



Regione Toscana



Provincia di Pisa

RILIEVO A MEZZO DRONE

**FINALIZZATO ALL'ADEGUAMENTO DELLO STUDIO
IDRAULICO DI SUPPORTO ALLA REDAZIONE DEL PIANO
OPERATIVO IN LOC. SALINE DI VOLTERRA**

Comune di Volterra - Provincia di Pisa

Relazione Tecnica

COMMESSA
2020-020

DATA DOCUMENTO
9 Dicembre 2020

COMMITTENTE
Comune di Volterra (PI)
Settore N. 6 - Urbanistica ed Edilizia
Funzione associata pianificazione territoriale
Turismo, Cultura ed eventi
Piazza dei Priori, 1
56048 - Volterra (PI)

DOCUMENTO
R1

IL TECNICO



Ing. Paolo Corradeghini
Via Bertoloni, 59
19038 - Sarzana (SP)
P.IVA 01260880115
C.F. CRR PLA 79P01 E463A



INDICE

PREMESSA	3
L'AREA DEL RILIEVO	5
L'area interessata dalle indagini interessa l'abitato di Saline di Volterra e le aree adiacenti interessate dalla presenza di corsi d'acqua superficiali.	5
LA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA	8
SISTEMA AEROMOBILE A PILOTAGGIO REMOTO SAPR	8
IL SISTEMA GNSS PER IL RILIEVO DEI PUNTI A TERRA	10
IL RILIEVO AEROFOTOGRAMMETRICO	11
CENNI DI FOTOGRAMMETRIA	13
IL G.S.D. ED IL CONCETTO DI ACCURATEZZA	19
RILIEVO SATELLITARE A TERRA	20
TRASFORMAZIONE DELLE COORDINATE E QUOTA	23
ELABORAZIONE, ORIENTAMENTO E RESTITUZIONE DEI RISULTATI	24
PRINCIPI DI MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE	24
ELABORAZIONE DEI DATI	25
CARICAMENTO DELLE IMMAGINI ED ALLINEAMENTO	25
NUVOLA DI PUNTI DENSA	27
VERIFICA DELL'ACCURATEZZA DEL MODELLO	28
GEOREFERENZIAZIONE	29
MODELLI DIGITALI ACCESSIBILI	29
CORRISPONDENZA DEL RILIEVO CON I DATI TOPOGRAFICI GIÀ DISPONIBILI	30
TRATTAMENTO DEI DATI, RASTER E MODELLI DIGITALI DI ELEVAZIONE	34
MODELLI DIGITALI DI ELEVAZIONE - DEM, DSM, DTM	34
RISOLUZIONE DEI DEM	35
MODELLO DIGITALE DELLE SUPERFICI - DSM	37
MODELLO DIGITALE DEL TERRENO - DTM	37
MODELLO DIGITALE DELLE SUPERFICI OPACHE	39
NOTA TECNICA SUL PROCESSO FOTOGRAMMETRICO	41
ORTOFOTO	43
APPENDICE	
REPORT DI ELABORAZIONE FOTOGRAMMETRICA	44

PREMESSA

Questo lavoro è stato condotto su incarico dell'Amministrazione Comunale di Volterra (PI) - Settore N. 6 (Urbanistica e Edilizia, Funzione associata pianificazione territoriale, Turismo, Cultura ed eventi) - con Determinazione Dirigenziale N. 746 dell'8/10/2020.

L'oggetto del servizio è il **rilievo topografico/aerofotogrammetrico a mezzo drone** (APR - Aeromobile a Pilotaggio Remoto) di supporto alla redazione del Piano Operativo in località Saline di Volterra, Comune di Volterra (PI).

L'obiettivo delle attività è stato quello di **aggiornare lo stato conoscitivo della topografia dei luoghi** e fornire *Modelli Digitali di Elevazione (DEM - Digital Elevation Model)*, rappresentativi dello stato dei luoghi e implementabili all'interno di strumenti e software di modellazione idraulica per lo studio delle aree esondabili e la definizione dei rischi connessi.

