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), che permette di mappare l'ambiente e individuare simultaneamente la posizione dello strumento, a condizione che la traiettoria segua un percorso chiuso.

È possibile combinare il sistema GNSS/IMU con la tecnologia SLAM, migliorando ulteriormente le capacità di localizzazione e mappatura (Di Stefano et al., 2021).

Per i rilievi dei ripristini vegetazionali in corrispondenza del metanodotto Pieve di Soligo - San Polo di Piave – Salgareda è stato utilizzato il laser scanner OrbisTM di FARO (Figura 3-1), le cui informazioni tecniche sono tratte dalla scheda tecnica del dispositivo.

Il dispositivo è un laser scanner mobile *all-in-one* progettato per combinare scansioni stazionarie e mobili in un unico dispositivo, migliorando l'efficienza e la precisione nel rilievo tridimensionale.

Grazie all'integrazione della tecnologia SLAM questo strumento consente di acquisire dati 3D ad alta velocità e con elevata accuratezza, anche in ambienti complessi o in movimento.

Quando il dispositivo è in modalità mobile la tecnologia SLAM consente di creare una mappa dell'ambiente circostante, mentre in modalità stazionaria il sistema utilizza la tecnologia Flash

Technology™, con scansioni di circa 15 secondi. Inoltre, la scansione laser è integrata anche da un sistema di acquisizione fotografica permettendo la rappresentazione anche a colori dell'ambiente rilevato, facilitando l'interpretazione dei dati.

Lo scanner ha un raggio di misurazione fino a 120 metri, garantendo una precisione di 5 mm per scansioni dinamiche e di 2 mm per quelle statiche.

Inoltre, è possibile connetterlo tramite Wi-Fi all'applicazione *FARO Stream* per smartphone, che permette di visualizzare le scansioni in tempo reale direttamente sul dispositivo.

I dati acquisiti possono essere scaricati in modo rapido e semplice collegando una chiavetta USB allo strumento, rendendo il processo di raccolta e trasferimento delle informazioni altamente efficiente.



Figura 3-1: Laser scanner Orbis™ di FARO

3.2 Acquisizione dati in campo

La prima operazione eseguita è stata l'acquisizione dei dati in campo mediante mobile laser scanner. Con lo strumento in mano è stato seguito un percorso a serpentina nelle 4 stazioni di monitoraggio, di durata variabile a seconda dell'estensione dei ripristini:

- VED03SP (Figura 3-2): 3 minuti circa
- VEP05RE (Figura 3-3): 9 minuti circa
- VEP06RE (Figura 3-4): 11 minuti circa
- VEP07RE (Figura 3-5): 12 minuti circa



Figura 3-2: Stazione di monitoraggio VED03SP



Figura 3-3: Stazione di monitoraggio VEP05RE



Figura 3-4: Stazione di monitoraggio VEP06RE



Figura 3-5: Stazione di monitoraggio VEP07RE

Il tempo di percorrenza è stato influenzato principalmente dall'estensione dell'area percorsa, ma anche dalla pendenza del terreno, che aumentava la difficoltà del movimento a piedi con lo strumento.

Tabella 3-1: Estensione delle aree soggette a rilievo da laser scanner

	Area (m2)
VEP03SP	75
VEP05RE	340
VEP06RE	1070
VEP07RE	820

Nelle stazioni VED03SP e VED05RE, le aree soggette a rilievo mediante laser scanner sono pianeggianti, mentre per le stazioni VED06RE e VED07RE la pendenza è moderata.

Le stazioni di monitoraggio sono state individuate in campo grazie ai file KMZ, che possono essere aperti direttamente sullo smartphone tramite l'applicazione Google Earth.



Figura 3-6: Localizzazione della stazione VED03SP. Il poligono arancione rappresenta l'area oggetto di verifica dei ripristini, mentre quello giallo l'area di rilevamento di controllo. La linea rossa rappresenta il 2° tratto del metanodotto in progetto, mentre quella verde il metanodotto in rimozione.

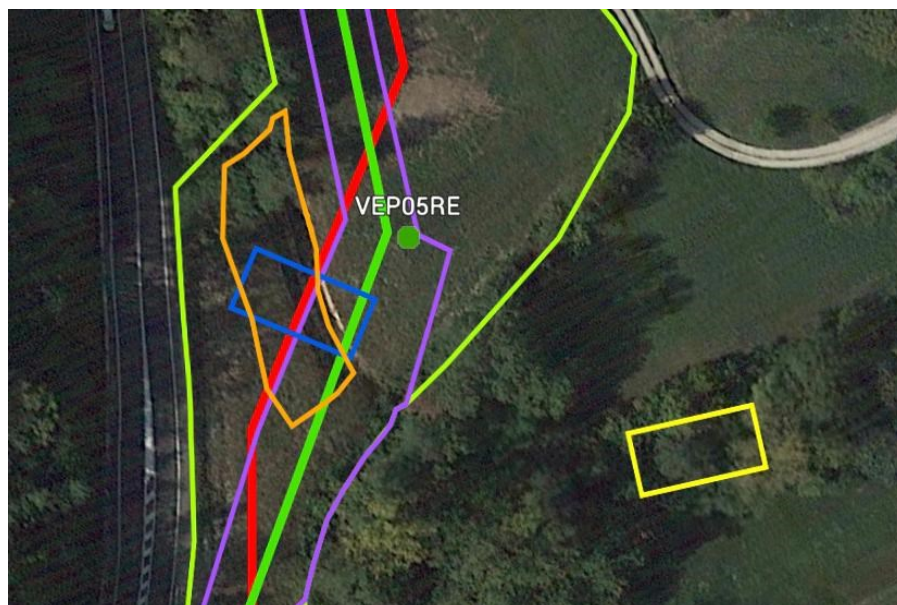


Figura 3-7: Localizzazione della stazione VEP05RE. Il poligono arancione rappresenta l'area oggetto di verifica dei ripristini, mentre quello giallo l'area di rilevamento di controllo. La linea rossa rappresenta il 2° tratto del metanodotto in progetto, mentre quella verde il metanodotto in rimozione.



Figura 3-8: Localizzazione della stazione VEP06RE. Il poligono arancione rappresenta l'area oggetto di verifica dei ripristini, mentre quello giallo l'area di rilevamento di controllo. La linea rossa rappresenta il 2° tratto del metanodotto in progetto, mentre quella verde il metanodotto in rimozione.



Figura 3-9: Localizzazione della stazione VEP07RE. Il poligono arancione rappresenta l'area oggetto di verifica dei ripristini, mentre quello giallo l'area di rilevamento di controllo. La linea rossa rappresenta il 2° tratto del metanodotto in progetto, mentre quella verde il metanodotto in rimozione.

Il percorso eseguito è di tipo *loope closure*, ovvero il punto di partenza e di chiusura del percorso devono coincidere.

Durante la scansione lo strumento è stato connesso tramite Wi-Fi allo smartphone, dal quale è stato possibile visualizzare il percorso compiuto con lo strumento in mano.

Per alcune stazioni di monitoraggio sono state eseguite più scansioni separate per coprire l'intera area, poiché la scansione è stata interrotta in corrispondenza di ostacoli come scalini o fossati, il cui passaggio avrebbe potuto compromettere l'orientamento dello strumento, rendendo impossibile una mappatura accurata della zona.



Figura 3-10: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VED03SP. La linea blu rappresenta il percorso.



Figura 3-11: visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP05RE (scansione 1). La linea blu rappresenta il percorso



Figura 3-12: visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP05RE (scansione 2). La linea blu rappresenta il percorso



Figura 3-13: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP05RE (scansione 3). La linea blu rappresenta il percorso.

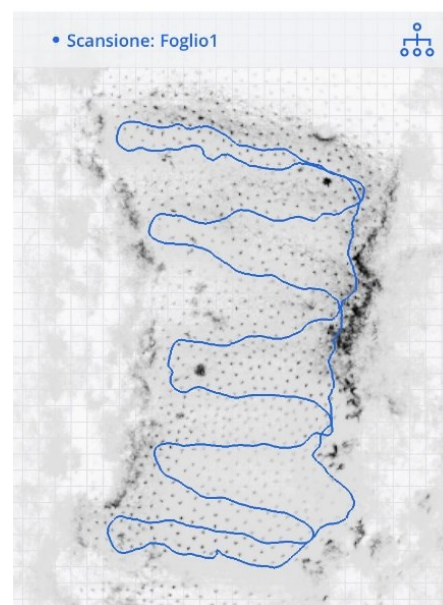


Figura 3-14: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP06RE. La linea blu rappresenta il percorso.

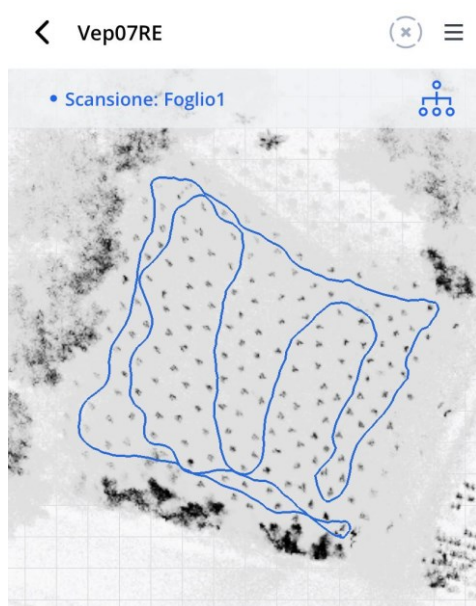


Figura 3-15: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP07RE (scansione 1). La linea blu rappresenta il percorso.

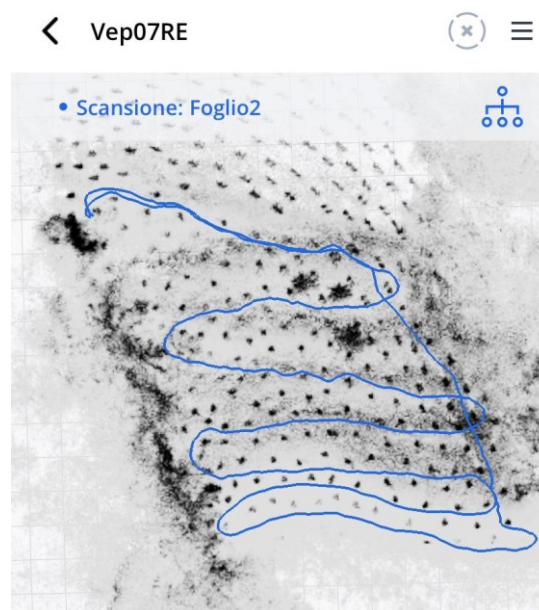


Figura 3-16: Visualizzazione dallo smartphone del percorso nel mese di ottobre nella stazione di monitoraggio VEP07RE (scansione 2). La linea blu rappresenta il percorso.

Le scansioni sono state eseguite nelle stesse 4 stazioni di monitoraggio in due differenti periodi temporali, in data 2 luglio e 25 ottobre, ripetendo percorsi simili che andassero a permettere la scansione della stessa area di interesse.

