

**Badia Tedalda Eolico SrL**

| Via Francesco Tamagno, 7 | 20124 Milano (MI) | P.IVA 12334000960 | PEC badiatedaldaeolicosrl@pec.it |

# Parco Eolico Poggio Tre Vescovi

Formato: A4

Scala: ---

Aprile 2023

**Progettazione specialistica**  
Studio Tecnico 3DMetrica  
Ing. Paolo Corradeghini  
Ordine Ing. SP. N. A1170

**PD.TOP.R.01.a**

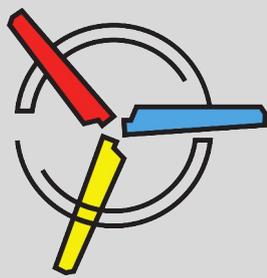
Progetto Parco eolico

**RILIEVO TOPOGRAFICO E AEROFOTOGRAMMETRICO**

**RELAZIONE TECNICO-METODOLOGICO**



Rev.	Data	Oggetto
a	01/04/2023	Prima emissione



## Parco eolico Poggio Tre Vescovi

### Proponente



**Badia Tedalda Eolico Srl**  
Via Francesco Tamagno, 7 - 20124 Milano (MI)

### Referente di progetto

Dott. Roberto Schirru

### Coordinamento tecnico



**ENVIarea stp snc**  
Ing. Cristina Rabozzi  
Dott. Agr. Elena Lanzi  
Dott. Agr. Andrea Vatteroni

### Progettazione opere civili e cantierizzazione



**ENKI srl**  
Ing. Andrea Mazzetti

### Progettazione opere di utenza e di rete per la connessione CP "Badia Tedalda"

Ing. Michele Pigliaru

### Geologia e geotecnica



**Sinergia srls**  
Dott. Geol. Luca Gardone

### Aspetti trasportistici



**Siemens Gamesa S.A.**  
Ing. Alessandro Noro

### Topografia



**3D Metrica** – Ing. Paolo Corradeghini

### Anemometria



**Skywind GmbH**  
Ing. Sasha Claes

### Studio di impatto ambientale, studio di incidenza ambientale, aspetti socio-economici e antropici



**ENVIarea stp snc**  
Ing. Cristina Rabozzi  
Dott. Agr. Elena Lanzi  
Dott. Agr. Andrea Vatteroni

### Paesaggio



**INLAND Landscape Architecture** – Arch. Andrea Meli

### Biodiversità, ecosistemi e reti ecologiche



**Consorzio Futuro in Ricerca**  
Dott. Lisa Brancaleoni  
(aspetti floristico-vegetazionali)  
(aspetti forestali, ecosistemi e reti ecologiche)  
(avifauna)

Dott. For. Ilaria Scatarzi

Dott. Biol. Marco Lucchesi

Dott. Dino Scaravelli

(chiroterofauna)

Archeologia



Cooperativa archeologia s.c.

Dott. Andrea Biondi

Acustica



TecnoCreo srl

Ing. Matteo Bertoneri

CEM e vibrazioni

Ing. Michele Pigliaru



**SOMMARIO**

---

<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>2</b>
1.1 Obiettivi delle indagini e scelte tecniche.....	2
1.2 Data dei rilievi.....	2
<b>2. STRUMENTAZIONE IMPIEGATA.....</b>	<b>3</b>
2.1 Hardware.....	3
2.2 Software.....	5
<b>3. DATI CARTOGRAFICI PREESISTENTI.....</b>	<b>6</b>
<b>4. IL RILIEVO LIDAR.....</b>	<b>7</b>
4.1 Descrizione della tecnologia LIDAR.....	7
4.2 Basi operative.....	8
4.3 Pianificazione delle missioni di volo.....	9
4.4 Misure dei punti di controllo.....	10
4.5 Post elaborazione dei dati Lidar.....	11
<b>5. IL RILIEVO AEROFOTOGRAMMETRICO.....</b>	<b>12</b>
5.1 Il principio fotogrammetrico.....	12
5.2 Programmazione delle operazioni.....	13
5.3 Modellazione fotogrammetrica Structure from Motion.....	15
5.3.1 Principi di modellazione tridimensionale.....	15
5.3.2 Elaborazione dei dati fotogrammetrici.....	15
<b>6. ACCURATEZZA E SISTEMI DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>19</b>
6.1 Accuratezza.....	19
6.2 Sistema di riferimento e quote.....	19
<b>7. TRATTAMENTO DELLE NUVOLE DI PUNTI E MODELLO DIGITALE DEL TERRENO DTM.....</b>	<b>20</b>
<b>8. RAPPRESENTAZIONE PLANIMETRICA VETTORIALE BIDIMENSIONALE.....</b>	<b>24</b>

\* \* \*



## 1. PREMESSA

La presente relazione tecnico-metodologica descrive le attività di **rilievo tecnico-topografico** condotte all'interno dell'area di indagine per supportare gli studi specialistici e la progettazione delle opere e degli interventi in progetto.

### 1.1 Obiettivi delle indagini e scelte tecniche

L'obiettivo primario delle indagini e dei rilievi è l'aggiornamento dello stato conoscitivo dei luoghi interessati dal Parco Eolico in oggetto sotto un aspetto topografico, morfologico, altimetrico ed orografico.

Viste le caratteristiche dell'area, la sua estensione (circa 7 km lineari di crinale montuoso), la presenza di vegetazione al suolo e la ridotta accessibilità con mezzi motorizzati si è ritenuto opportuno procedere all'acquisizione dei dati mediante **tecnologia Lidar e Fotogrammetrica** con sensori trasportati da droni in volo sulle stesse aree.

### 1.2 Data dei rilievi

Le attività di rilievo si sono condotte nel corso dell'Estate 2022 ed in particolare nei giorni: **31.05.2022, 6.8.2022 e 7.9.2022**.

Figura 1. Immagine aerea di parte dell'area di indagine





## 2. STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Per lo svolgimento delle attività di rilievo è stata impiegata la seguente strumentazione hardware e software.

### 2.1 Hardware

#### Ricevitore satellitare geodetico (GNSS)

*Trimble R2* – chip avanzato *Trimble Maxwell 6 custom GPS* – multicostellazione (GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo) – 220 Canali – Tracciamento GPS L1/L2; SBAS a 4 canali; correlatore multiplo ad alta precisione per misurazioni di pseudorange L1/L2.

Impiegato per il rilievo di coordinate di punti a terra.

Figura 2. Ricevitore satellitare GNSS



#### Drone/UAV

*DJI Matrice 300 RTK*, mezzo aereo a pilotaggio remoto, con peso massimo al decollo MTOM 9 Kg – GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo.

Impiegato per il trasporto dei sensori di acquisizione dati.

#### Fotocamera digitale per aerofotogrammetria

*DJI Zenmuse P1* - sensore Full Frame (FX), risoluzione 40 Mega Pixel, ottica 35mm

Impiegata per l'acquisizione di immagini aeree e per la presa aerofotogrammetrica.



Figura 3. Mezzo aereo DJI Matrice 300 RTK e fotocamera DJI Zenmuse P1



#### Sensore Lidar

*LiAirV70 Greenvally International* - sensore LiVox Avia integrato da IMU e fotocamera Sony Alfa 5100 + ottica 16mm

Figura 4. Mezzo aereo DJI Matrice 300 RTK e sensore Lidar LiAirV70





## 2.2 Software

- **UGCS Enterprise** – Pianificazione di missioni di volo automatiche per mezzi aerei (droni/UAV);
- **Trimble Access** – Controllo ed acquisizione dati GNSS;
- **Greenvalley International LiGeoreference** – Georeferenziazione, colorazione ed orientamento di nuvola di punti da acquisizione Lidar;
- **Adobe Lightroom** – Editing di fotografie della presa fotogrammetrica;
- **Agisoft Metashape Pro** – Elaborazione fotogrammetrica;
- **Trimble Business Center** – Trattamento ed elaborazione di misure topografiche;
- **Verto3K** – Conversione di misure topografiche tra Sistemi di Riferimento plano-altimetrici;
- **Greenvalley International Lidar360** – Editing e classificazione di nuvole di punti;
- **Cloud Compare** – Editing di nuvole di punti (open source);
- **QGIS** – GIS/SIT (open source);
- **Bricscad Pro** - CAD 2D/3D.

Figura 5. Immagine aerea di parte dell'area di indagine





### 3. DATI CARTOGRAFICI PREESISTENTI

La pianificazione delle operazioni e la verifica preliminare degli output è stata condotta sulla base dei dati cartografici ed orografici preesistenti.