In particolar modo si sono prodotti i seguenti Modelli Digitali di Elevazione:

- **DTM - Modello Digitale del Terreno** (*Digital Terrain Model*) con risoluzione pari a 50 cm/pixel e descrittivo del solo elemento suolo;
- **DSM - Modello Digitale della Superficie** (*Digital Surface Model*), con risoluzione pari a 50 cm/pixel e descrittivo dell'elemento suolo e di tutto quanto presente sopra di esso al momento dell'acquisizione dei dati (edificato, vegetazione, automezzi, ingombri ed ostacoli temporanei);
- **DSMo - Modello Digitale delle Superfici opache** (*Digital Surface Model*), con risoluzione pari a 50 cm/pixel e descrittivo dell'elemento suolo e dell'edificato, che offre un ostacolo al deflusso delle acque superficiali.

Il rilievo è stato condotto impiegando **tecniche di restituzione fotogrammetrica** a partire da **immagini aeree scattate da APR** (drone) con l'appoggio di **misure topografiche ad alta precisione** di punti noti a terra.

Le attività di campo sono state condotte nei giorni **28 e 29 Ottobre 2020**.



Fotografie aeree di parte dell'area interessata dalle indagini.

Sopra: l'abitato di Saline di Volterra.

Sotto: area di pertinenza di Altair Chimica S.p.A.

L'AREA DEL RILIEVO

L'area interessata dalle indagini interessa l'**abitato di Saline di Volterra e le aree adiacenti** interessate dalla presenza di corsi d'acqua superficiali.

Si tratta di una superficie complessiva di circa 120 ettari, compresa tra le quote 60 m e 100 m s.l.m., caratterizzata da una sagoma "a tridente inclinato".



Localizzazione dell'area delle indagini (fonte mappa Google)

In considerazione del fatto che le aree indagate seguono l'andamento dei corsi d'acqua superficiali, i rami del tridente sono disposti secondo quattro direttrici, tre delle quali si possono considerare, ai fini del rilievo, principali, sia come sviluppo lineare che superficiale.

1. **Ramo Sud-Ovest:** lunghezza circa pari a 1.600 m, compreso tra il fiume Cecina, nei pressi del tracciato della S.S. 68, e l'abitato di Saline di Volterra;
2. **Ramo Nord-Est:** lunghezza circa pari a 1.300 m, sviluppato a partire dall'abitato di Saline di Volterra, lungo l'Ex Ferrovia Pisa-Volterra ed in direzione di quest'ultima;
3. **Ramo Sud-Est:** lunghezza circa pari a 1.500 m, sviluppato lungo il Botro Santa Maria, tra l'abitato di Saline di Volterra, attraverso l'area produttiva in cui si trovano *Saline Locatelli ed Altair Chimica*, fino all'accesso Sud dell'area mineraria Solvay;

4. **Ramo Est:** di lunghezza inferiore agli altri e pari a circa 500 m, compreso tra il limite Nord dell'area Altair Chimica e l'accesso Est dell'area mineraria Solvay.



Foto aerea del Ramo Sud-Ovest dell'area oggetto di indagini



Foto aerea del Ramo Nord-Est dell'area oggetto di indagini



Foto aerea del Ramo Sud-Est dell'area oggetto di indagini



Foto aerea del Ramo Est dell'area oggetto di indagini

LA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Per lo svolgimento delle attività di cui alla presente relazione è stata impiegata la seguente strumentazione:

- **Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR - drone) ;**
- **Ricevitore satellitare geodetico GNSS.**

SISTEMA AEROMOBILE A PILOTAGGIO REMOTO SAPR

Il rilievo aerofotogrammetrico è stato realizzato con un *Sistema Aeromobile Pilotaggio Remoto (S.A.P.R.)* costituito da un drone multi rotore a quattro eliche APR: APLKPH41 – SPR: SPLKPH41 – *Flight Controller: FPLKPH41* e peso al decollo 1,380 kg, equipaggiato con fotocamera da 20 Mpixel (sensore da 1") e lunghezza focale dell'ottica 24 mm.