3.3 Software per l'elaborazione dei dati

Per l'elaborazione dei dati acquisiti, sono stati impiegati due principali software:

1. FARO Connect per la lettura e la gestione dei file acquisiti dal dispositivo;
2. CloudCompare per l'analisi e l'elaborazione delle nuvole di punti.

3.3.1 Faro Connect

FARO Connect è il software per la gestione delle nuvole di punti acquisite tramite FARO Orbis. Questo strumento consente di importare, leggere e gestire i dati acquisiti, direttamente scaricati dallo strumento.

Oltre alla nuvola di punti è possibile visualizzare la traiettoria, ovvero il tragitto percorso con lo strumento in mano durante la scansione (Figura 3-17).



Figura 3-17: La linea rossa rappresenta la traiettoria nella stazione di monitoraggio VED03SP della scansione acquisita nel mese di luglio.

Lo strumento è dotato della capacità di acquisire automaticamente fotografie durante il suo utilizzo, permettendo di ottenere nuvole di punti a colori. Inoltre, le immagini sferiche (Figura 3-18) possono essere aperte con un semplice *clic*, consentendo non solo di visualizzare i dettagli acquisiti, ma anche di effettuare misurazioni all'interno delle fotografie (Figura 3-19), ricordando che la misura viene comunque effettuata sulla nuvola di punti sottostante.



Figura 3-18: Ogni cerchio rappresenta una fotografia scattata durante la scansione nella stazione di monitoraggio VED03SP acquisita nel mese di luglio.

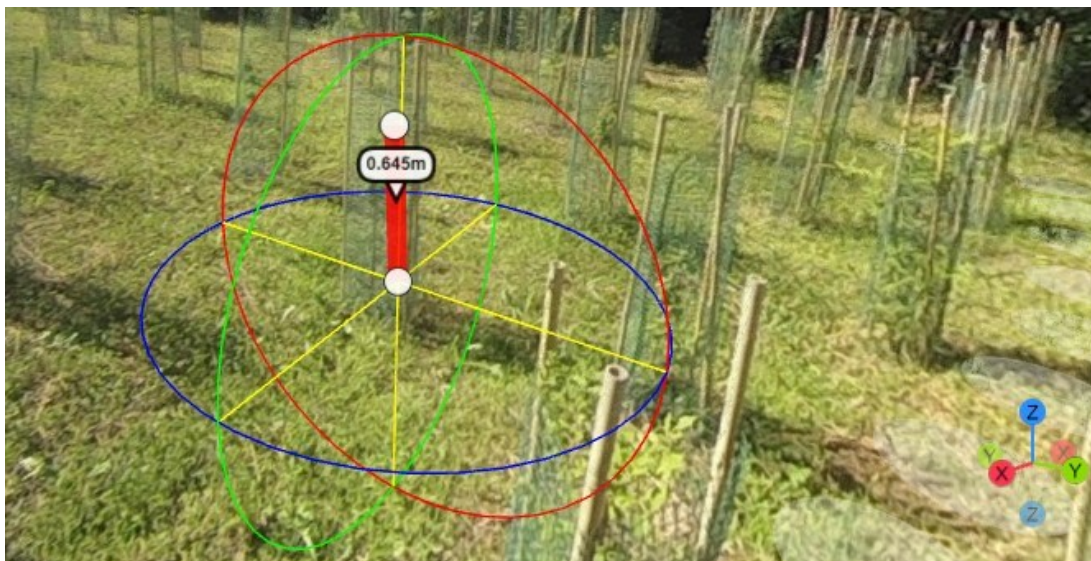


Figura 3-19: Esempio di misurazione all'interno di una delle foto scattate in automatico dallo strumento durante la scansione

Tramite questo software è stato possibile esportare le nuvole di punti in formato LAZ, successivamente caricate sul software CloudCompare, utilizzato per le successive elaborazioni dei dati.

3.3.2 CloudCompare

Le nuvole di punti in formato LAZ sono state caricate nel software *open source* CloudCompare, versione 2.13.1 (Kharkiv – Mar 20 2024) [Windows 64-bit].

La prima operazione eseguita è stata l'allineamento delle nuvole di punti della stessa area, acquisite nei due diversi periodi di acquisizione dei dati.

Per eseguire l'allineamento è stato utilizzato il comando *Aligns*, il cui funzionamento si basa sulla selezione manuale di un numero minimo di 3 punti comuni ad entrambe le nuvole e il software procede con la loro sovrapposizione automatica, cercando di minimizzare la distanza tra i punti corrispondenti di due nuvole di punti.

Dopo la scelta delle 3 coppie di punti equivalenti viene calcolato l'errore per ogni coppia di punti che vengono poi utilizzati per il calcolo del RMS (*Root Mean Square*), ovvero il valore quadratico medio.

Durante l'acquisizione dei dati nelle due sessioni di rilievo non sono stati utilizzati *target* a terra, per questo motivo per l'allineamento sono stati utilizzati come punti di riferimento elementi già presenti nell'area, come pali, staccionate e altri oggetti di riferimento.

Successivamente all'allineamento delle nuvole di punti è stata eseguita una segmentazione manuale utilizzando il comando *Segment*. Inizialmente è stata delimitata con precisione l'area che presentava i ripristini vegetazionali, per poi procedere a una prima pulizia dell'area, rimuovendo la vegetazione non riconducibile alle operazioni di ripristino.

In seguito, è stato utilizzato il *plugin CSF Filter* per la discriminazione dei punti suolo e non suolo, con la creazione automatica di una *mesh* del terreno (Figura 3-20)

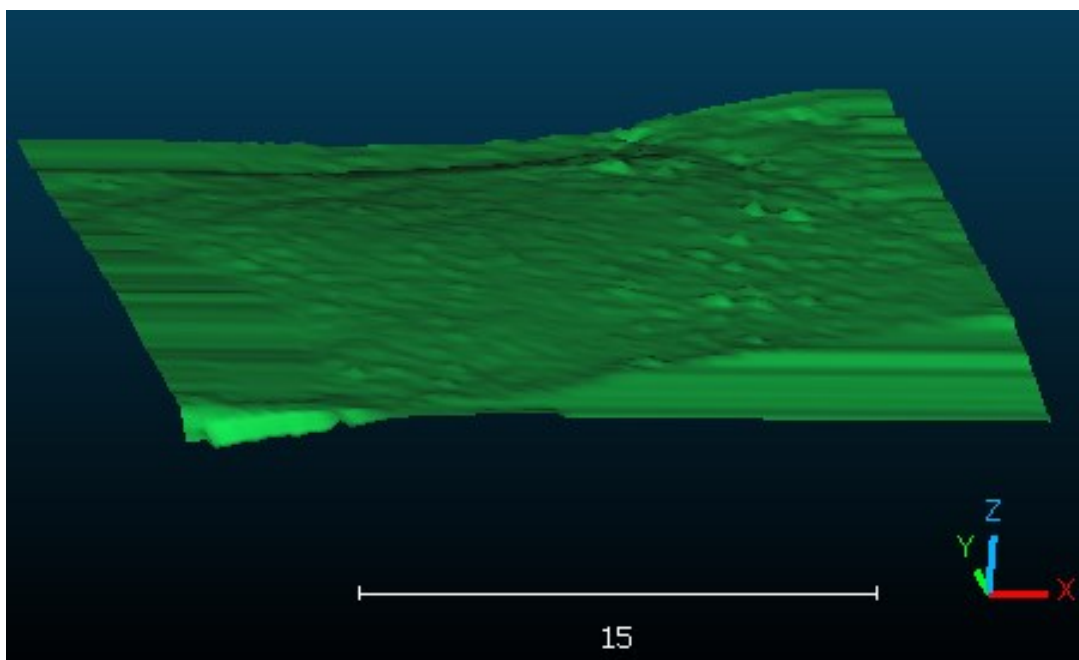


Figura 3-20: Esempio di mesh creata con l'uso del plugin CSF Filter (Stazione di monitoraggio VEP06RE).

Successivamente, lo stesso plugin è stato riapplicato per sezionare le piante a circa 50 cm da terra, rimuovendo anche la vegetazione erbacea più alta e permettendo una valutazione più accurata degli accrescimenti.

Le nuvole di punti ottenute sono state ulteriormente ripulite manualmente, eliminando eventuali arbusti o altra vegetazione circostante.

Le nuvole di punti comprendenti esclusivamente la sola parte superiore delle piantine sono state impiegate per una prima valutazione qualitativa sugli accrescimenti, considerando il periodo di circa 4 mesi trascorso tra le due sessioni di rilievo.

Per il confronto automatico delle coppie di nuvole di punti è stato utilizzato il comando *Cloud to Cloud distance*, che consente di confrontare due nuvole di punti, utilizzando una delle due come riferimento. In questo caso è stata utilizzata la nuvola di luglio come *reference*, mentre quella di ottobre come nuvola da confrontare. Al termine del calcolo, il software registra informazioni scalari nel campo *Scalar Field*. Attivando questa visualizzazione, i punti

della nuvola vengono colorati in modo diverso: blu per quelli con variazione minima o nulla e da verde a rosso, passando per il giallo, per i punti con variazioni crescenti, permettendo così di osservare in modo rapido e intuitivo gli accrescimenti.

Successivamente è stata svolta un'analisi quantitativa degli accrescimenti mediante il calcolo delle altezze.

Poiché non è stato possibile eseguire un procedimento automatico, le altezze sono state valutate esaminando singolarmente ogni pianta.

Per questa operazione è stata utilizzata la nuvola di punti ottenuta precedentemente mediante il *plugin CSF Filter*, che includeva esclusivamente i punti relativi alle piantine, separati dal suolo. A questa nuvola di punti è stata poi associata la *mesh* creata durante la stessa operazione.

Mediante il comando *Cloud to Mesh distance*, è possibile calcolare la distanza tra una nuvola di punti e una *mesh*, che rappresenta il modello della superficie. Il procedimento applicato a ciascuna pianta prevede il ritaglio manuale della pianta tramite il comando *Segment*, sia nel mese di luglio che in quello di ottobre. Ogni pianta viene quindi rinominata con una numerazione progressiva, al fine di permettere il confronto tra la stessa nei rilievi di luglio e ottobre. Nel *display ranges* del pannello *Properties* viene riportata la distanza del punto massimo dalla *mesh*, ovvero l'altezza della pianta (Figura 3-21).

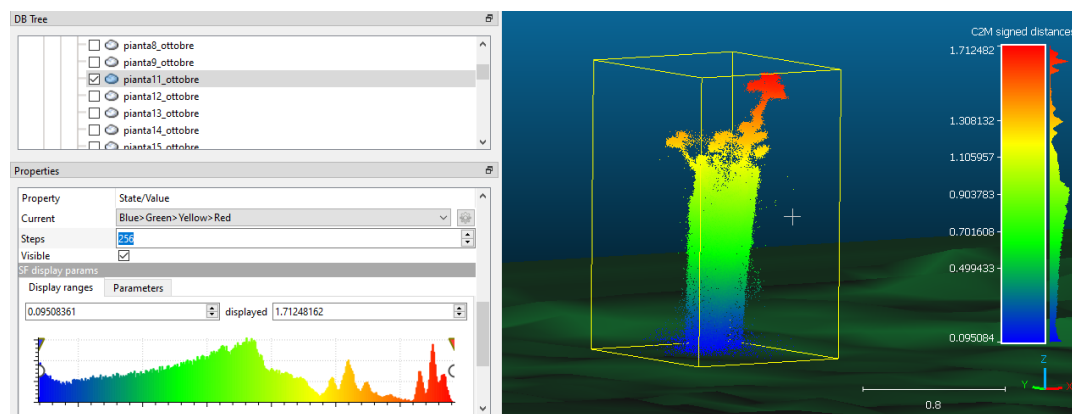


Figura 3-21: Esempio di stima dell'altezza della pianta n°11 nel mese di ottobre (stazione di monitoraggio VED03SP).