In particolare, per le zone di indagine, si è potuto reperire ed utilizzare le seguenti informazioni:

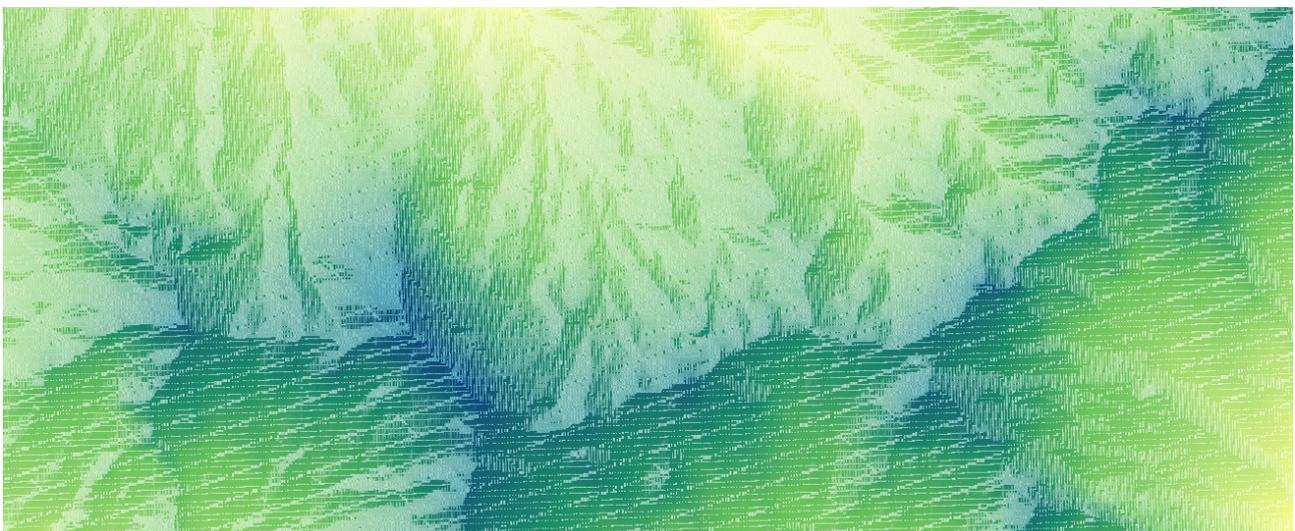
- **CTR – Carta Tecnica Regionale** in scala 1:10.000 della Regione Toscana (anno 1996);
- **DTM Tinality – Modello Digitale del Terreno** con maglia 10 m/pixel (anno 2007 – INGV Pisa)

Appare evidente come, data l'epoca di realizzazione dei dati disponibili ed il loro ridotto dettaglio descrittivo a terra, si sia reso necessario un rilievo di approfondimento anche per i livelli preliminari delle opere proposte.

Figura 6. Stralcio di CTR in scala 1:10.000 per l'area di indagine



Figura 7. Parte di DTM Tinality interessante l'area di indagine





## 4. IL RILIEVO LIDAR

La maggior parte dei dati di campo che è stata impiegata per il raggiungimento degli obiettivi del rilievo deriva dall'acquisizione con sensore Lidar trasportato da drone in volo sulle aree.

### 4.1 Descrizione della tecnologia LIDAR

Il *LIDAR* (*Light Detection and Ranging*) è una tecnica di telerilevamento "attivo" per l'acquisizione di informazioni ad alta risoluzione.

Il rilievo viene effettuato tramite mezzo aereo sul quale è installato un laser scanner composto da un trasmettitore (un laser), da un ricevitore (un telescopio), da un sistema di acquisizione dati e da un'unità inerziale di movimento (IMU) in grado di ricevere informazioni da tutti i sensori e gli strumenti afferenti al sistema.

La peculiarità del sistema è l'altissima velocità di acquisizione dei dati abbinata ad un'elevata risoluzione oltre alla capacità di penetrare (in parte rilevante per gli scopi topografici) la vegetazione per il movimento costante del sistema.

L'intero sistema per l'acquisizione dei dati Lidar è costituito dalle seguenti componenti:

1. Il distanziometro laser (laser scanner), che emette uno stretto impulso laser ad alta frequenza deviato perpendicolarmente alla traiettoria da uno specchio rotante. Un sensore registra l'intensità del segnale riflesso e la quota del terreno (calcolata sulla base della differenza di tempo intercorsa tra il segnale emesso e quello riflesso)
2. Il sistema di posizionamento satellitare (GPS) e il sistema inerziale di navigazione (INS), installati a bordo, per determinare la posizione (x, y) e l'orientamento del mezzo aereo in ogni istante.
3. Fotocamera digitale per l'acquisizione di immagini durante la registrazione Lidar, successivamente impiegate per la colorazione della nuvola di punti.
4. Stazione GPS a terra, posizionata su punti noti (appositamente materializzati), per correggere la posizione del mezzo aereo in fase di post processing dei dati.

L'elaborazione dei dati Lidar è complessa, anche se in buona parte automatica.

L'intero processo di calcolo e rettifica dei punti laser è preceduto da una fase di calibrazione del sistema (effettuata prima dell'inizio del rilievo).

L'elaborazione dei dati si svolge in quattro fasi:

1. Il calcolo della traiettoria e dell'orientazione del sensore
2. La generazione di un archivio di punti XYZ
3. La georeferenziazione dei punti XYZ in relazione alle coordinate GNSS del ricevitore base
4. La colorazione della nuvola di punti sulla base delle immagini scattate durante l'acquisizione.

Il risultato dell'elaborazione è una nuvola di punti ad alta densità di informazioni, colorata e georeferenzata.

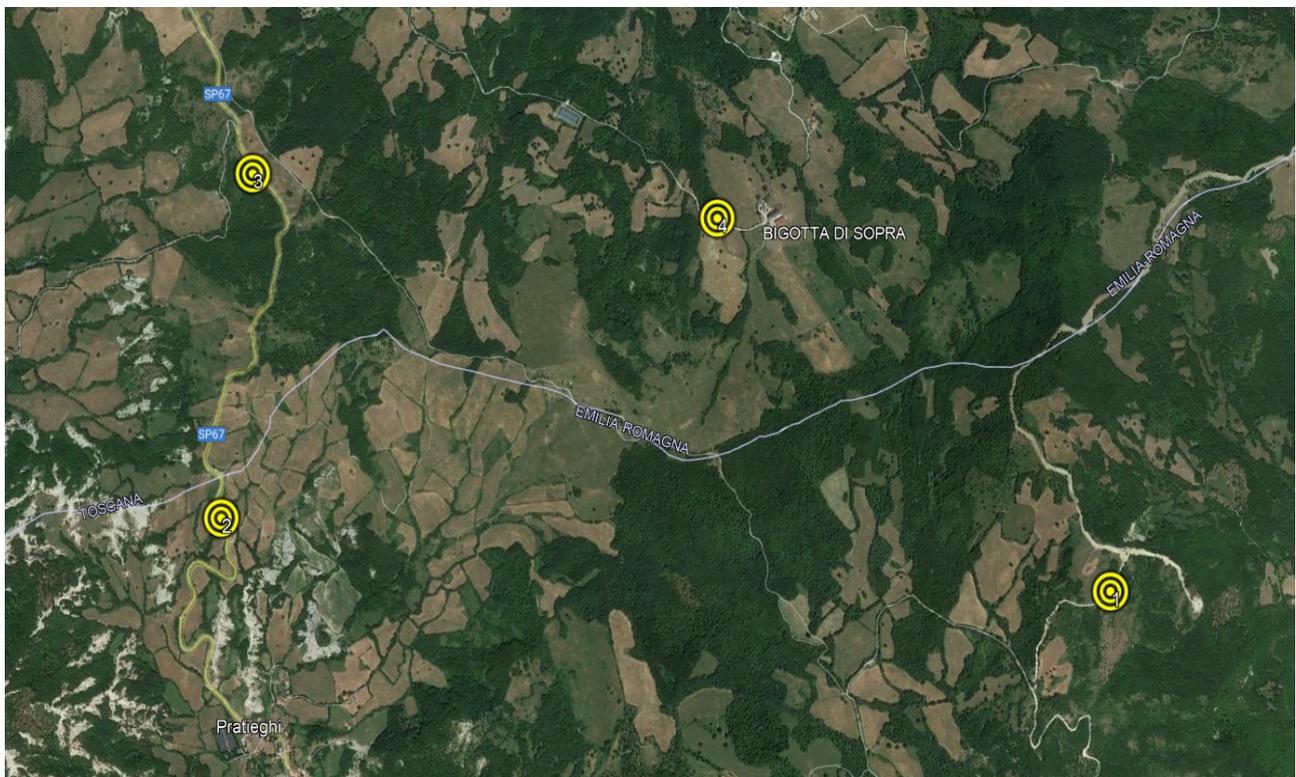


## 4.2 Basi operative

Vista l'estensione dell'area e la necessità di mantenere un controllo visivo sul drone in volo, da parte del pilota a terra, si sono scelte quattro basi operative da cui si sono effettuati altrettanti decolli ed atterraggi e registrazioni di dati Lidar.