Per facilità di comprensione si parlerà nel proseguo di questa relazione di *drone*.

L'operatore SAPR autorizzato è stato il sottoscritto Ing. Paolo Corradeghini, iscritto ai registri ENAC (*Ente Nazionale dell'Aviazione Civile*) per operazioni specializzate non critiche al n. 6980 ed autorizzato ad operazioni specializzate critiche in scenario standard S01, S04 e S06 (autorizzazione prot. 128300-P del 13.12.2016 – rif. 9026 - ora convertite nei nuovi scenari standard in ottemperanza al regolamento europeo EASA IT-STS-01, IT-STS-02).

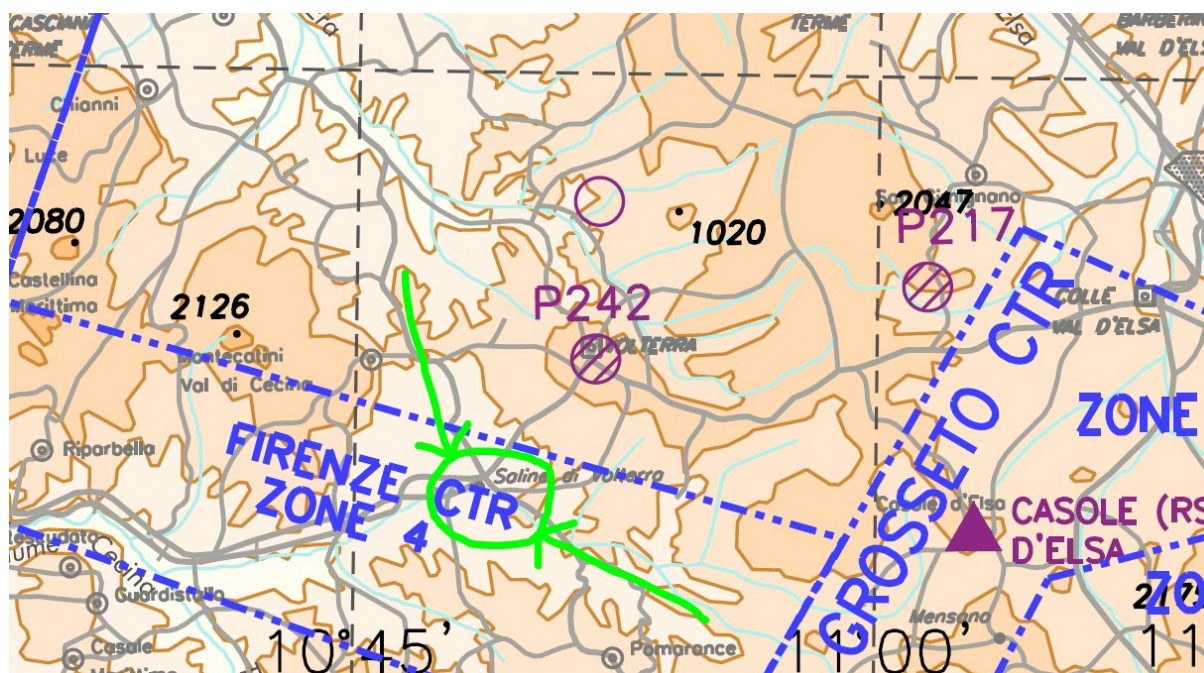


Aeromobile a pilotaggio remoto impiegato nei sorvoli delle aree oggetto di indagine

lo stesso ho coperto anche il ruolo di pilota in quanto in possesso di certificato di addestramento teorico N. 006/2016 del 27.02.2016 (ENAC.APR.OA.5368) e di addestramento pratico N. 006/2016 del 10.04.2016 (ENAC.APR.OA.5368), ad oggi convertiti ai sensi del nuovo regolamento nell'Attestato di Pilota I APRA 001587 per la classe e categoria VL/Mc (27.03.2017) e VL/Mc/CRO (04.04.2017).