Le analisi sul diametro delle piante non sono state possibili principalmente a causa della presenza dello shelter a protezione delle giovani piantine, che non è stato possibile rimuovere dalle nuvole di punti. Inoltre, il diametro delle piante, pari a circa 1 cm, era particolarmente ridotto e le nuvole di punti risultavano troppo rumorose e imprecise per effettuare misurazioni così dettagliate.

Capitolo 4

RISULTATI

4.1 Accuratezza della sovrapposizione

Durante la fase di sovrapposizione, è stato utilizzato il comando *Align* di CloudCompare per allineare i rilievi effettuati a luglio e ottobre.

Al termine del processo, CloudCompare calcola un valore di RMS, che rappresenta l'errore quadratico medio delle distanze tra i punti corrispondenti delle due nuvole. Questo valore fornisce una misura quantitativa della qualità dell'allineamento, esprimendo l'entità dello scostamento tra i due dataset. L'RMS è riportato nella stessa unità di misura utilizzata per le nuvole di punti ed è un indicatore fondamentale per valutare l'accuratezza dell'allineamento ottenuto.

Per le stazioni di monitoraggio dove sono state effettuate più scansioni separate viene riportata l'accuratezza media della stazione.

Tabella 4-1: Accuratezza della sovrapposizione per ogni stazione di monitoraggio

Stazione di monitoraggio	Accuratezza della sovrapposizione (cm)
VED03SP	1,73
VEP05RE	2,14
VEP06RE	1,96
VEP07RE	2,39

4.2 Risultati qualitativi

I risultati ottenuti mediante CloudCompare sono stati visualizzati sotto forma di una nuvola di punti, alla quale è stato associato un nuovo campo scalare creato per la nuvola di punti

relativa al rilievo del mese di ottobre. Questo campo scalare rappresenta le variazioni di distanza tra i punti acquisiti nel mese di luglio e di ottobre, consentendo di evidenziare visivamente gli accrescimenti.

Per una rappresentazione intuitiva è stata utilizzata una scala cromatica Blue > Green > Yellow > Red, in cui:

- Blu indica le variazioni minime;
- Verde e Giallo rappresentano valori intermedi;
- Rosso evidenzia le variazioni significative.

Questa rappresentazione cromatica facilita l'interpretazione dei dati, permettendo di individuare immediatamente le zone con variazioni rilevanti tra i due rilievi nell'intervallo di tempo considerato.

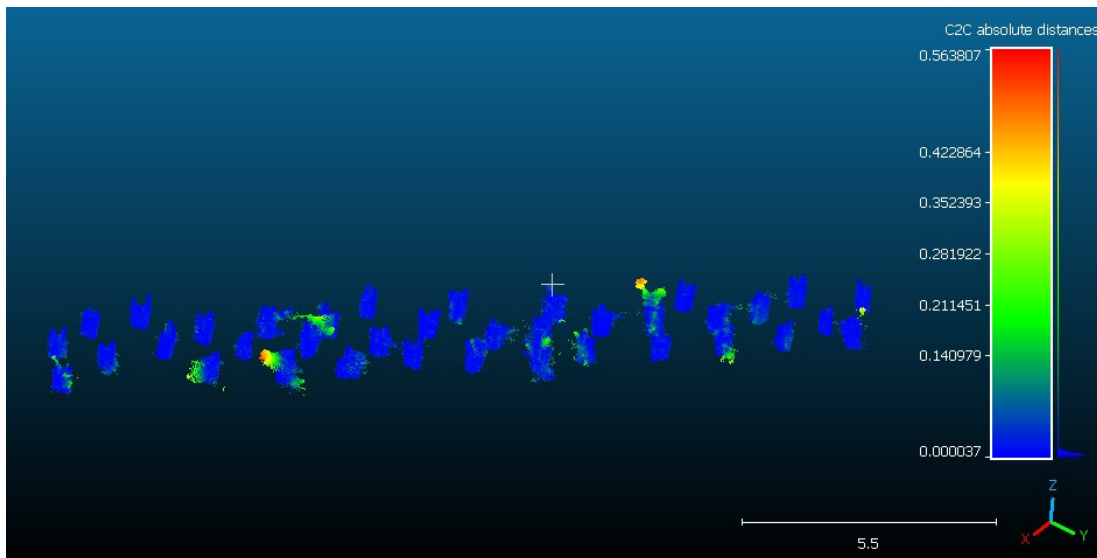


Figura 4-1: valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VED03SP.

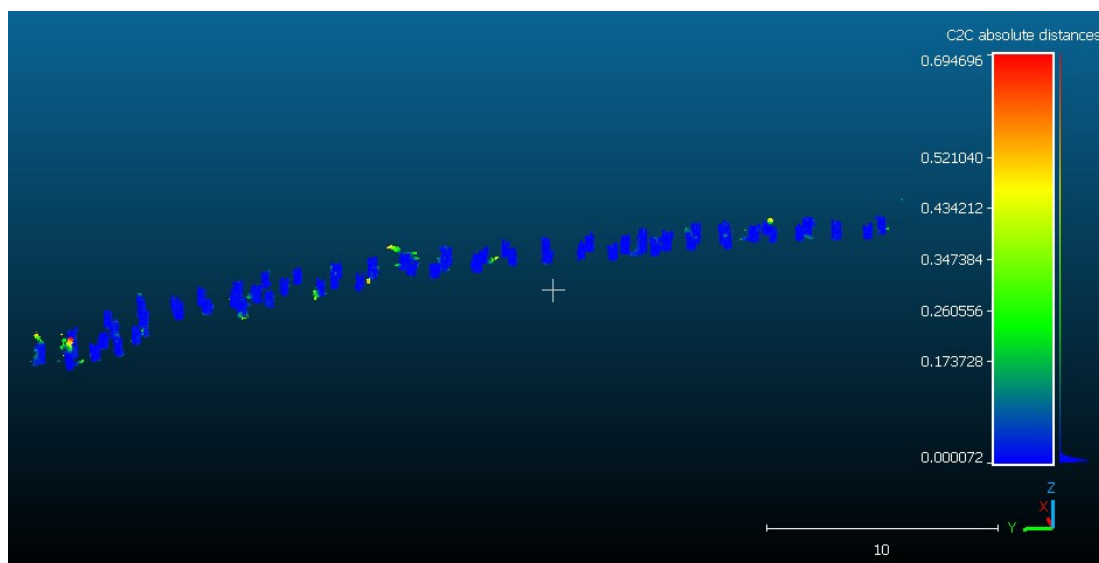


Figura 4-2: valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VEP05RE, area 1.

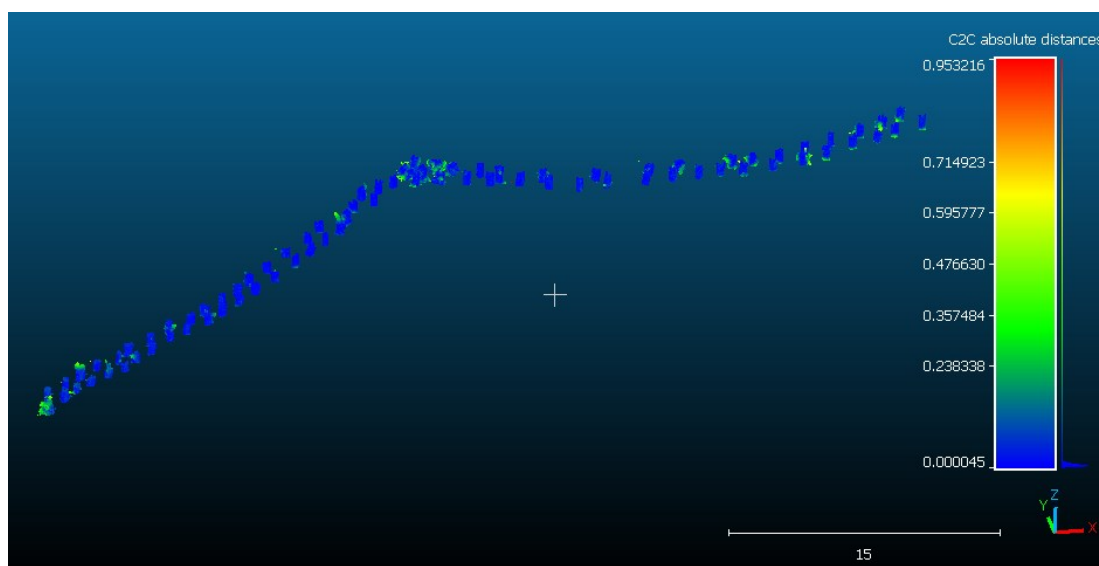


Figura 4-3: valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VEP05RE, area 2.

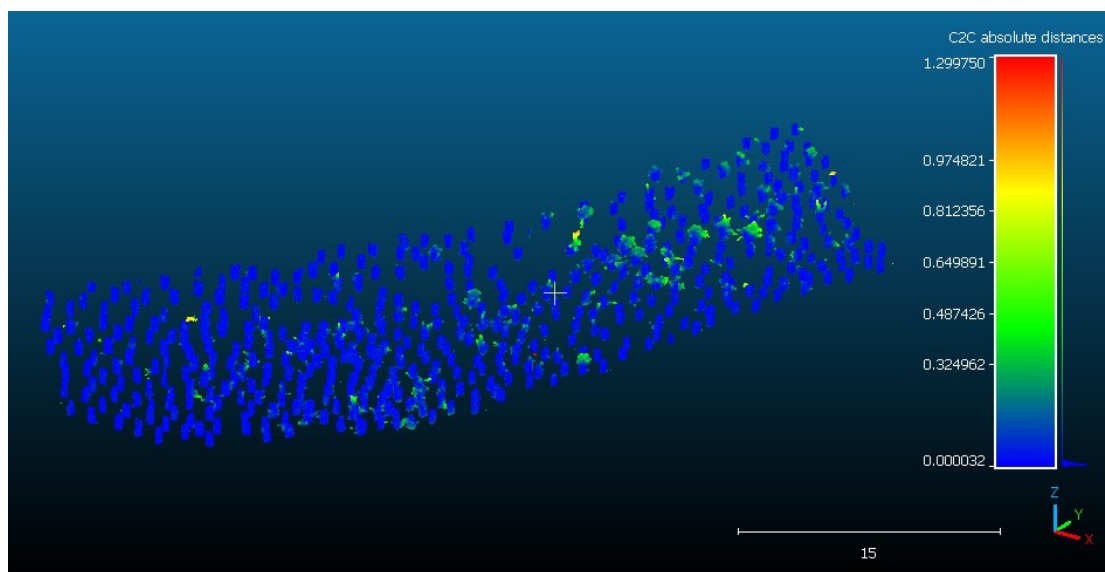


Figura 4-4: valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VEP06RE.