La prima era situata in corrispondenza del cantiere del nuovo metanodotto SNAM, nella parte sud orientale dell'area di indagine; la seconda lungo la SP67, nella porzione occidentale dell'area ed in corrispondenza del confine regionale Toscana-Emilia Romagna, la terza era poco a nord dalla seconda ed in corrispondenza del limite nord occidentale dell'intervento, nella direzione dell'abitato di Balza, la quarta ed ultima è stata istituita presso le case di Bigotta di Sopra.

Figura 8. Localizzazione delle basi operative per il rilievo Lidar



Per ogni base operativa è stata approntata la seguente strumentazione:

- Antenna GNSS per la registrazione dei dati grezzi di una base fissa;
- Antenna GNSS per il backup della precedente;
- Antenna GNSS per le correzioni RTK inviate al GNSS del drone in volo;
- Target ad alta visibilità per il controllo dell'output;
- Notebook per il controllo delle missioni di volo programmato eseguite dal drone.



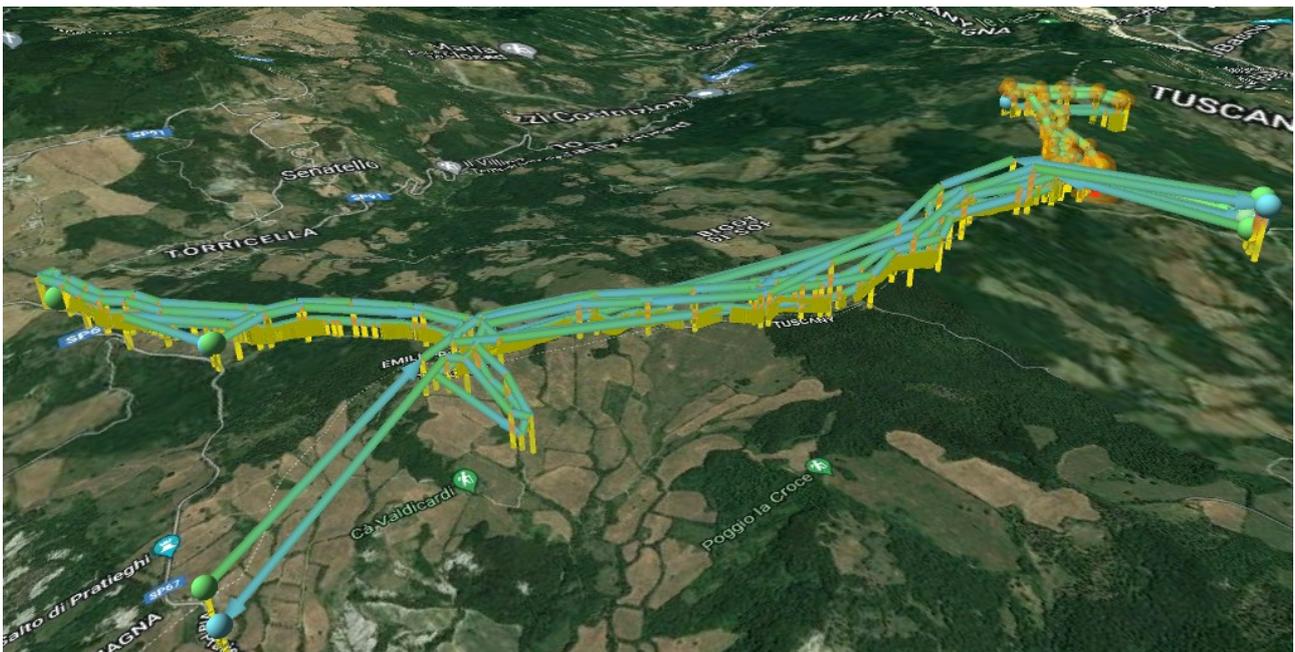
Figura 9. Base operativa N.3 lungo la SP67 in territorio Emiliano-Romagnolo



#### 4.3 Pianificazione delle missioni di volo

Per efficientare l'acquisizione delle informazioni a terra e la durata delle batterie del drone sono state programmate (ed eseguite) missioni di volo automatico per i sorvoli sull'area di indagine.

Figura 10. Missioni di volo automatiche programmate per i sorvoli Lidar nel software UGCS





Il software impiegato è stato *UGCS (Universal Ground Station Software) Pro* e le missioni sono state programmate in modo che:

- la quota del drone in volo fosse pari a 120 m rispetto al terreno\*;
- la velocità di crociera non fosse superiore a 5 m/s.

\* La distanza drone-terreno è stata mantenuta costante durante tutte le missioni di volo grazie all'utilizzo di un modello digitale di elevazione (DTM 10x10 m/pixel Tintaly) impiegato come riferimento altimetrico da seguire (modalità "terrain follow"). Ciò ha garantito una maggiore robustezza dei dati Lidar caratterizzati da distanze costanti tra emettitore e terreno oggetti del rilievo.

#### 4.4 Misure dei punti di controllo

Benchè la tecnologia Lidar sia di tipo "attivo" si è ritenuto opportuno valutare la robustezza e l'affidabilità dell'output (nuvola di punti) mediante il confronto con le coordinate di punti di controllo opportunamente posizionati nell'area di indagine.

Per ogni base operativa sono stati posizionati a terra due target ad alta visibilità e due chiodi topografici, per un totale di venti punti di controllo, distribuiti

Figura 11. Punto di controllo identificato con target ad alta visibilità e misura GNSS delle sue coordinate.



L'acquisizione delle loro coordinate è stata effettuata con strumentazione satellitare GNSS a doppia frequenza (L1+L2).

Si è impiegato un ricevitore rover in modalità *nRTK (network Real Time Kinematic)* con correzione in tempo reale della posizione sulla base delle informazioni provenienti dalla rete di stazioni fisse sul territorio nazionale (Rete *SmartNet Leica Geosystems*).



La connessione e la trasmissione di informazioni al fine del posizionamento è avvenuta in modalità GSM/GPRS. I ricevitori hanno sfruttato le costellazioni di satelliti GPS, GLONASS, GALILEO e BEIDOU. Le coordinate dei punti battuti sono state acquisite nel sistema di riferimento ellissoidico *ETRF2000 RDN2008 (EPSG 6706)* e successivamente convertite nel sistema di riferimento cartografico di destinazione, *Roma40 – GaussBoaga – Fuso Ovest (EPSG3003)*, tramite l'impiego di software Verto3K ed opportuni grigliati di trasformazione rilasciati dall'*Istituto Geografico Militare (IGM)*.

#### 4.5 Post elaborazione dei dati Lidar

L'acquisizione tramite Lidar ottiene, già al termine della registrazione dei dati, una nuvola di punti, grezza, nello spazio tridimensionale.

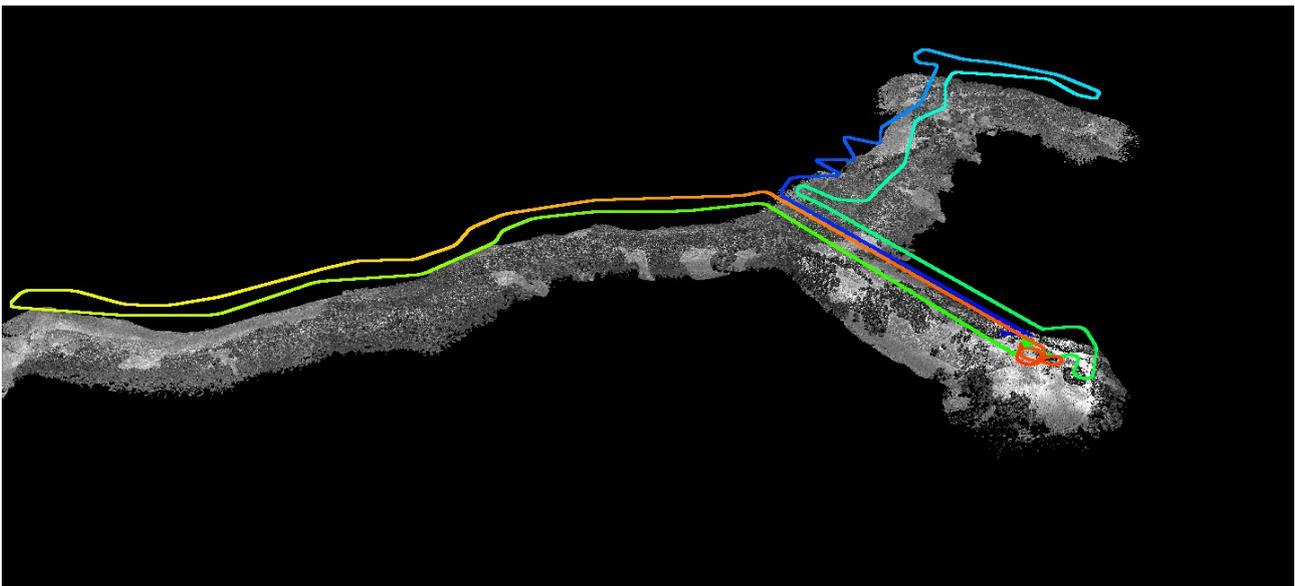
Tuttavia, tale informazione, necessita di un'elaborazione successiva, in *post processing*, al fine di renderla utilizzabile per gli scopi di questo lavoro.