Le attività di volo si sono svolte nel rispetto della vigente normativa in materia di aeromobili a pilotaggio remoto - Regolamento ENAC Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto - Edizione 3 del 29 Novembre 2019. Ne sono state verificate le aree, sulla base della vigente cartografia aeronautica, e non risultano vincoli ostativi all'uso di mezzi aerei.

L'area ricade all'interno all'interno della CTR Firenze Zona 4 che non rappresenta una limitazione al sorvolo con APR a condizione di osservare le norme vigenti in relazione all'elevazione del mezzo aereo da terra.



Estratto di carta Aeronautica (fonte ENAV) con localizzazione dell'area interessata dai sorvoli

IL SISTEMA GNSS PER IL RILIEVO DEI PUNTI A TERRA

L'acquisizione di coordinate di punti noti, da impiegare nel riferimento e nell'appoggio a terra, è necessaria affinché il modello finale elaborato sia correttamente orientato, scalato e georeferenziato.

Il rilievo topografico di appoggio è stato effettuato 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 e BEIDOU. Le coordinate dei punti battuti sono state acquisite nel sistema di riferimento ellissoidico *ETRF2000 RDN2008 (EPSG 6708)* e successivamente convertite nel sistema di riferimento cartografico di destinazione, concordato con la Committenza, *Roma40 Gauss-Boaga (EPSG 3003)*, tramite l'impiego di software *Verto3K* ed opportuni grigliati di trasformazione rilasciati dall'*Istituto Geografico Militare (IGM)*.



Ricevitore GNSS geodetico durante il rilievo di punti di appoggio in campo.

IL RILIEVO AEROFOTOGRAMMETRICO

Le caratteristiche morfologiche ed orografiche delle aree oggetto di indagine (su tutte la loro estensione), l'inaccessibilità di parte di esse e le esigenze in output hanno guidato la scelta delle tecnologie di rilievo topografico verso la **tecnica aerofotogrammetrica** con l'impiego di *sistema aereo a pilotaggio remoto (S.A.P.R.)* per l'acquisizione delle immagini aeree, da processare all'interno di software specialistici, integrata da misure topografiche ad alta precisione.

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.

Le tecniche impiegate nello svolgimento del presente incarico non sono tuttavia tecniche fotogrammetriche pure, analoghe a quelle impiegate per la produzione del repertorio cartografico nazionale tuttora in uso.

Si tratta 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.

Sebbene l'accuratezza di un rilievo fotogrammetrico sia generalmente inferiore rispetto ad altre tecnologie di rilievo topografico (stazione totale, laser scanning, ...) si è ritenuto che questa fosse la migliore soluzione per lo studio in oggetto.

Di seguito si riportano le motivazioni della scelta:

- Il sorvolo ed il rilievo mediante drone (e la successiva elaborazione delle immagini riprese) permette di acquisire la topografia dei luoghi con un'alta densità di informazioni ed in tempi sensibilmente inferiori rispetto all'uso di strumentazione a terra.