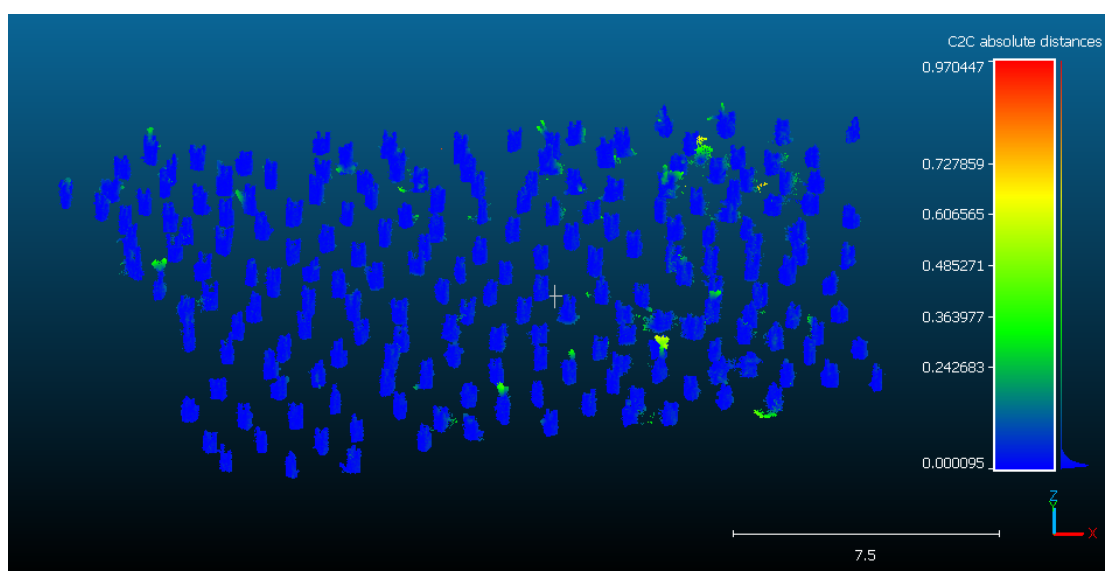


Figura 4-5: valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VEP07RE, area 1.

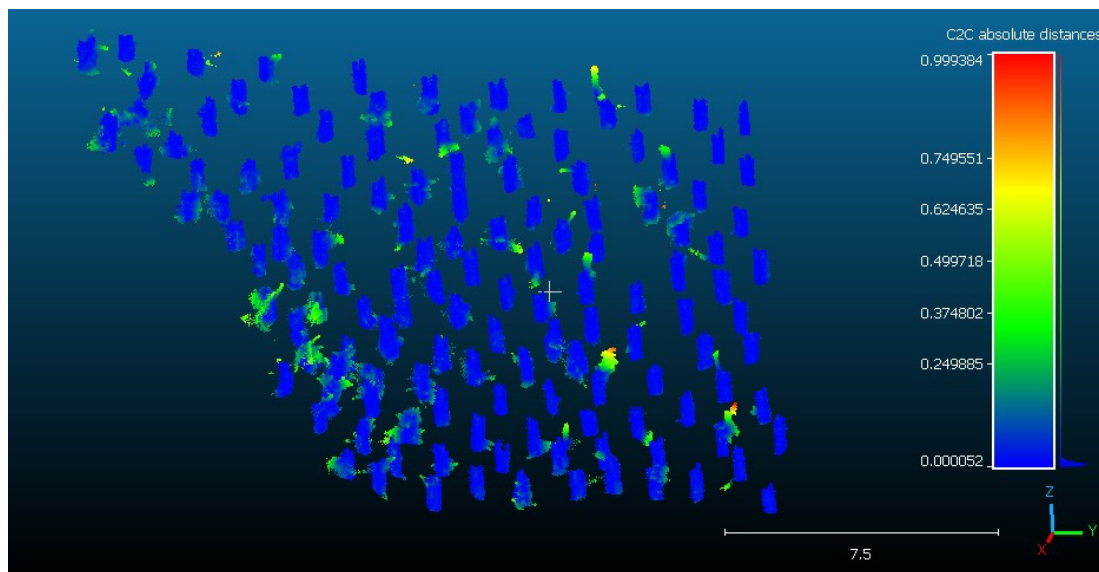


Figura 4-6: valutazione qualitativa degli accrescimenti della stazione di monitoraggio VEP07RE, area 2.

4.3 Risultati quantitativi

Uno degli obiettivi principali della presente tesi è stato quello di stimare l'altezza delle piante nelle 4 stazioni di rilievo, confrontando i dati acquisiti in due momenti distinti: luglio e ottobre. Questo ha permesso di valutare la crescita delle piante nel periodo considerato e di analizzare le variazioni tra i due rilievi.

Di seguito è riportato il numero di piante di cui è stata calcolata l'altezza mediante il software CloudCompare:

- n°38 piante per la stazione VED03SP;
- n°61 piante (area 1) e n°82 (area 2), per un totale di 143 piante per la stazione VEP05RE;
- n°414 piante per la stazione VED06RE
- n°197 piante (area 1) e n°142 (area 2), per un totale di 339 piante per la stazione VEP07RE.

Ogni pianta è stata numerata con un numero progressivo, in modo da permettere il confronto tra la medesima nel mese di luglio e in quello di ottobre.

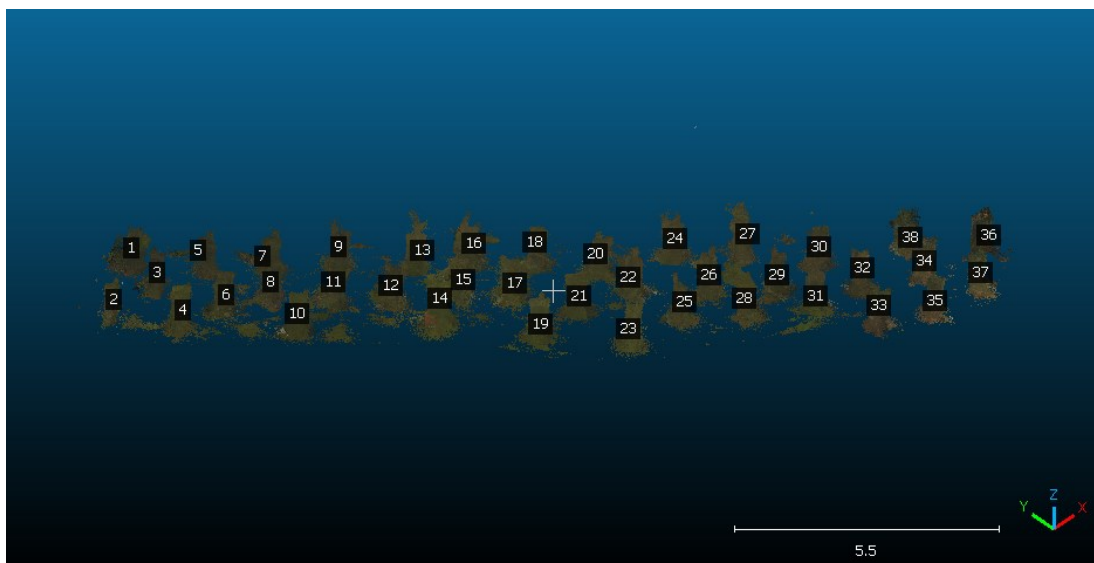


Figura 4-7: visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VED03SP con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.

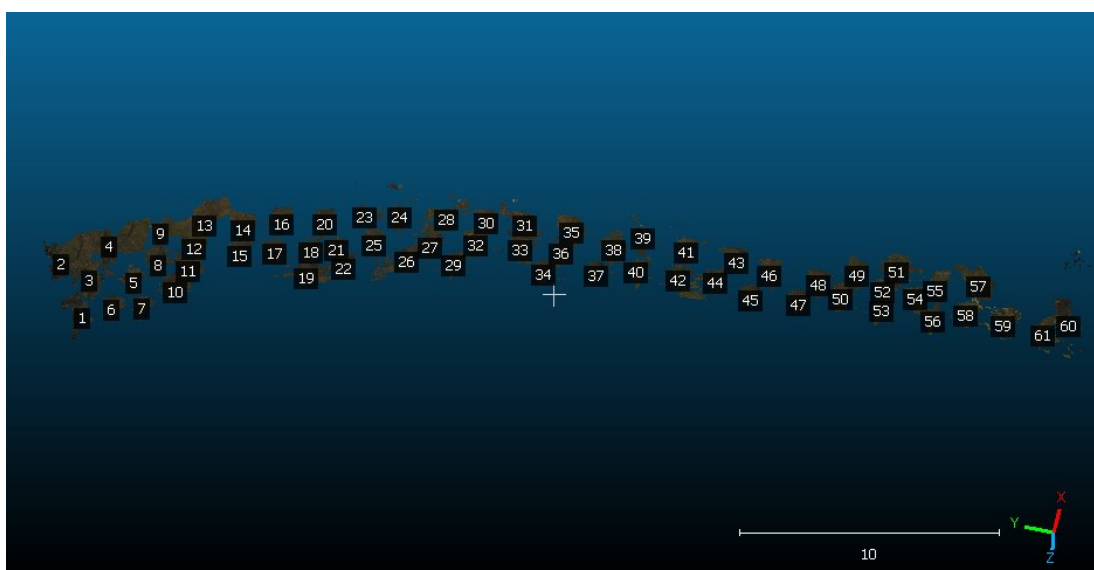


Figura 4-8: visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VEP05RE (area 1) con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.

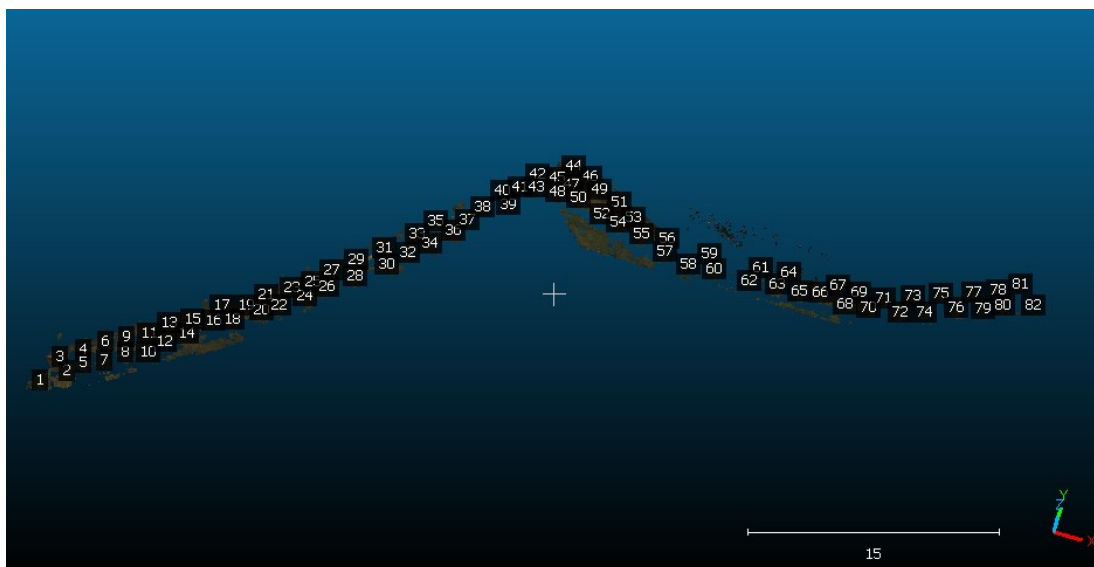


Figura 4-9: visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VEP05RE (area 2) con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.