Durante la fase di post elaborazione i seguenti dati sono trattati ed elaborati per restituire in output una nuvola di punti 3D, completa, colorata, orientata e georeferenziata:

- Dati grezzi GNSS della base a terra;
- Coordinate note del punto di posizione della base a terra;
- Dati grezzi GNSS dell'antenna rover collegata al Lidar;
- Dati di navigazione registrati dal sistema inerziale del Lidar;
- Fotografie digitali.

L'elaborazione è avvenuta all'interno del software specialistico *LiGeoreference*.

Figura 12. Nuvola di punti (non ancora colorata) da rilievo Lidar di parte dell'area di indagine e posizione delle traiettorie di volo.





## 5. IL RILIEVO AEROFOTOGRAMMETRICO

Si ritiene che la migliore caratterizzazione delle aree oggetto di indagine tramite strumentazione trasportata da drone avvenga a seguito dell'integrazione di tecnologie e tecniche di acquisizioni diverse.

È per questo motivo che si è scelto di condurre anche una campagna di acquisizione di immagini aeree per la successiva elaborazione fotogrammetrica dei luoghi.

### 5.1 Il principio fotogrammetrico

La fotogrammetria consente l'acquisizione di informazioni metriche di oggetti a partire dall'elaborazione di immagini fotografiche, scattate da punti di vista differenti. L'aerofotogrammetria impiega immagini scattate da mezzo aereo, nel caso specifico da drone. Le fotografie riprese dalle fotocamere impiegate sono immagini digitali, pertanto è più corretto riferirsi a *tecniche di fotogrammetria digitale*.

Non si tratta tuttavia di tecniche fotogrammetriche pure, analoghe a quelle impiegate per la produzione del repertorio cartografico nazionale tuttora in uso. Si tratta piuttosto di elaborazioni digitali condotte con algoritmi denominati *Structure from Motion* che, grazie alle potenze di calcolo disponibili nelle workstation "comuni" ed a tecnologia di computer vision, riescono a creare modelli tridimensionali a partire da immagini riprese da fotocamere *non calibrate e prive del certificato di calibrazione metrica*, quasi imprescindibile nella fotogrammetria classica. Si fa tuttavia presente che le equazioni risolte nella fase computazionale (descritta in seguito) sono le medesime equazioni della fotogrammetria classica: le equazioni di collinearità, fornendo al metodo robustezza e validità nella qualità e nell'affidabilità degli output prodotti.

La fotogrammetria consente di definire la posizione, la forma e le dimensioni di oggetti sul terreno (o dello stesso terreno), utilizzando le informazioni contenute in immagini fotografiche degli stessi oggetti, riprese da punti diversi.

Per poter determinare le posizioni dei punti di un oggetto nell'ambiente reale o del territorio utilizzando le posizioni dei punti corrispondenti sulla fotografia, è necessario definire le relazioni geometriche fra le posizioni tridimensionali dei punti dell'oggetto e quelle delle loro immagini sul piano della fotografia. A ogni punto dell'oggetto tridimensionale corrisponde un punto omologo sull'immagine.

Una sola immagine piana non contiene informazioni sufficienti a definire la posizione e le dimensioni di un oggetto tridimensionale (lo sarebbe solo se anche l'oggetto fosse piano). Tuttavia queste informazioni possono essere ottenute disponendo di due fotografie che riprendono lo stesso oggetto osservato da due differenti punti di presa (un'unica camera che riprende l'oggetto in posizioni e in tempi diversi).

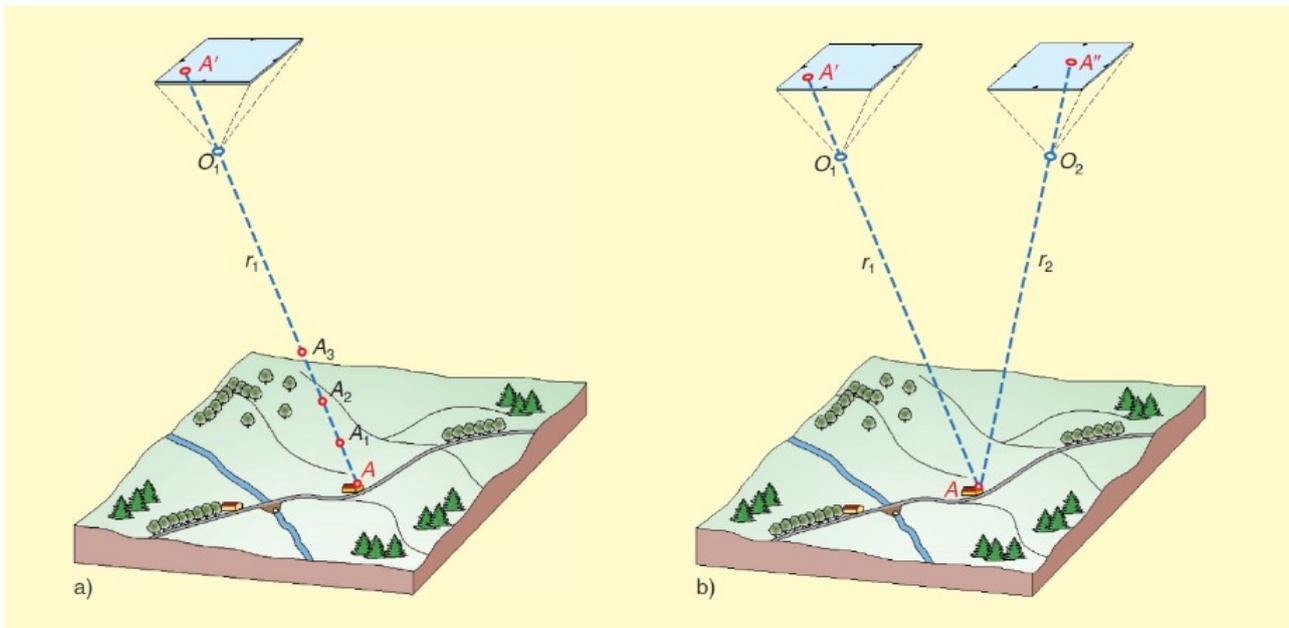
Nel rilievo fotogrammetrico tradizionale si riconoscono sempre le seguenti fasi:

- acquisizione: operazioni riguardanti la presa delle immagini fotografiche;
- orientamento: operazioni per la determinazione dei parametri che consentono di posizionare i centri di presa e la posizione dei piani dei sensori fotografici con la stessa posizione nello spazio che essi avevano al momento della presa, quindi la ricostruzione della forma e delle dimensioni dell'oggetto ripreso;



- restituzione: operazioni che consentono di effettuare misure sul modello dell'oggetto ricostruito, utilizzando strumenti detti restitutori, in grado di produrre, come risultato finale un modello tridimensionale, un disegno, un insieme numerico di coordinate o una immagine rettificata e raddrizzata (ortofoto).

Figura 13. Schematizzazione del principio fotogrammetrico



## 5.2 Programmazione delle operazioni

Anche l'acquisizione fotogrammetrica si è svolta sulla base di missioni di volo automatico e programmate.

Tuttavia, a differenza dell'acquisizione Lidar, i parametri che governano la presa fotogrammetrica sono superiori in numero e, nel caso specifico, sono stati:

- GSD (Ground Sampling Distance)\*: non superiore a 3 cm/pixel;
- Velocità di crociera: 6 m/s;
- Sovrapposizione tra fotogrammi consecutivi: 80%;
- Inclinazione della fotocamera: 90° rispetto al piano orizzontale (*presa nadirale*);

\* Il G.S.D. (Ground Sampling Distance) rappresenta la risoluzione spaziale ossia la distanza, misurata a terra, tra due pixel vicini dell'immagine. Il GSD è quindi la dimensione del pixel sul campo. Al decrescere del valore del GSD aumenta il dettaglio della fotografia. Esso dipende dalla risoluzione della macchina fotografica, dalla lunghezza focale della sua ottica e dall'altezza di volo. Non si deve tuttavia confondere il valore del GSD con quello dell'accuratezza del rilievo. Se le fotografie sono pianificate per un GSD di 1 cm non significa che l'accuratezza del rilievo restituito sia di 1 cm.