- L'utilizzo di un mezzo aereo permette di rilevare aree difficilmente accessibili a piedi, con un GPS o una stazione totale, come aree acclivi, aree pericolose (carreggiate stradali) o aree completamente inaccessibili (come quelle relative agli stabilimenti industriali o alle aree minerarie).
- La restituzione degli output del processo fotogrammetrico permette dati sufficientemente accurati per condurre gli studi e le analisi idrauliche per i quali sono stati richiesti questi approfondimenti.
- La tecnica aerofotogrammetrica, basandosi sull'acquisizione delle immagini e ricreando un modello 3D, unisce al rilievo topografico (elaborato a partire dalle fotografie scattate), la possibilità di studiare, analizzare e interrogare i dati in qualsiasi momento e da chiunque ne abbia accesso, senza la necessità di recarsi nuovamente in sito.
- I risultati 2D e "2.5D" di un rilievo aerofotogrammetrico (ortomosaico, modello digitale delle superfici, modello tridimensionale del terreno) sono fruibili ed integrabili all'interno di strumenti e software di analisi territoriale come i GIS, all'interno di comuni software di disegno assistito (CAD) e sono implementabili anche all'interno di programmi di modellazione idraulica superficiale.



Fotogramma ripreso durante l'acquisizione fotogrammetrica che riprende parte dell'area di pertinenza di Altair Chimica, inaccessibile a piedi.

CENNI DI FOTOGRAMMETRIA

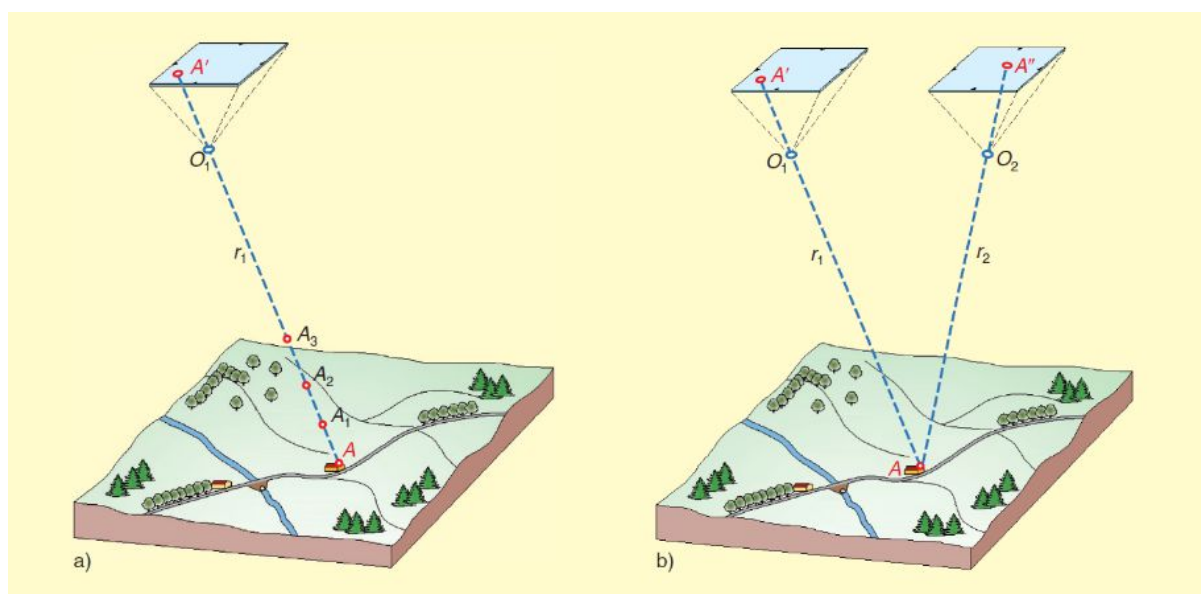
La fotogrammetria consente di definire la **posizione, la forma e le dimensioni di oggetti sul terreno** (o dello stesso terreno), utilizzando le informazioni contenute in immagini fotografiche degli stessi oggetti, riprese da punti diversi.

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.

A questo proposito è possibile, con sufficiente approssimazione, pensare alla fotografia come a una prospettiva centrale, in base alla quale i segmenti che congiungono i punti dell'oggetto con le loro corrispondenti immagini (stella proiettante) si incontrano tutti in un punto distante pochi centimetri dal piano del sensore fotografico, il centro di presa.

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).