Figura 4-10: visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VEP06RE con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.

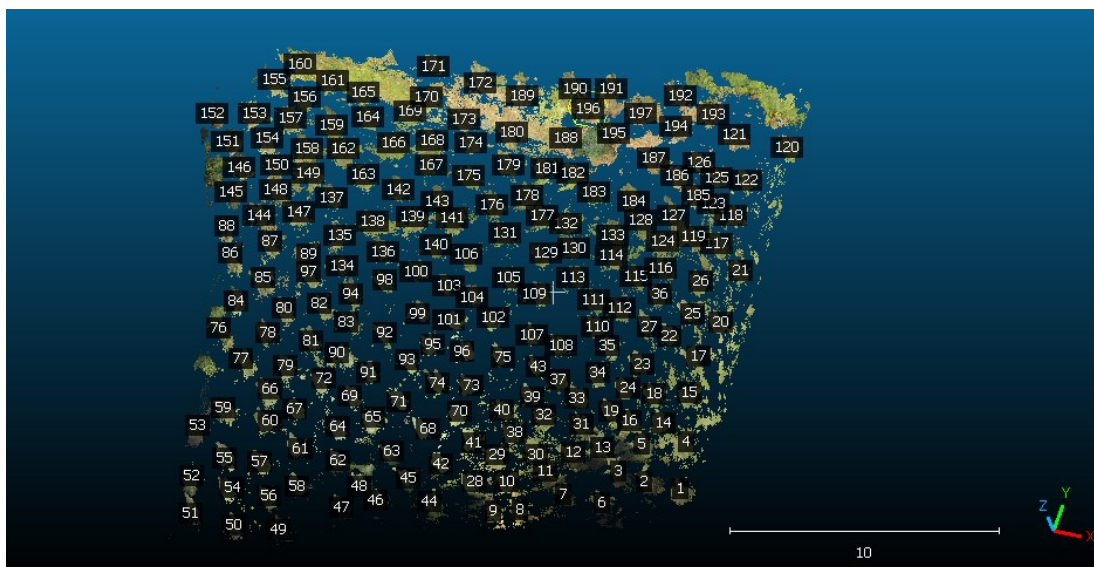


Figura 4-11: visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VEP07RE (area 1) con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.



Figura 4-12: visualizzazione delle piante nella stazione di monitoraggio VEP07RE (area 2) con etichette numeriche associate. Ogni numero identifica una pianta specifica, mantenendo la stessa corrispondenza tra i rilievi di luglio e ottobre per consentire il confronto diretto delle altezze.

Di seguito vengono presentati i risultati derivanti dall'analisi quantitativa delle variazioni di altezza delle piante, basata sui dati raccolti nei rilievi di luglio e ottobre. L'approccio

metodologico utilizzato ha permesso di ottenere stime delle altezze per ciascuna pianta monitorata, consentendo un confronto diretto tra i due periodi.

Questa valutazione quantitativa fornisce un'indicazione dell'entità degli accrescimenti nel periodo di osservazione e costituisce una base per l'interpretazione dei dati relativi al comportamento vegetazionale nell'arco di tempo considerato.

Nel presente studio l'accrescimento delle piantine nelle diverse stazioni di monitoraggio è stato analizzato utilizzando un box plot, rappresentato nella Figura 4-13, che illustra la variazione in altezza delle piantine. Il range interquartile (IQR) risulta ristretto, evidenziando una limitata variabilità dei dati.

I valori minimi rilevati per le stazioni VED03SP, VEP05RE, VEP06RE e VEP07RE sono rispettivamente pari a -3 cm, -7 cm, -6 cm e -6 cm, mentre i valori massimi raggiungono rispettivamente 2 cm, 8 cm, 12 cm e 8 cm.

Sono stati identificati numerosi *outlier*, concentrati prevalentemente tra le variazioni positive di accrescimento, indicativi di piantine con una crescita superiore alla media. Sono presenti, seppur in misura minore, *outlier* associati a riduzioni di altezza, probabilmente attribuibili a danneggiamenti delle cime.

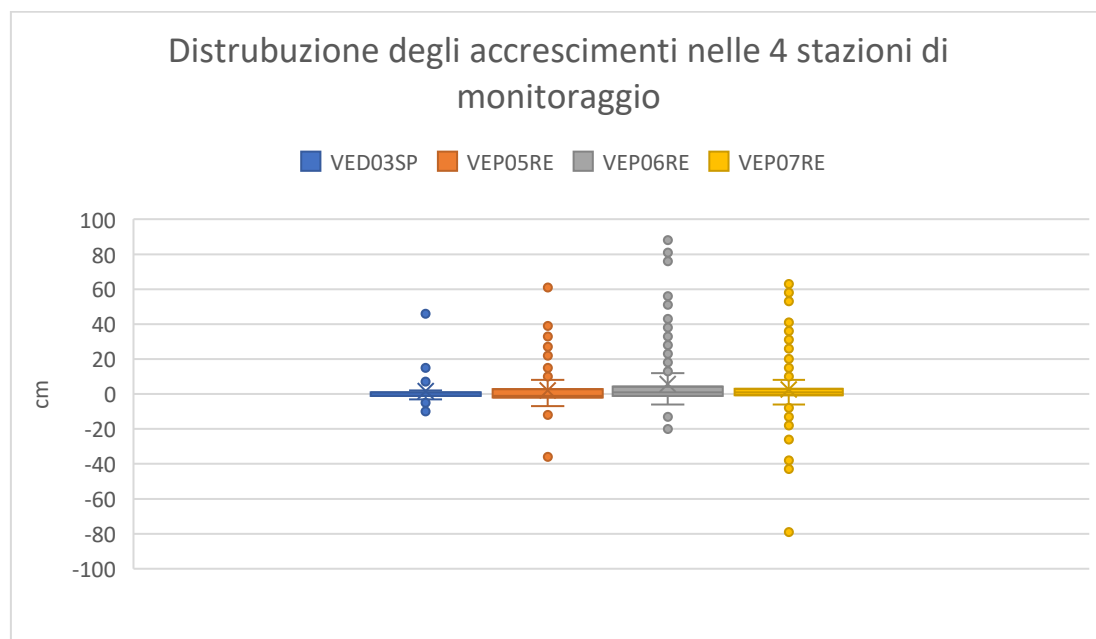


Figura 4-13: distribuzione mediante quattro box plot, uno per ciascuna delle stazioni di monitoraggio, che illustrano le variazioni di altezza delle piantine tra i mesi di luglio e ottobre.

Successivamente all'analisi delle variazioni di altezza attraverso il box plot, nella Tabella 4-2 sono riportati i valori medi degli accrescimenti per ciascuna delle stazioni di monitoraggio.

Questi valori permettono una valutazione quantitativa media dei cambiamenti nelle altezze delle piantine tra i mesi di luglio e ottobre.

Tabella 4-2: valori medi degli accrescimenti per ogni stazione di monitoraggio

Stazione di monitoraggio	Media variazione altezza (cm)
VED03SP	1,71
VEP05RE	1,99
VEP06RE	5,63
VEP07RE	2,53

Capitolo 5

DISCUSSIONI

Il rilievo effettuato mediante laser scanner ha consentito di monitorare l'accrescimento della quasi totalità delle piante presenti nelle stazioni di monitoraggio analizzate. Questa metodologia si è dimostrata estremamente efficiente, permettendo di acquisire i dati in un tempo significativamente ridotto, variabile da pochi minuti fino a circa dieci minuti per le aree più estese. Tale rapidità rappresenta un notevole vantaggio rispetto alle metodologie tradizionali di rilievo.

Lo strumento si è mostrato estremamente maneggevole e leggero, consentendo di spostarsi agevolmente tra i ripristini e di scansionare l'intera zona di interesse in modo efficiente, mantenendo l'andatura di una normale camminata. Tuttavia, è necessario prestare particolare attenzione in presenza di scalini o fossati, poiché possono portare a una perdita di orientamento dello strumento. In queste situazioni, è consigliabile eseguire scansioni separate per garantire un risultato accurato.

Inoltre, l'applicazione per smartphone, connessa direttamente allo strumento, si è rivelata estremamente utile, poiché consente di visualizzare in tempo reale la traiettoria percorsa durante la scansione. Questa funzionalità è particolarmente vantaggiosa per monitorare l'area coperta, assicurarsi di non lasciare zone non scansionate e correggere eventuali errori di percorso immediatamente, migliorando così l'efficienza e l'accuratezza del lavoro.

Con i metodi tradizionali, l'accrescimento delle piante è stato monitorato considerando un campione di 25 piante per ciascuna stazione di monitoraggio. In particolare, sono stati rilevati i dati relativi al diametro e all'altezza delle piante. L'altezza è stata misurata mediante flessometro, con rilievi effettuati in due sessioni distinte. Gli altri esemplari sono stati esaminati visivamente per verificare l'eventuale presenza di fallanze o danni. Complessivamente, le condizioni climatiche favorevoli, caratterizzate da una stagione particolarmente piovosa, hanno contribuito a garantire una percentuale di attecchimento quasi

totale. Ulteriori studi potrebbero esplorare la possibilità di combinare l'uso di sensori multispettrali per la valutazione della salute delle piante. Esistono già ricerche che hanno analizzato l'efficacia delle immagini multispettrali nel rilevare, a livello di singolo albero, la presenza di piante stressate o degradate (Fraser et al., 2021).

In questo studio non è stato però possibile confrontare direttamente l'accrescimento delle stesse 25 piante tra i dati ottenuti tramite rilievi tradizionali e quelli raccolti con il laser scanner. Nonostante questa limitazione, l'analisi dei dati ottenuti mediante entrambe le metodologie di rilievo, che comprende un numero significativamente maggiore di piante per i rilievi con laser scanner, ha mostrato che la maggior parte degli accrescimenti si attesta su pochi centimetri. Si evidenzia la presenza di alcune piante che hanno registrato una diminuzione dell'altezza, probabilmente dovuta a un danneggiamento delle cime. Inoltre, in entrambi i casi, si osserva la presenza di piante che hanno avuto accrescimenti significativamente superiori alla norma. Sarebbe consigliato condurre studi di approfondimento che si concentrino su un confronto dettagliato su alcune piante campione, al fine di verificare con maggiore precisione l'accuratezza del laser scanner.