Figura 14. Due immagini del dataset derivante dal sorvolo e dalla presa aerofotogrammetrica





### 5.3 Modellazione fotogrammetrica Structure from Motion

Terminate le operazioni fotogrammetriche di campo i dati sono stati elaborati per restituire in output i prodotti del processo.

Si è impiegato il software di fotogrammetrica *Agisoft Metashape Professional* che ha utilizzato le immagini digitali scattate e le misure GNSS degli stessi punti/target citati nel caso del rilievo Lidar , per produrre una nuvola di punti 3D, colorata, orientata e georeferenziata, oltre che modelli digitali di elevazione ed un ortomosaico ad alta risoluzione.

#### 5.3.1 *Principi di modellazione tridimensionale*

Tramite la modellazione tridimensionale si ricostruisce ciò che si vede realmente ed in particolare la forma, l'illuminazione e la distribuzione del colore in un dato oggetto o scena reale rappresentati in una o più immagini.

Tale tecnica, a partire dalle tecniche fotogrammetriche classiche ed integrandole con le moderne tecnologie di *imaging* su immagini digitali sempre più definite consente, nello specifico, di estrarre punti da immagini attraverso parametri fotografici: lunghezza focale, dimensioni del sensore, distorsioni e pixel. A differenza delle tecniche fotogrammetriche tradizionali, che richiedono l'utilizzo di una fotocamera calibrata o di una camera fotogrammetrica, per la *Structure From Motion* si può usare una qualsiasi fotocamera, di cui è necessario conoscere solo alcuni parametri, purché si rilevino direttamente sull'oggetto o nell'ambiente misure che possano servire per il dimensionamento della nuvola di punti.

In fase di elaborazione si riesce a calcolare la posizione nello spazio della fotocamera rispetto all'oggetto e individuare i punti in comune in più immagini. Verranno quindi calcolate le coordinate dei punti nello spazio, che costituiranno una nuvola di punti.

Trattandosi di una elaborazione di immagini e non di un rilievo topografico tramite sensori ottici, la nuvola di punti apparirà colorata, poiché i vertici ereditano il colore dei pixel.

La procedura *Structure From Motion* si compone di quattro fasi successive:

- Rilevamento ed estrazione delle features, individuazione dei punti di legame (keypoints) e loro descrizione tramite vettori di numeri (descriptor);
- Accoppiamento delle feature: una volta individuati ed estratti i punti omologhi, viene eseguito il loro accoppiamento (matching) nelle diverse immagini;
- Stima dei parametri della camera: calcolo dei parametri di orientamento interno ed esterno attraverso una procedura iterativa;
- Esecuzione del matching denso: calcolo di una nuvola di punti più completa attraverso algoritmi di dense image matching.

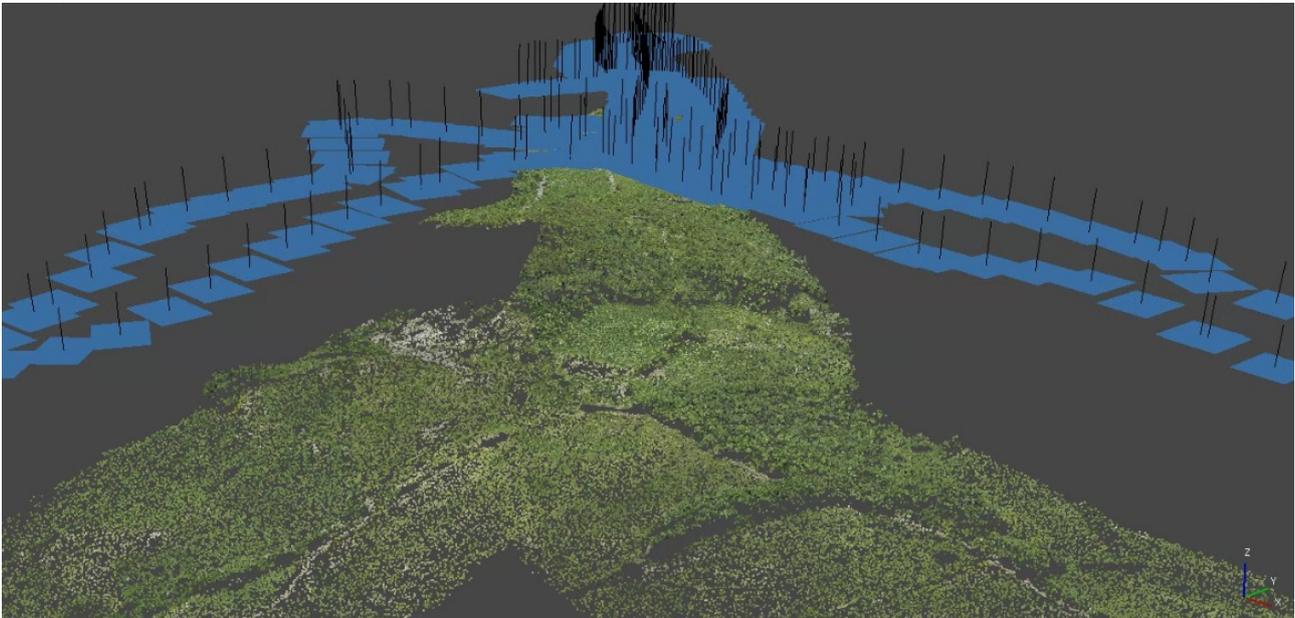
#### 5.3.2 *Elaborazione dei dati fotogrammetrici*

Inizialmente tutte le immagini scattate durante le operazioni di sorvolo e rilievo sono caricate all'interno del software.



Le immagini vengono poi successivamente analizzate allo scopo di trovare i punti comuni tra di esse, i *matching points* sui quali verranno basate le successive elaborazioni. Questi punti formano una nuvola di punti a ridotta densità denominata nuvola sparsa.

Figura 15. Nuvola di punti sparsa e posizione delle immagini del dataset



Il mezzo aereo impiegato per le operazioni di volo e presa fotografica era dotato di antenna GNSS di elevata precisione che ne ha permesso il posizionamento differenziale RTK. Ciò ha implicato che tutte le immagini riprese, ed impiegate nel processo di elaborazione, avessero una loro posizione nello spazio tridimensionale individuata con precisione centimetrica, irrobustendo il dataset da trattare e conferendo maggiore attendibilità ai risultati del processo

Figura 16. Nuvola di punti densa





A partire dalla nuvola sparsa e dopo l'orientamento della stessa mediante le coordinate di punti noti (in un processo che prende il nome di *bundle block adjustment*) il software procede al calcolo che richiede maggiori risorse in termini di tempo e prestazioni del calcolatore: la generazione della nuvola densa. Ai punti della nuvola sparsa si aggiungono altri punti a partire dalle informazioni grafiche contenute nelle immagini scattate in volo.