Schematizzazione del principio fotogrammetrico: impiego di almeno due immagini per definire le posizioni univoche dei punti sul terreno rilevato

Le posizioni dei centri di presa e l'orientamento del sensore fotografico tuttavia (salvo poche eccezioni) non sono note a priori.

È però possibile ottenere queste informazioni dalle stesse fotografie, se queste contengono un certo numero di punti di appoggio sul terreno le cui posizioni vengono ricavate da tradizionali operazioni topografiche (fase di orientamento assoluto).



Fotogramma della presa aerea fotogrammetria dove sono presenti due punti di appoggio, le cui coordinate sono state rilevate con strumentazione topografica.

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).

La fotogrammetria moderna differisce da quella classica in quanto le macchine fotografiche impiegate sono fotocamere digitali prive di certificazione di calibrazione interna e gli strumenti di restituzione (software) utilizzano algoritmi basati sia sulla collimazione fotogrammetrica classica che sulle tecniche di imaging. È pertanto più corretto riferirsi a queste tecniche come a tecniche di *fotogrammetria moderna non convenzionale*.

PROGRAMMAZIONE DELLE OPERAZIONI

Il sorvolo dell'APR all'interno dell'area del rilievo è stato condotto in **modalità automatica**, secondo missioni di volo programmato, precedentemente definite sulla base di modelli digitali disponibili (Google).

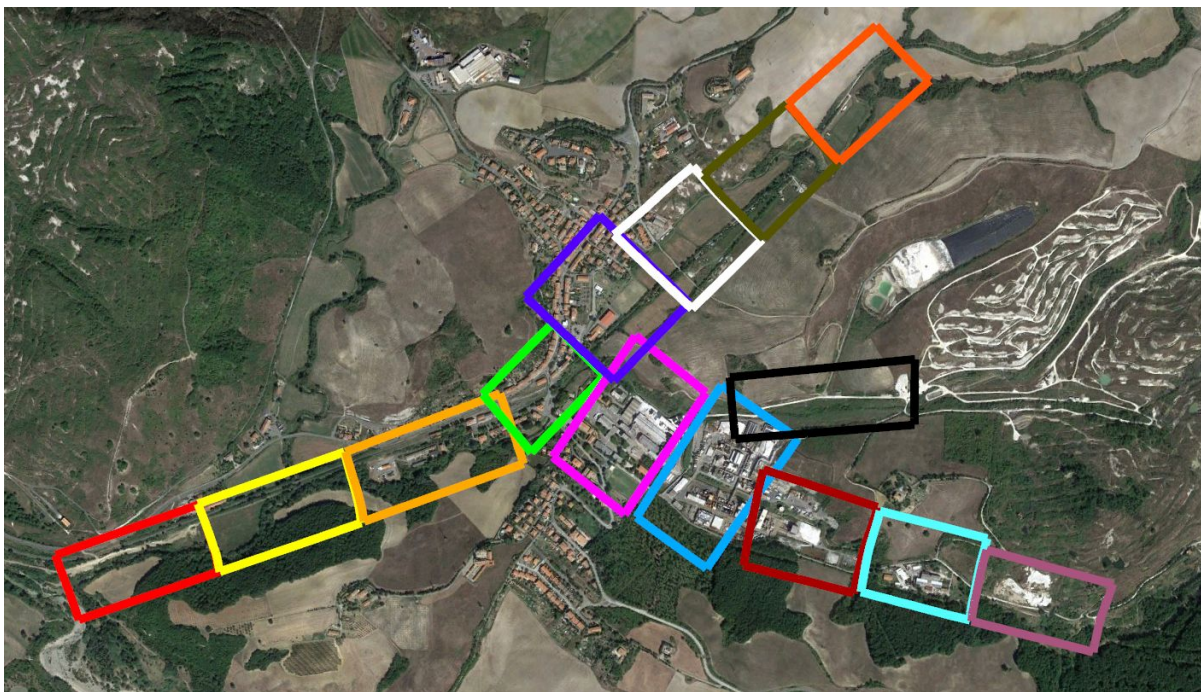
Per le necessità e gli scopi del presente studio si è ritenuto sufficiente programmare e condurre **un'acquisizione di immagini fotografiche di tipo nadirale**, ossia con camera orientata verso il basso ed asse ottico diretto verticalmente verso il terreno.