Un altro aspetto da considerare è che il primo rilievo tradizionale è stato effettuato quasi un mese e mezzo prima rispetto al rilievo con laser scanner, rispettivamente nella seconda metà di maggio e all'inizio di luglio. Tuttavia, il secondo rilievo di confronto è stato svolto simultaneamente per entrambe le modalità a fine ottobre.

Il rilievo tramite laser scanner è stato quindi effettuato a distanza di poco meno di 4 mesi, ma intervalli più lunghi potrebbero consentire di ottenere accrescimenti più evidenti e facilmente valutabili con questo strumento.

Si sottolinea che, a causa delle condizioni meteorologiche avverse, in particolare della pioggia, che hanno interessato il rilevamento presso la stazione VEP08RE il 22 ottobre 2024, i dati raccolti risultavano compromessi e non idonei all'elaborazione, per questo motivo non è stato possibile analizzare tale stazione.

Dai rilievi in campo, rispetto ai rilievi effettuati mediante laser scanner, è stato possibile identificare quali specie hanno registrato un accrescimento maggiore rispetto alle altre, evidenziato dai punti di outlier nei boxplot. Tra queste si distinguono per gli incrementi di crescita particolarmente significativi specie come *Alnus glutinosa*, *Ulmus minor* e *Pinus nigra*.

Queste considerazioni aprono interessanti prospettive per approfondimenti futuri. Una direzione promettente potrebbe essere l'integrazione della tecnologia LiDAR con modelli di classificazione basati sul *deep learning* (Vermeer et al., 2023). Questo approccio potrebbe essere testato per valutarne la fattibilità nei contesti di ripristino vegetazionale, consentendo

di analizzare, anche attraverso i rilievi effettuati con laser scanner, quali specie mostrano un accrescimento maggiore.

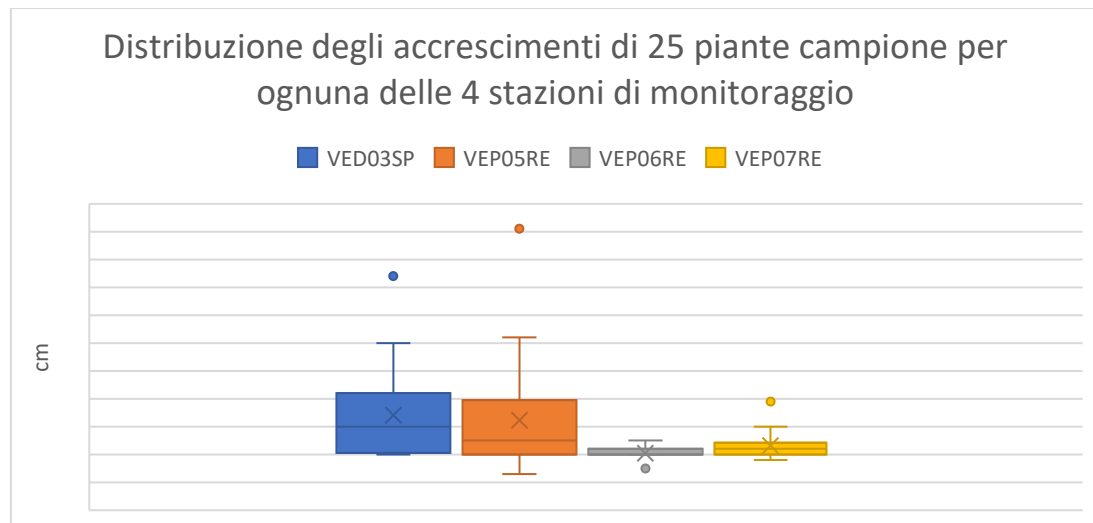


Figura 5-1: distribuzione degli accrescimenti nelle 4 stazioni di monitoraggio. I dati derivano da rilievo tradizionale mediante flessometro. Per ogni stazione di monitoraggio sono state misurate 25 piante campione.

Un aspetto rilevante da considerare è che il dato monitorato, ovvero l'altezza delle piante, presenta un valore comparabile con l'errore strumentale del laser scanner, stimato anch'esso nell'ordine di qualche centimetro. Per migliorare l'accuratezza delle misurazioni e ridurre l'errore legato alla sovrapposizione delle nuvole di punti, sarebbe opportuno implementare l'uso di *target* a terra. Questi *target*, posizionati in modo strategico, faciliterebbero una registrazione più precisa delle nuvole di punti.

I principali vantaggi dell'utilizzo del laser scanner includono la rapidità di acquisizione e la capacità di monitorare un numero significativamente maggiore di piante rispetto ai metodi tradizionali. Ad esempio, per le stazioni di monitoraggio più estese, è stato possibile rilevare l'accrescimento di oltre 400 piante in un'unica sessione, eliminando la necessità di etichettare singolarmente e in modo durevole ogni pianta, risolvendo una problematica pratica fondamentale e garantendo una maggiore efficienza nei rilievi futuri.

Tuttavia, l'utilizzo del laser scanner presenta alcune limitazioni. La successiva elaborazione dei dati richiede l'analisi individuale di ogni singola pianta, poiché al momento non è stato possibile automatizzare completamente questo processo.

Inoltre, una delle principali criticità riscontrate riguarda la presenza dello shelter, che non è stato possibile rimuovere dalle nuvole di punti. Questo ha impedito la misurazione degli accrescimenti al suo interno, permettendo quindi di misurare solo quelle piante che hanno superato in altezza quella dello shelter, mentre per le altre l'accrescimento risulterà nullo.

Infine, dai rilievi effettuati tramite laser scanner non è stato possibile valutare il diametro delle piante. Sebbene in numerosi studi la tecnologia LiDAR sia stata impiegata per l'estrazione automatica del diametro con una precisione di pochi centimetri (Huang et al., 2011), inclusa l'applicazione di dispositivi Lidar portatili (Proudman et al., 2021), questo approccio non è stato applicabile nel contesto del ripristino di piante molto giovani. Il diametro ridotto, di soli pochi millimetri, ha reso il processo più complesso, ulteriormente complicato dalla presenza degli shelter.

Capitolo 6

CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI

Il presente studio ha utilizzato il laser scanner per monitorare l'accrescimento delle piante messe a dimora nel contesto dei ripristini in corrispondenza del rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave – Salgareda, permettendo sia un'analisi qualitativa sia un'analisi quantitativa basata sul calcolo delle altezze.

A seguito di questo lavoro è stato avviato un nuovo studio volto a sperimentare tecniche di rilievo da drone per ampliare le possibilità di analisi.

Il drone è stato utilizzato in un progetto inerente, ovvero quello del “Rifacimento metanodotto Rimini - Sansepolcro DN 650/750 (26"/30"), DP 75 bar e opere connesse”, in particolare in due aree di rimboschimento: una in località Miratoio, estesa su circa 1,74 ha, e una in località Pontebaffoni, estesa su circa 6,77 ha.

La tecnologia LiDAR può infatti essere montata sia su laser scanner terrestri che su droni, offrendo flessibilità nella scelta del metodo di rilevamento a seconda delle esigenze del progetto. Quando montato su un laser scanner terrestre, il LiDAR permette di ottenere dati altamente dettagliati su piccole aree o punti specifici, ideale per monitoraggi più localizzati e accurati. D'altro canto, il LiDAR montato su un drone consente di coprire ampie aree in modo rapido ed efficiente, rendendo possibile la raccolta di dati su terreni difficili da raggiungere a piedi o su grandi estensioni.

Per il monitoraggio dei ripristini boschivi in corrispondenza del rifacimento del metanodotto Rimini – Sansepolcro è stato utilizzato UAV con sensore LiDAR Zenmuse L2, permettendo di acquisire dati geospaziali più precisi.

Inoltre, sono stati posizionati *target* a terra, di cui sono state prese le coordinate geografiche mediante GNSS ed esportate in TXT.

A seguito del posizionamento dei target, si è proceduto alla pianificazione del volo, combinando tecnologie LiDAR e fotogrammetriche.

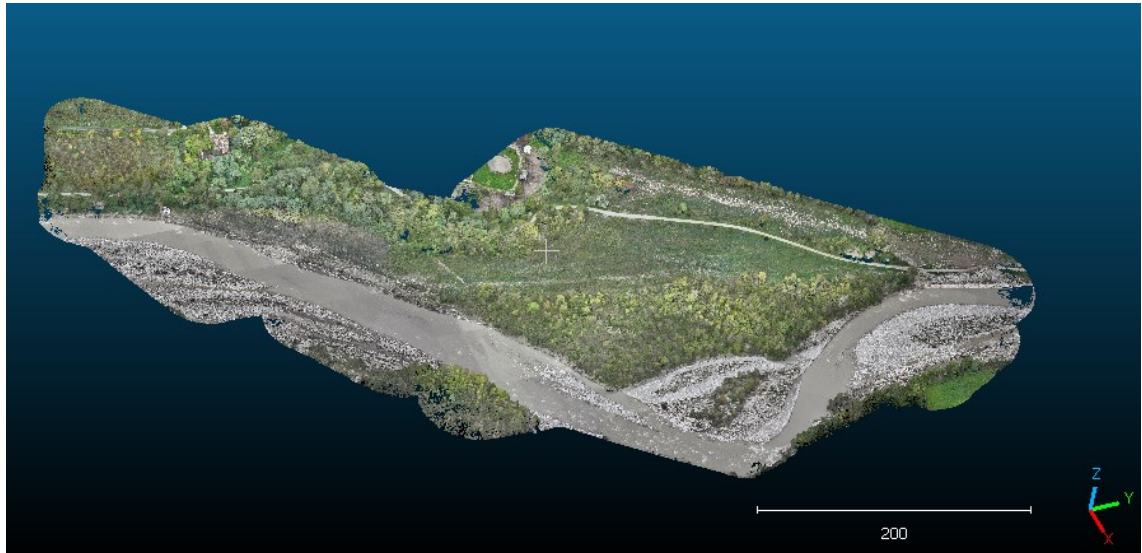


Figura 6-1: nuvola di punti acquisita in località Pontebaffoni (RN)

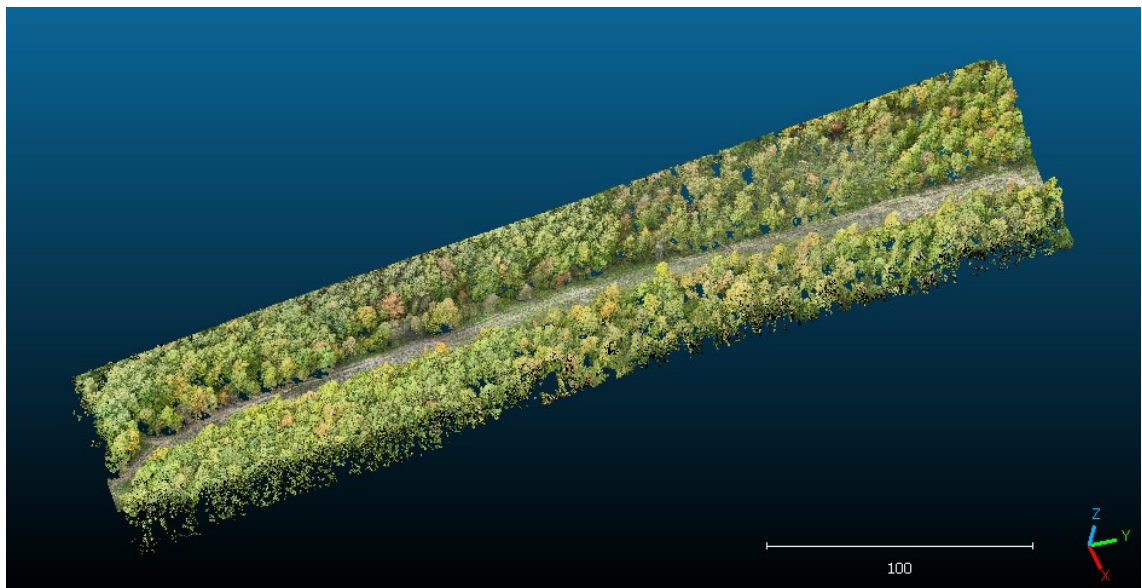


Figura 6-2: nuvola di punti acquisita in località Miratoio (RN)

È stata possibile l'estrazione dei punti a terra generando una *mesh* che rappresenta il modello del terreno, mentre per i punti fuori terra è stato possibile evidenziare mediante una scala cromatica le diverse altezze ed, estraendo ogni singolo elemento arboreo, è stato possibile effettuare misure dimensionali.