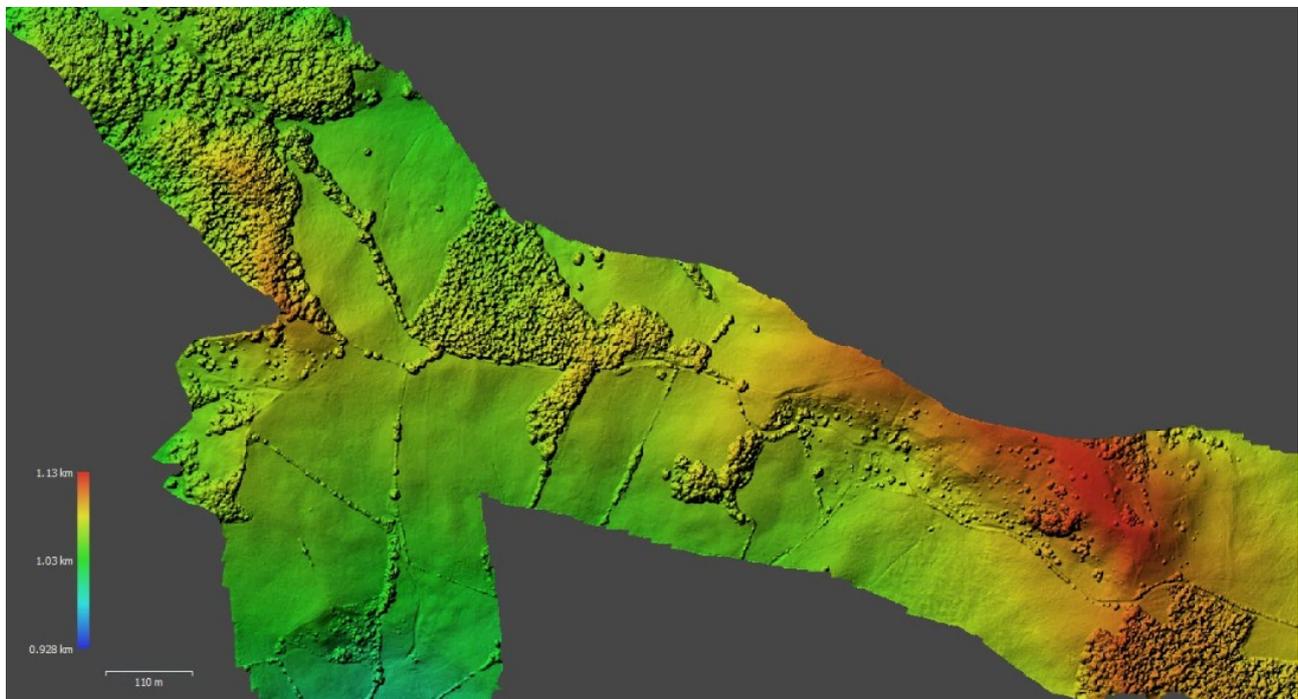
Al termine del processo fotogrammetrico/*structure from motion* il risultato è una nuvola di punti formata da milioni di punti nello spazio tridimensionale. A partire da questa informazione si è proceduto all'elaborazione ed alla produzione di ulteriori output: il modello digitale di elevazione e l'ortofoto.

Un Modello Digitale di Elevazione (*Digital Elevation Model*) – DEM – è una generica superficie statistica in cui ad un numero finito di coppie (X,Y) viene attribuita un'elevazione, una Z, corrispondente. Nell'uso comune il DEM è riferito alla topografia terrestre ma può riguardare anche altre superfici: la superficie piezometrica di una falda o il piano di scorrimento profondo di una frana, la superficie delle chiome degli alberi di un bosco, ecc.

A partire dalla nuvola di punti fotogrammetrica è stato possibile produrre un particolare DEM che prende il nome di DSM (*Digital Surface Model* – Modello Digitale della Superficie) che descriva la superficie del terreno comprensiva degli oggetti che ci sono sopra (alberi, manufatti, ...).

Il DSM prodotto con i dati del processo fotogrammetrico ha una risoluzione nativa di 5 cm/pixel.

Figura 17. DSM (Digital Surface Model) di parte dell'area rilevata





Il processo fotogrammetrico si conclude con la generazione dell'ortomosaico. L'ortomosaico, anche noto come ortofoto, è una fotografia che ha la proprietà di essere una proiezione ortografica.

Nella vista ortografica tutte le parti verticali non sono visibili in quanto è come se ciascuna di esse fosse vista proprio dalla sua sommità.

La creazione dell'ortomosaico segue due step:

1. Ortorettificazione delle fotografie per eliminare le distorsioni prospettiche;
2. Mosaicatura delle fotografie rettificate a creare un unico elemento.

Per il fatto che un'ortofoto deriva dai prodotti del processo fotogrammetrico, basato su misure topografiche di appoggio, scalato, orientato e georeferenziato, un'ortofoto può essere misurate planimetricamente all'interno di software CAD e GIS e supportare, qualitativamente ma anche planimetricamente analisi specialistiche e scelte progettuali.

L'ortomosaico generato ha una risoluzione di 5 cm/pixel.

**Figura 18. Ortomosaico (dettaglio) di parte dell'area rilevata**





## 6. ACCURATEZZA E SISTEMI DI RIFERIMENTO

Al termine dei processi e delle elaborazioni che hanno portato alla generazione delle nuvole di punti tridimensionali, da rilievo Lidar e da elaborazione fotogrammetrica, è stata condotta una stima dell'accuratezza dei modelli.

### 6.1 Accuratezza

La stima dell'accuratezza è stata condotta mediante l'analisi e la verifica di punti rilevati in campo con antenna GNSS (target ed altri elementi a buona visibilità presenti a terra).

Il principio impiegato è stato quello dell'analisi statistica degli scarti quadratici medi. La valutazione degli scarti tra la posizione rilevata sul campo e la posizione restituita dai modelli elaborati rende possibile stimare l'accuratezza del rilievo.

A valle di questo controllo si stima che l'accuratezza media sulla posizione tridimensionale dei punti dei modelli restituiti, nella totalità dell'area di indagine, sia inferiore a 15 cm.

### 6.2 Sistema di riferimento e quote

Il sistema di riferimento impiegato per le elaborazioni fotogrammetriche, durante le acquisizioni Lidar e le misure GNSS è identificato dal codice *EPSG 6706* (i codici EPSG fanno riferimento alla banca dati *European Petroleum Survey Group - Geodetic Parameter Dataset* - e sono considerati standard a livello globale) ed è legato alla rete di stazioni permanenti utilizzate per l'acquisizione delle coordinate dei punti a terra. Si tratta del sistema di riferimento cartografico *ETRF2000 epoca 2008.0 (RDN2008)*. Tale sistema di riferimento rappresenta lo standard a livello nazionale a seguito dei contenuti del D.P.C.M. 30.11.2011

Tuttavia, per venire incontro alle esigenze della committenza nel rispetto delle esigenze specifiche e della cartografia disponibile e citata precedentemente si è restituito l'output nel Sistema di Riferimento Roma 40 - Proiezione di Gauss-Boaga – Fuso Ovest (EPSG 3003).

La conversione di coordinate planimetriche tra *datum* diversi è stata condotta mediante l'uso di software interpolatore Verto3K e grigliato di trasformazione *278.GK2* emanato dall'Istituto Geografico Militare (IGM).

Le quote sono riferite al livello medio del mare e si sono determinate a seguito di conversione da quote ellissoidiche acquisite da antenna GNSS a quote ortometriche ancora mediante l'impiego di software e grigliati citati qui sopra.



## 7. TRATTAMENTO DELLE NUVOLE DI PUNTI E MODELLO DIGITALE DEL TERRENO DTM

La capacità di penetrare la vegetazione del sistema Lidar, dovuta all'emissione di una grande quantità di punti laser da un sistema in movimento, ha permesso di ottenere una nuvola di punti all'interno della quale fossero presenti anche elementi caratteristici del terreno al di sotto delle alberature.