Al fine di effettuare una robusta acquisizione aerofotogrammetrica ed in considerazione dell'importante estensione dell'area da sorvolare e da coprire con la presa fotogrammetrica, si è condotto il volo dell'APR in modo che:

- l'altezza di volo non fosse superiore a 120 m AGL (Above Ground Level);
- la velocità di crociera non fosse superiore a 12 km/h, sufficientemente ridotta per evitare sfocature nelle immagini dovute al possibile effetto mosso per velocità elevate;
- l'intervallo di scatto delle fotografie nadirali fosse pari a 5 secondi per avere una sovrapposizione tra fotogrammi adiacenti dell'80%;

In considerazione dell'estensione dell'area di indagine, delle caratteristiche operative del mezzo aereo impiegato (con particolare riferimento alla durata delle batterie) e delle normative vigenti che impongono il contatto visivo tra pilota e APR in volo (modalità di volo VLOS - Visual Line of Sight) si è reso necessario **suddividere la zona in molteplici sotto-porzioni** a cui corrisponde una distinta missione di volo aerofotogrammetrico per ciascuna di esse.

In particolare si sono condotte 14 missioni di volo della durata media unitaria di circa 15 minuti, distribuite nelle due giornate operative di campo.



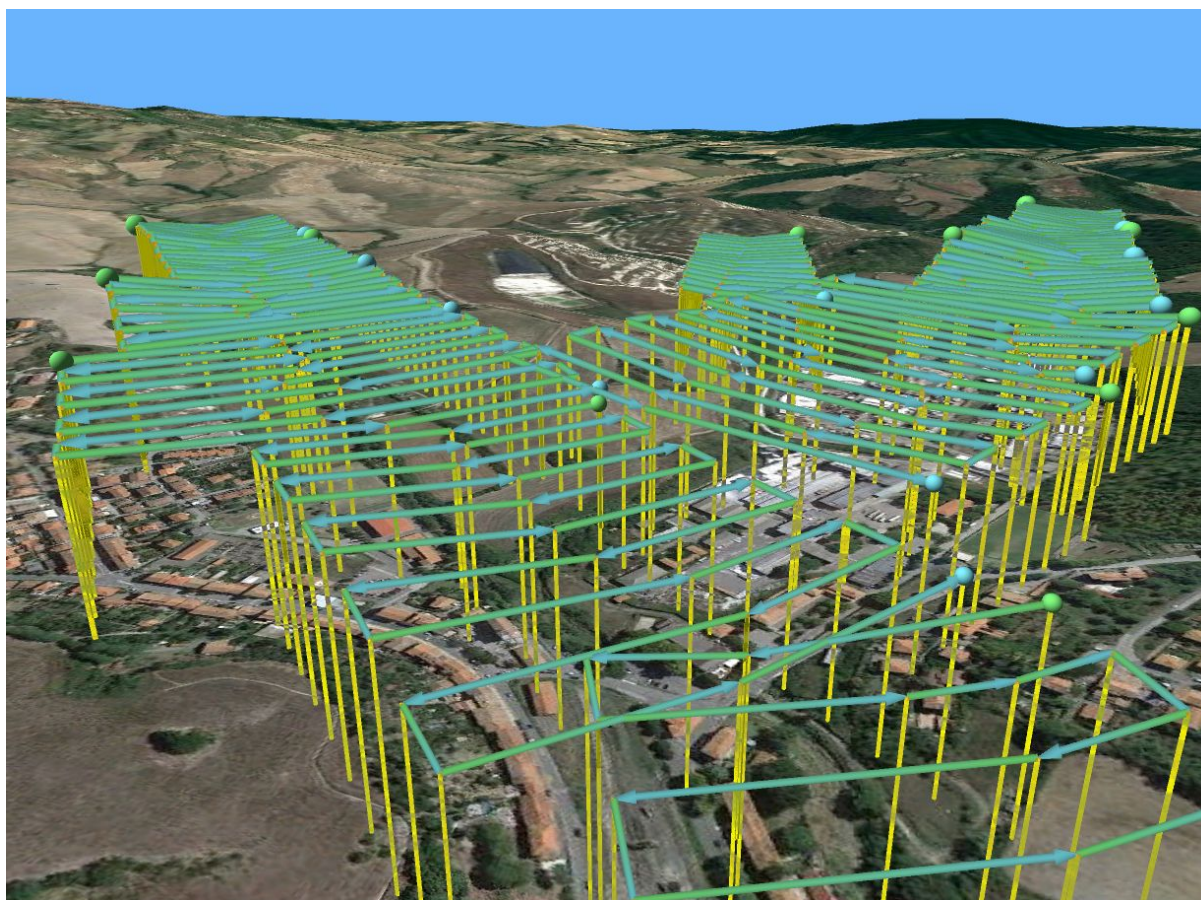
Suddivisione dell'area nelle sotto-porzioni a cui corrispondono altrettante missioni di volo fotogrammetrico.