Inoltre, il drone, equipaggiato con fotocamere RGB, è in grado di catturare fotografie che, una volta sovrapposte ed elaborate, permettono la creazione di ortofoto.

Gli output ottenuti possono essere caricati su software come QGIS risultando georeferenziati.



Figura 6-3: output georeferenziato sul software QGIS del rilievo svolto in località Pontebaffoni (RN)



Figura 6-4: output georeferenziato sul software QGIS del rilievo svolto in località Miratoio (RN)

Lo studio sull'utilizzo del drone in tale contesto è ancora in una fase iniziale, con un primo rilievo effettuato nel mese di ottobre. Non è stato ancora realizzato un volo di confronto per valutare gli accrescimenti. Tuttavia, un vantaggio che è già possibile evidenziare riguarda la

capacità del drone di poter indagare anche aree difficilmente accessibili da terra e quindi con maggiore sicurezza per gli operatori, penetrando anche attraverso le chiome e permettendo di ottenere la copertura anche di aree molto estese.

Per comprendere meglio le potenzialità e i limiti delle diverse tecnologie, è utile confrontare l'efficacia del drone e del laser scanner, analizzandone i rispettivi vantaggi e le applicazioni ottimali in contesti di monitoraggio vegetazionale.

Il laser scanner rappresenta una tecnologia innovativa per il monitoraggio dei ripristini vegetazionali, ma comporta costi significativi legati sia all'acquisto che al noleggio dello strumento.

Un aspetto cruciale riguarda la sostenibilità dello sforzo di campionamento: con i rilievi tradizionali, è stato definito un campione di 25 piante per intercettare un popolamento minimo significativo, a causa delle tempistiche e delle risorse necessarie per effettuare le misurazioni manuali. L'uso del laser scanner consente invece un monitoraggio rapido su un numero molto più elevato di piante, includendo potenzialmente tutte quelle presenti nell'area di studio, eliminando il rischio di ottenere dati poco rappresentativi dell'intera popolazione vegetale.

Questa capacità di estendere il rilievo, unita alla possibilità di elaborare comodamente i dati raccolti a casa tramite software specifici al computer, rappresenta il principale vantaggio del laser scanner rispetto alle tecniche tradizionali.

Un altro vantaggio significativo è la possibilità di evidenziare gli accrescimenti vegetazionali su un'intera area utilizzando una scala di colori, fornendo così un'analisi qualitativa aggiuntiva oltre a quella quantitativa, che con i rilievi tradizionali si limita alla valutazione delle altezze e dei diametri. Questo approccio consente di ottenere una visione più completa e immediata delle dinamiche di crescita.

Rispetto al laser scanner, i droni offrono invece il vantaggio di poter raccogliere dati anche in zone difficilmente accessibili a piedi, garantendo una copertura maggiore del territorio e ampliando le possibilità di monitoraggio in aree remote o particolarmente impervie. Inoltre, riescono a coprire in tempi brevi aree più estese rispetto a quelle monitorate con il laser scanner.

In conclusione, l'introduzione di nuove tecnologie, come il laser scanner terrestre e le applicazioni LiDAR da drone, rappresentano un passo significativo verso l'innovazione e l'efficienza nel monitoraggio ambientale. Tuttavia, queste metodologie, sebbene promettenti, richiedono ulteriori approfondimenti e studi per perfezionare i protocolli operativi, migliorare l'accuratezza delle analisi e affrontare le limitazioni emerse durante l'applicazione. Nonostante ciò, le opportunità che offrono per ottimizzare la raccolta e l'elaborazione dei dati,

garantendo una visione più ampia delle aree monitorate, rendono queste tecnologie degli strumenti di valore per il miglioramento degli studi di monitoraggio.

RINGRAZIAMENTI

Un sincero grazie al mio relatore, il Professore Roberto Pierdicca, per la sua guida, la sua disponibilità e i preziosi consigli che hanno reso possibile la realizzazione di questo lavoro. La sua competenza e il suo supporto sono stati fondamentali.

Ci tengo a ringraziare anche il Dott. Marco Bonacoscia e il Dott. Giulio Tesei, per il loro contributo e le loro indicazioni, che hanno arricchito il mio lavoro di ricerca.

Desidero rivolgere un sincero ringraziamento alla SNAM e alla società Hystrix di Pesaro, per il loro prezioso contributo alla realizzazione di questo progetto. Il loro supporto, sia in termini di dati che di competenze tecniche, è stato fondamentale per lo sviluppo della ricerca, permettendomi di approfondire tematiche di grande rilevanza con strumenti e conoscenze di alto livello. La collaborazione con queste realtà mi ha offerto un'importante opportunità di crescita professionale e ha arricchito il mio percorso accademico, fornendomi spunti di riflessione e nuove prospettive di analisi.

BIBLIOGRAFIA

Amoroso, C. G., Cicuttini, M. & Strazzaboschi, L. (2024). Costruzione di una condotta di collegamento tra il “canale Sade” e il sistema derivatorio Ledra – Tagliamento per il recupero parziale della portata di scarico della centrale di Somplago. Progetto di ripristino ambientale.

Amprimo, G., Antonietti, D., Battistella, G., Berghem, L., Bonadio, C., Campana, L., Capocefalo, S., Casali, A., Cenni, M., Di Noi, A., Ferrarini, R. M., Giacanelli, V., Menegoni, P., Onori, L., Politi, T., Sanna, S. e Siniscalco, C. (2005). La rinaturalizzazione e il risanamento dell’ambiente per la conservazione della Biodiversità. In collaborazione con l’Agenzia per la protezione dell’ambiente e per i servizi tecnici.

Arslan, A. E., İnan, M., Çelik, M. F., Erten, E. (2022). Estimations of Forest Stand Parameters in Open Forest Stand Using Point Cloud Data from Terrestrial Laser Scanning, Unmanned Aerial Vehicle and Aerial LiDAR Data. *European Journal of Forest Engineering*, 8(2), 46-54. <https://doi.org/10.33904/ejfe.1174123>

Bartolucci, D. (2009). Principi di laser scanning 3D. Hardware – metodologie applicative – esempi. *Dario Flaccovio Editore*, pp 11-15, 31-33.

Beretta, S. (2012). Gli effetti del verde sulla mitigazione dell’isola di calore urbana. Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Milano. Pp. 9-12.

Bertuccio, Canavero, G. & Sumerano, G. (2015). Parco eolico “Popein”. Piano di ripristino vegetazionale.

Bianco, P. M., Blasi, C., Copiz, R., Cornelini, P., Ercole, S. e Zavattero, L. (2010). Analisi e progettazione botanica per gli interventi di mitigazione degli impatti delle infrastrutture lineari. In collaborazione con l’Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale e il Coordinamento delle Associazioni Tecnico-scientifiche per l’Ambiente e il Paesaggio.

Bornaz, L. (2006). Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione.

Bornaz, L. (2006). Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione.

Cabo, C., Del Pozo, S., Rodríguez-Gonzálvez, P., Ordóñez, C., & González-Aguilera, D. (2018). Comparing Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Wearable Laser Scanning (WLS) for Individual Tree Modeling at Plot Level. *Remote Sensing*, 10(4), 540. <https://doi.org/10.3390/rs10040540>

Calders, K., Adams, J., Armston, J., Bartholomeus, H., Bauwens, S., Bentley, L.P., Chave, J., Danson, F. M., Demol, M., Disney, M., Gaulton, R., Moorthy, S. M. K., Levick, S. R., Saarinen, N., Schaaf, C., Stovall, A., Terryn, L., Wilkes, P. & Verbeeck, H. (2020). Terrestrial Laser Scanning in Forest Ecology: Expanding the Horizon. *Remote Sensing of Environment*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102>

Camarretta, N., Harrison, P. A., Lucieer, A., Potts, B. M., Davidson, N., & Hunt, M. (2021). Handheld Laser Scanning Detects Spatiotemporal Differences in the Development of Structural Traits among Species in Restoration Plantings. *Remote Sensing*, 13(9), 1706. <https://doi.org/10.3390/rs13091706>

Campos, M. B., Litkey, P., Wang, Y., Chen, Y., Hyyti, H., Hyypä, J. & Puttonen, E. & (2021). A Long-Term Terrestrial Laser Scanning Measurement Station to Continuously Monitor Structural and Phenological Dynamics of Boreal Forest Canopy. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.606752>

Colombo, G. & Pirra, D. (2013). Parco eolico in località Bric Naso di Gatto – Monte Negino. Relazione tecnica di ripristino morfologico e vegetazionale.

Dai H., Ziyun Z., Balzang T., Farmacia G., Segna R., Zhi L. & Li L. (2024). Communities in ecosystem restoration: The role of inclusive values and local elites' narrative innovations. *People and Nature*, (6,4). Pp 1655-1667. <https://doi.org/10.1002/pan3.10675>

Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: a literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2387–2429. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1964617>

Donager, J. J., Sánchez Meador, A. J., & Blackburn, R. C. (2021). Adjudicating Perspectives on Forest Structure: How Do Airborne, Terrestrial, and Mobile Lidar-Derived Estimates Compare? *Remote Sensing*, 13(12), 2297. <https://doi.org/10.3390/rs13122297>

Dorado-Roda, I., Pascual, A., Godinho, S., Silva, C. A., Botequim, B., Rodríguez-Gonzálvez, P., González-Ferreiro, E., & Guerra-Hernández, J. (2021). Assessing the Accuracy of GEDI Data for Canopy Height and Aboveground Biomass Estimates in Mediterranean Forests. *Remote Sensing*, 13(12), 2279. <https://doi.org/10.3390/rs13122279>

Edson, C. & Wing, M. G. (2011). Airborne Light Detection and Ranging (LiDAR) for Individual Tree Stem Location, Height, and Biomass Measurements. *Remote Sensing*, 3(11), 2494-2528. <https://doi.org/10.3390/rs3112494>

Eysn, L., Hollaus, M., Schadauer, K., & Pfeifer, N. (2012). Forest Delineation Based on Airborne LIDAR Data. *Remote Sensing*, 4(3), 762-783. <https://doi.org/10.3390/rs4030762>

Fabbri, A. (2009). Uso di immagini iperspettrali hyperion nell'analisi di acque lacustri. Corso di Laurea Specialistica. Università degli Studi di Bologna.