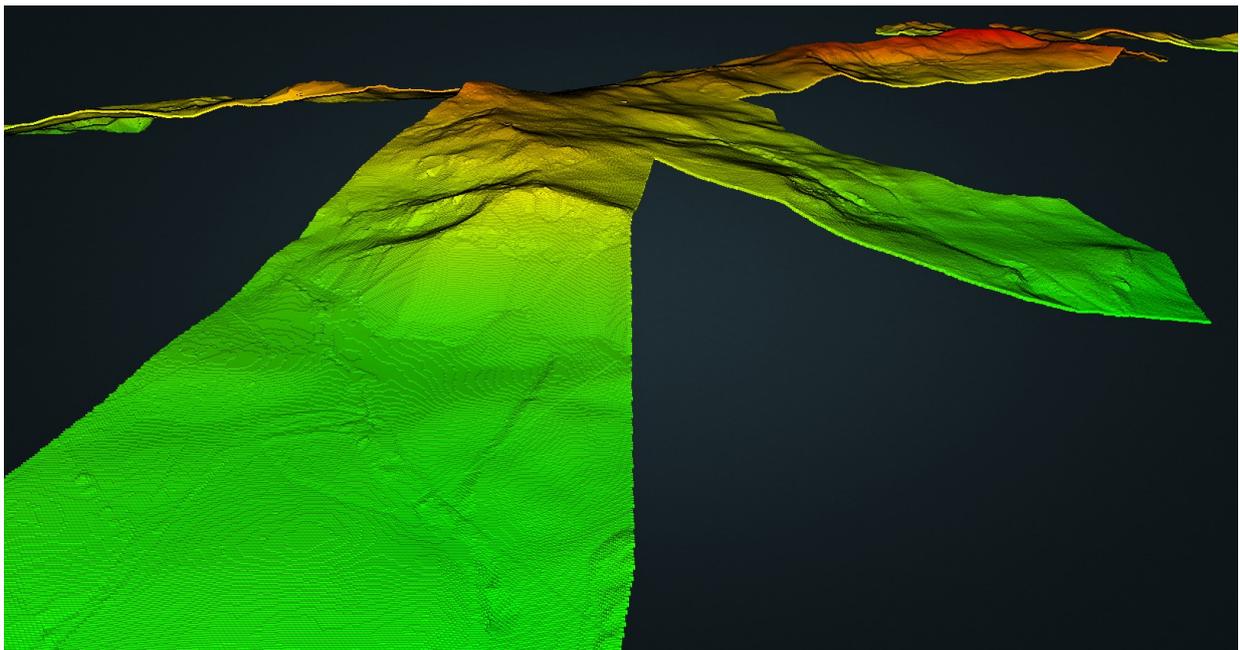
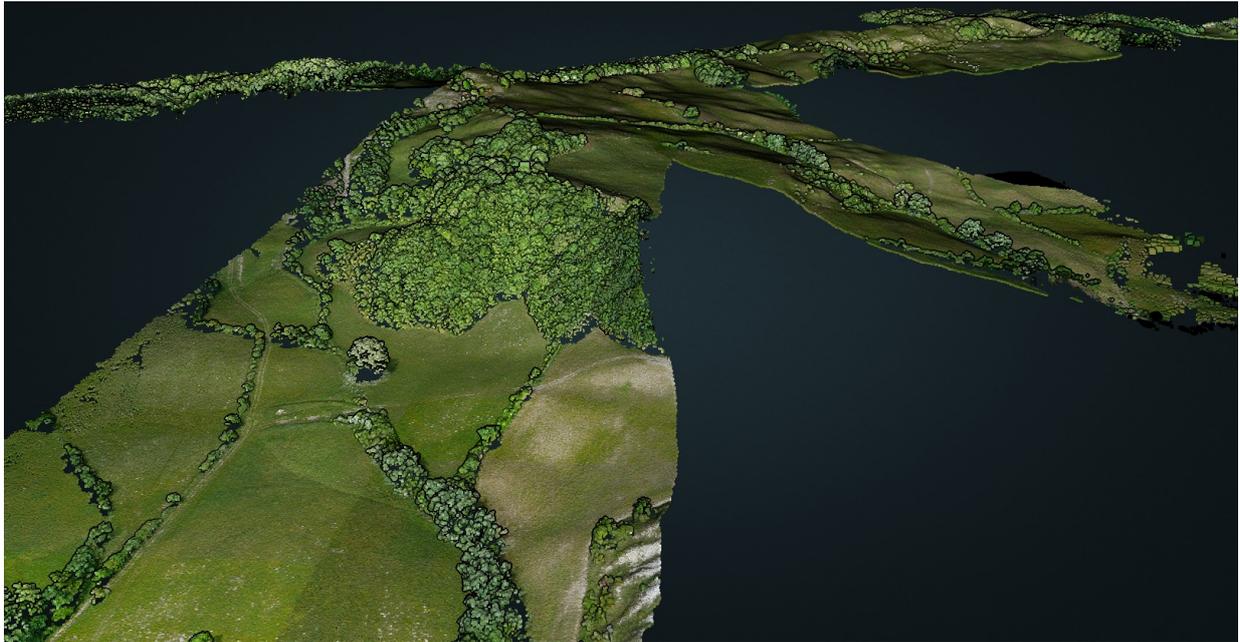
Sfruttando queste informazioni è stato possibile effettuare un processo semi-automatico di classificazione della nuvola di punti che ha permesso di distinguere il terreno dal resto e creare, da qui, un modello digitale di elevazione specificatamente riferito ad esso: il DTM (*Digital Terrain Model - Modello Digitale del Terreno*).

Inoltre, la possibilità di discretizzare i punti del solo terreno, rispetto ai restanti elementi della scena, ha permesso di avere, in maniera distribuita all'interno dell'area di indagine, dati puntuali relativi all'altimetria del suolo, il tutto riferito al sistema di riferimento di progetto.

Il processo è stato condotto all'interno del software specialistico *Lidar360 (Greenvalley International)* dove si sono susseguiti i seguenti step operativi:

1. Filtraggio della nuvola di punti per l'eliminazione del rumore e dei punti isolati non significativi (*outliers*);
2. Classificazione dei punti mediante l'applicazione di algoritmi di estrazione del terreno basati sulle evidenze e le procedure riportate all'interno degli studi di *Zhao et al. (Improved progressive TIN densification filtering algorithm for airborne LiDAR data in forested areas; Zhao X Q, Guo Q H, Su Y J and Xue B L; ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 117:79-91)*;
3. Interpolazione della nuvola di punti rappresentativi del solo terreno al fine di riempire i buchi causati dalla presenza di aree vegetate, escluse dal filtro di classificazione del terreno di cui al punto precedente;
4. Sottocampionamento della nuvola di punti al fine di ottenere in output un dato meno denso ma comunque significativo per la generazione del Modello Digitale del Terreno (spaziatura media tra i punti 10 cm);
5. Generazione del Modello Digitale del Terreno secondo un processo di rasterizzazione del dato 3D.

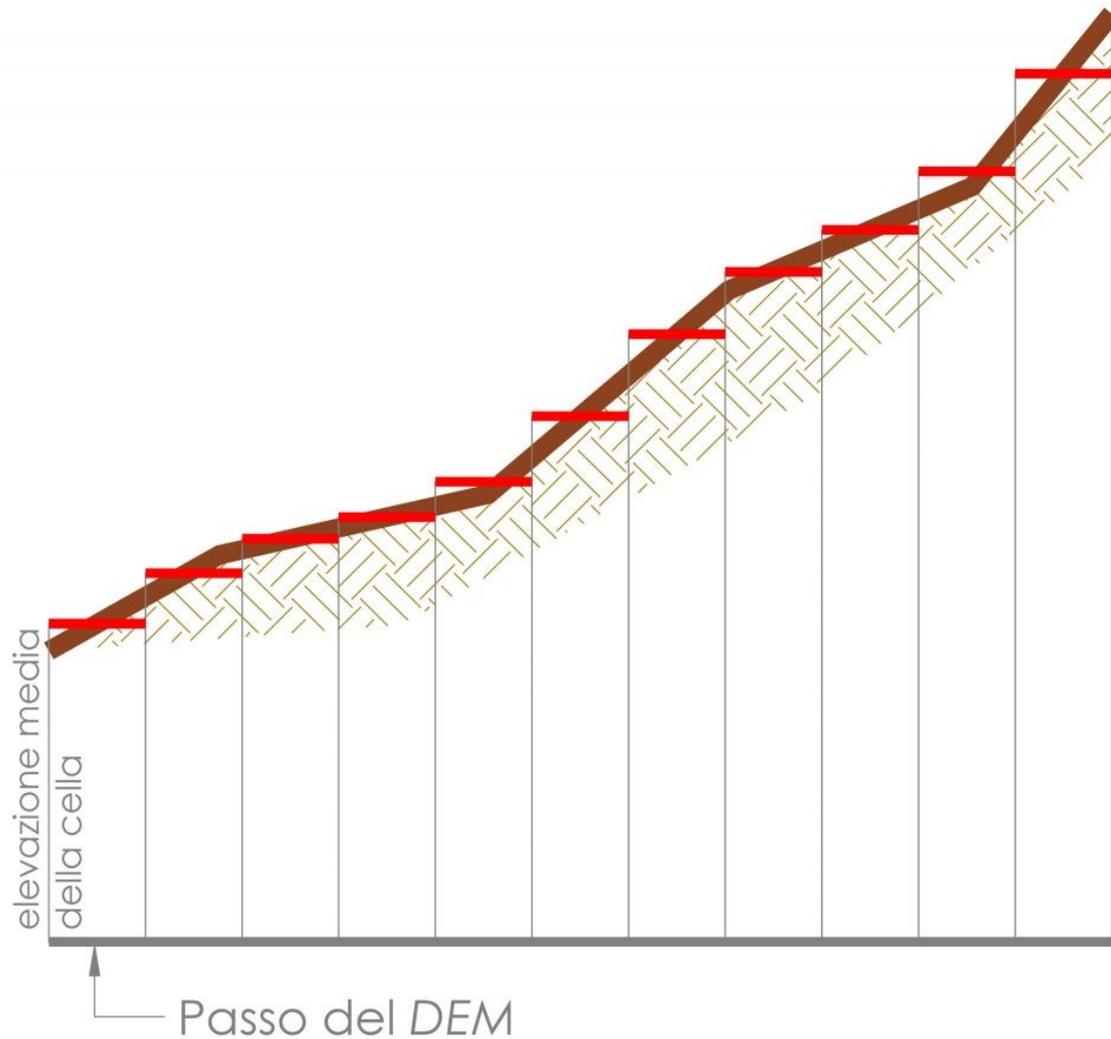
Figura 19. Risultato dell'estrazione del terreno a seguito di classificazione della nuvola di punti Lidar



Nella pratica un *DEM* è un raster, formato da pixel, e si costruisce discretizzando la superficie topografica con una maglia quadrata dove i quadrati, della maglia sono tutti uguali. Il loro lato è il passo, lo step o la risoluzione del modello digitale.

Ciascun quadrato è parte di piano orizzontale delimitato dai suoi quattro vertici (di cui sono note le coordinate X e Y) ed ha un'elevazione (un valore di Z) che è pari all'elevazione media di tutti i punti che ricadono all'interno.

Figura 20. Principio di attribuzione della quota altimetrica alle celle di un DEM



Al fine di garantire una descrizione completa del territorio modellato, sufficientemente accurata ma non troppo dettagliata da rischiare di creare criticità nella gestione di grandi moli di dati, si è scelto di elaborare i modelli digitali di elevazione affinché la risoluzione fosse pari a 1 m/pixel.

Tale risoluzione si è ritenuta sufficiente per la caratterizzazione morfologica dell'area e per la generazione delle curve di livello. Queste sono state elaborate secondo un'equidistanza di 1 m, allo scopo di fornire dati utili per la loro fruizione ed utilizzo.

Figura 21. Dettaglio del modello digitale del terreno DTM di parte dell'area indagata

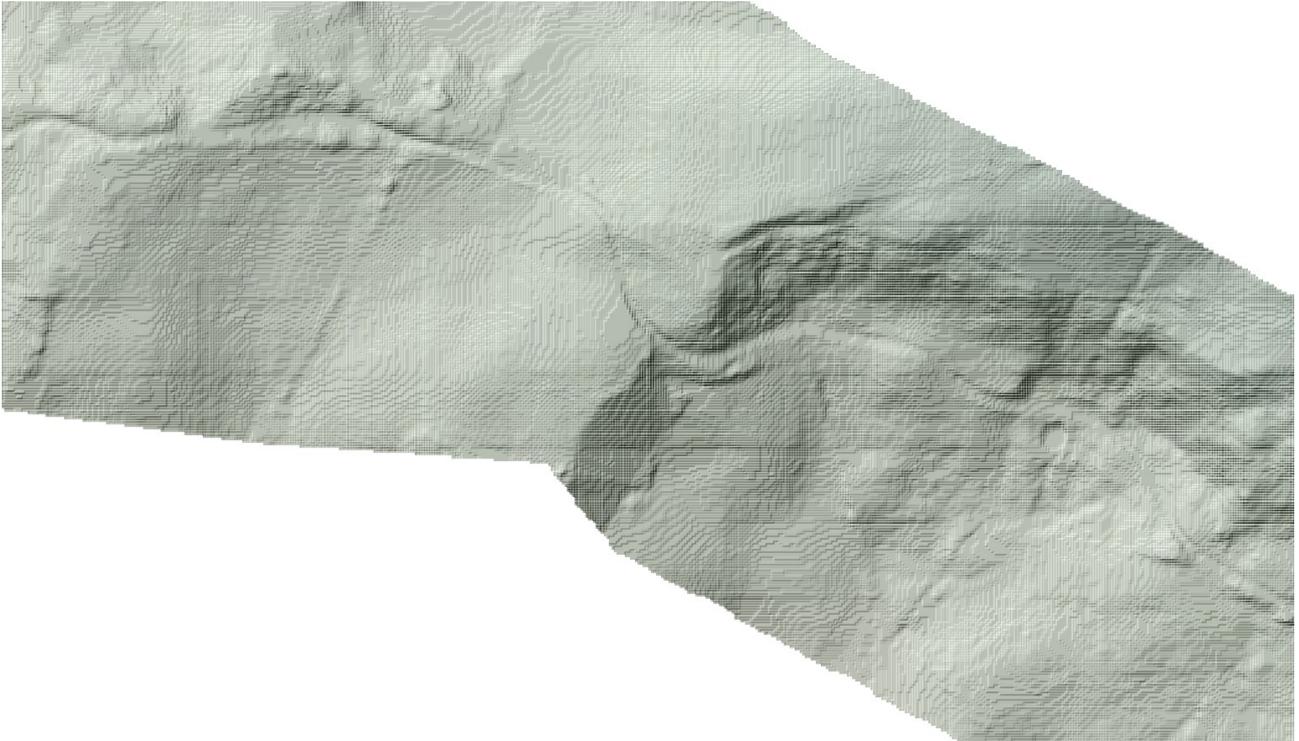
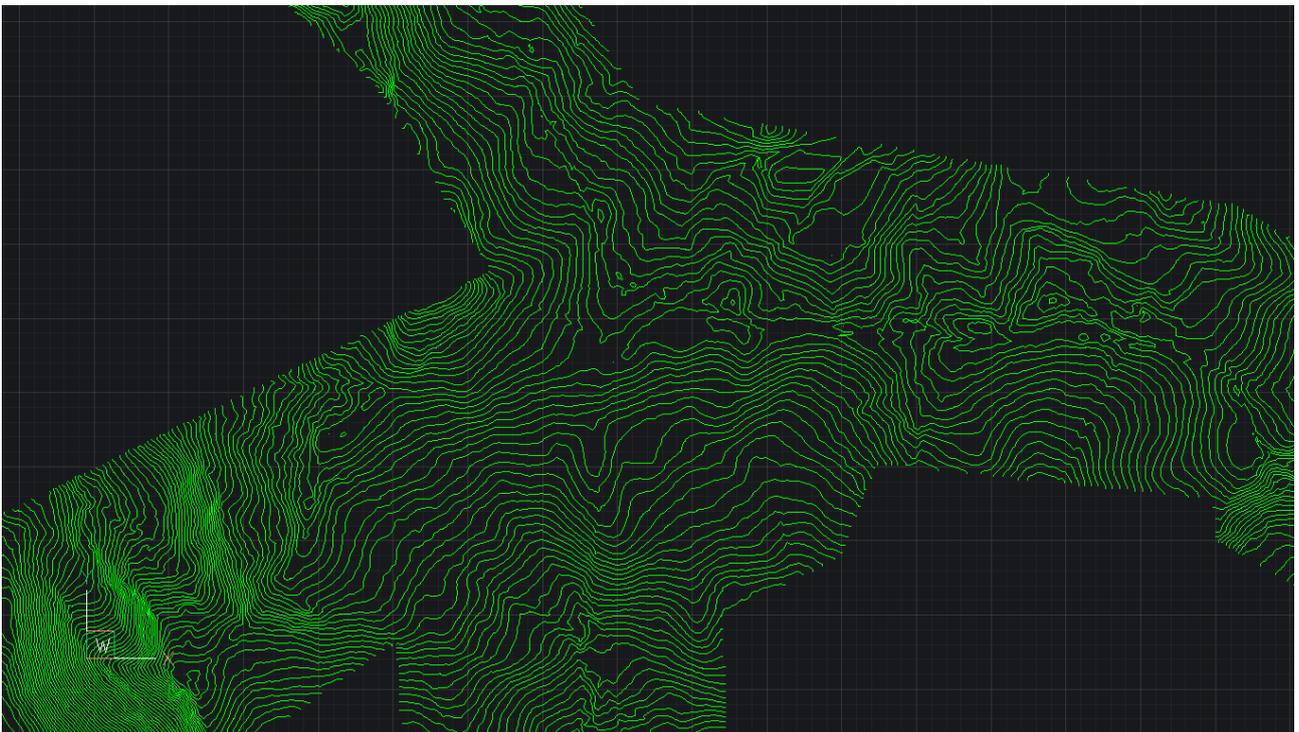


Figura 22. Curve di livello con passo 1 m create a partire dai punti del solo terreno e dal DTM





## 8. RAPPRESENTAZIONE PLANIMETRICA VETTORIALE BIDIMENSIONALE

L'output finale dei rilievi è una rappresentazione planimetrica bidimensionale.

A partire dalla nuvola di punti e dal modello digitale del terreno, e con il prezioso aiuto dell'ortomosaico si è riprodotta in ambiente CAD (vettoriale) una planimetria generale delle aree indagate, riportando, oltre alle già citate curve di livello ed ai punti del terreno anche gli elementi caratteristici dei luoghi tra cui, su tutte, si evidenzia la viabilità e l'area interessata dal nuovo metanodotto SNAM.

All'interno della planimetria si ritrovano i seguenti elementi:

- Curve di livello con passo 1 m (isoipse equidistanti, altimetricamente, 1 m una dall'altra);
- Punti quotati del terreno, distanti 15 m uno dall'altro, e riferiti a tutta l'area indagata;
- Punti quotati del terreno, distanti 1 m uno dall'altro, e riferiti alle aree di installazione dei nuovi aerogeneratori;
- Viabilità presente in sito, inclusiva di strade carrabili, viabilità interpodereale e sentieri pedonali;
- Area interessata da scavi e movimenti terra per la realizzazione di nuovo cavidotto SNAM.