Fraser, B. T., & Congalton, R. G. (2021). Monitoring Fine-Scale Forest Health Using Unmanned Aerial Systems (UAS) Multispectral Models. *Remote Sensing*, 13(23), 4873. <https://doi.org/10.3390/rs13234873>

Goodbody, T. R. H., Coops N. C., Luther, J. E., Tompalski, P., Mulverhill, C., Frizzle, C., Fournier, R., Furze, S. & Herniman, S. 2021. Airborne laser scanning for quantifying criteria and indicators of sustainable forest management in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*. 51(7): 972-985. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0424>

Guo, T., Fang, Y., Cheng, T., Tian, Y., Zhu, Y., Chen, Q., Qiu, X. & Yao, X. (2019). Detection of wheat height using optimized multi-scan mode of LiDAR during the entire growth stages. *Computers and Electronic in Agriculture*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104959>

Huang, H., Li, Z., Gong, P., Cheng, X., Clinton, N., Cao, C., Ni, W. & Wang, L. (2011). Automated Methods for Measuring DBH and Tree Heights with a Commercial Scanning Lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Number 3 / March 2011, pp. 219-227(9). <https://doi.org/10.14358/PERS.77.3.219>

ISPRA, n.d. a. Ripristino delle dune di Piscinas.

ISPRA, n.d. b. Ripristino delle dune di Monte Russu.

ISPRA, n.d. c. Conservazione degli ecosistemi a San Rossore.

ISPRA, n.d. d. Restauro ambientale dell'ecosistema dunale di Focene.

ISPRA, n.d. e. Ripristino e salvaguardia della duna litoranea del Parco Nazionale del Circeo.

ISPRA, n.d. f. Ripristino della vegetazione dunale delle Marine di Chiatona e Lenne.

ISPRA, n.d. g. Intervento di ripristino della vegetazione dunale di Campomarino.

ISPRA, n.d. i. Restauro e ripristino di habitat costieri nell'area di Torre Guaceto.

Krok, G., Kraszewski, B. & Stereńczak, K. (2020). Application of terrestrial laser scanning in forest inventory – an overview of selected issues. *Forest Research Papers*, 81(4). 10.2478/frp-2020-0021

Lang, N., Kalischek, N., Armston, J., Schindler, K., Dubayah, R. & Wegner, J. D. (2022). Global canopy height regression and uncertainty estimation from GEDI LIDAR waveforms with deep ensembles. *Remote Sensing of Environment*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112760>

Lang, N., Kalischek, N., Armston, J., Schindler, K., Dubayah, R. & Wegner, J. D. (2022).

Lausch, A., Erasmi, S., King, D. J., Magdon, P., & Heurich, M. (2017). Understanding Forest Health with Remote Sensing-Part II—A Review of Approaches and Data Models. *Remote Sensing*, 9(2), 129. <https://doi.org/10.3390/rs9020129>

Levick, S. R., Metcalfe, K. & Bourke, A. (2021) Monitoring mangrove rehabilitation with terrestrial laser scanning. CSIRO, Australia.

Liang, X., Hyypä, J., Kaartinen, H., Holopainen, M., & Melkas, T. (2012). Detecting Changes in Forest Structure over Time with Bi-Temporal Terrestrial Laser Scanning Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1(3), 242-255. <https://doi.org/10.3390/ijgi1030242>

Liang, X., Kankare, Y., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M. & Vastaranta M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal Photogrammetry Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>.

Liang, X.; Kukko, A.; Hyypä, J.; Lehtomäki, M.; Pyörälä, J.; Yu, X.; Kaartinen, H.; Jaakkola, A.; Wang, Y. In-Situ Measurements from Mobile Platforms: An Emerging Approach to Address the Old Challenges Associated with Forest Inventories (2018). *ISPRS Journal Photogrammetry Remote Sensing*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.04.019>

Lu Y., Ranjitkar S., Harrison R. D., Xu J., Ou X., Ma X & He J. (2017). Selection of Native Tree Species for Subtropical Forest Restoration in Southwest China. *Plos one*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170418>

Meli P., Schweizer D., Winowiecki L.A., Chomba S., Aynekulu E. & Guariguata M. R., 2022. Mapping the information landscape of the United Nations Decade on Ecosystem Restoration Strategy. *Restoration Ecology*, 31(1). <https://doi.org/10.1111/rec.13810>

Merton, R. N. (1998) Monitoring community hysteresis using spectral shift analysis and the red-edge vegetation stress index.

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2013). Linee Guida per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) delle opere soggette a Valutazione di Impatto Ambientale – Indirizzi metodologici principali. In collaborazione con Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale e Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo.

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2015). Linee Guida per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) delle opere soggette a procedure di VIA – Indirizzi metodologici specifici: Biodiversità (Vegetazione, Flora, Fauna)

(Capitolo 6.4). In collaborazione con Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale e Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo.

Mirzabaev A. & Wuepper D. (2023). Economics of Ecosystem Restoration. *Annual Review of Resource Economics*, (15). <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-101422-085414>

Perra, M., n.d.. Lavori di risanamento e recupero ambientale dello stagno di Platamona. Integrato da ISPRA.

Pinter, J. P., Hatfield, J. L., Schepers, J. S., Barnes, E. M., Moran, M. S., Daughtry, C. & Upchurch, D. R. (2003). Remote Sensing for Crop Management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, pp. 647-664. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.647>

Proudman, A., Ramezani, M. & Fallon, M. (2021). Online Estimation of Diameter at Breast Height (DBH) of Forest Trees Using a Handheld LiDAR. *European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, Bonn, Germany, 2021, pp. 1-7. 10.1109/ECMR50962.2021.9568814

Rinaudo, F. (2009). Il laser scanner nel panorama attuale della geomatica. *Geomedia*.

Rosette, J., Suarez, J., North, P. & Los, S. (2011). Forestry Applications for Satellite Lidar Remote Sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, pp. 271-279. <https://doi.org/10.14358/PERS.77.3.271>

Sanesi, G. & Mairota P. (2010). Foreste e ciclo del carbonio in Italia: come mitigare il cambiamento climatico. *Fondazione Gas Natural*, pp. 13-18.

Snam (2024). Orizzonte Biodiversità. Anno XVI, numero 2.

Snam Rete Gas (2018). Progetto di ripristino vegetazionale. Rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave – Salgareda DN 300 (12") - DP 75 bar e opere connesse. Allegato 3: specifiche tecniche. Elaborato da Montalbano, verificato da Battisti e approvato da Luminari. Documento riservato di proprietà Snam Rete Gas.

Snam Rete Gas (2020a). Piano di Monitoraggio Ambientale. Rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave – Salgareda DN 300 (12") - DP 75 bar e opere connesse. Allegato 1: monitoraggio habitat. Elaborato da Tesei, verificato da Bonacoscia e approvato da Caruba. Documento riservato di proprietà Snam Rete Gas.

Snam Rete Gas (2020b). Piano di monitoraggio ambientale. Rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave – Salgareda DN 300 (12") - DP 75 bar e opere connesse. Allegato 2: monitoraggio flora e vegetazione. Elaborato da Tesei, verificato da Bonacoscia e approvato da Caruba. Documento riservato di proprietà Snam Rete Gas.

Snam Rete Gas (2022a). Progetto di ripristino vegetazionale. Rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave – Salgareda DN 300 (12") - DP 75 bar e opere connesse.

Elaborato da Montalbano, verificato da Battisti e approvato da Luminari. Documento riservato di proprietà Snam Rete Gas.

Snam Rete Gas (2022b). Progetto di ripristino vegetazionale. Rifacimento del metanodotto Pieve di Soligo – San Polo di Piave – Salgareda DN 300 (12") - DP 75 bar e opere connesse. Allegato 2: elenco piante arboree ed arbustive previste per il ripristino vegetazionale e il mascheramento degli impianti. Elaborato da Montalbano, verificato da Battisti e approvato da Luminari. Documento riservato di proprietà Snam Rete Gas.

Sofia, S., Sferlazza, S., Mariottini, A., Niccolini, M., Coppi, T., Miozzo, M., La Mantia, T. & Maetke, F (2021): a case study of the application of hand-held mobile laser scanning in the planning of an Italian forest (Alpe di Catenaia, Tuscany). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B2-2021, 763–770, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-763-2021>.

Studio Tecnico Conte e Pegorer (2021). Discarica per rifiuti inerti denominata “Postumia 2”. Piano di ripristino ambientale.

TAP, n.d. Piano di gestione del ripristino della biodiversità.

Toivonen, J., Kangas, A., Maltamo, M., Kukkonen, M. & Packalen, P. & (2023). Assessing biodiversity using forest structure indicators based on airborne laser scanning data. *Forest Ecology and Management*, 546. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121376>

Vandendaele, B., Martin-Ducup, O., Fournier, R. A., Pelletier, G. & Lejeune, P. (2022). Mobile Laser Scanning for Estimating Tree Structural Attributes in a Temperate Hardwood Forest. *Remote Sensing*, 14(18), 4522; <https://doi.org/10.3390/rs14184522>

Vermeer, M., Hay, J.A., Volgyes, D., Koma, Z., Breidenbach, J. & Fantin, D. S. M. (2023). Lidar-based Norwegian tree species detection using deep learning. Proceedings of the 5th Northern Lights Deep Learning Conference (NLDL), PMLR 233:228-234. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.06066>

Zhang, Z., Wang, T., Skidmore, A.K., Cao, F., She, G. & Cao, L. (2023). An improved area-based approach for estimating plot-level tree DBH from airborne LiDAR data. *Forest Ecosystem*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100089>

Zhao, L., Xu, G., Cui, Y., Kong, F., Gao, H. & Zhou, X. (2023). Post-Disaster Restoration and Reconstruction Assessment of the Jiuzhaigou Lake Landscape and a Resilience Development Pathway. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 3957. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053957>

Zwinkles, J. (2015). Light, electromagnetic spectrum. *Encyclopedia of Color Science and Technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_204-1

SITOGRAFIA

<https://gedi.umd.edu/mission/timeline/>

<https://heracomm.gruppohera.it/cambiamenti/cultura-della-sostenibilita/crediti-di-carbonio-cosa-sono-e-come-ottenerli>

<https://www.alspergis.altervista.org/lezione/05.html>

<https://www.arpa.veneto.it/++api++/servizi/altri-servizi/grandi-opere/i-progetti/rifacimento-metanodotti-snam-pieve-di-soligo-san-polo-di-piave-salgareda>

<https://www.chimica-online.it/download/spettro-elettromagnetico.htm>

<https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/gedi-lidar>

<https://www.mase.gov.it/pagina/rete-natura-2000>

<https://www.ruralhack.org/telerilevamenti-per-il-monitoraggio-delle-colture/>

<https://www.snam.it/it/esg/la-strategia-per-il-futuro/snam-carbon-neutrality.html>