Missioni di volo automatico programmate ed eseguite per il rilievo dell'area di indagine

La programmazione delle missioni automatiche è stata fatta tramite il software di mission planning *UGCS Pro* e le informazioni sono state poi caricate a bordo del drone per l'esecuzione automatica in campo.

Al fine di mantenere il più possibile costante la distanza drone-terreno, la programmazione dei piani di volo ha tenuto in considerazione il modello digitale del terreno affinché l'altitudine di volo si adattasse ad eventuali variazioni di quota a terra.



Particolare delle missioni di volo programmate per l'area oggetto di rilievo



Due fotografie scattate durante i sorvoli per la presa fotogrammetrica

IL G.S.D. ED IL CONCETTO DI ACCURATEZZA

Un parametro importante in un rilievo fotogrammetrico è la **Risoluzione Spaziale** che è definita dal **G.S.D.** (*Ground Sampling Distance*) 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.

Le operazioni di ripresa fotografica sono state condotte in modo che il **GSD avesse un valore non superiore a 3 cm/pixel.**

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.

L'accuratezza di un rilievo aerofotogrammetrico può essere relativa o assoluta.

L'accuratezza relativa è la misura di come i punti sono posizionati relativamente uno con l'altro in un modello ricostruito (ad esempio in un'ortofoto o in un D.S.M.).

L'accuratezza assoluta invece si riferisce alle differenze tra la posizione dei punti nel modello ricostruito e la loro effettiva posizione sulla superficie terrestre.

Sebbene per alcune applicazioni ed impieghi l'accuratezza relativa possa essere sufficiente è buona norma ricercare l'accuratezza assoluta. In questo senso ci si affida ai punti di controllo misurati a terra con strumentazione topografica, chiamati Ground Control Points (G.C.P.).

L'accuratezza assoluta dell'intero rilievo aerofotogrammetrico non può essere maggiore di quella con cui sono rilevati i *Ground Control Points*.

RILIEVO SATELLITARE A TERRA

Come anticipato in precedenza, l'elaborazione fotogrammetrica necessita di punti di controllo a terra di coordinate note per effettuare le operazioni di *orientamento* e *scalatura* del modello ricostruito.

La posizione dei punti deve essere rilevata a terra con strumenti topografici ad alta precisione e nel caso in esame è stato impiegato un ricevitore GPS.

Nonostante una stazione totale permetta ovunque precisioni sulle misure maggiori, si è scelto di rilevare con un antenna GPS per i seguenti motivi:

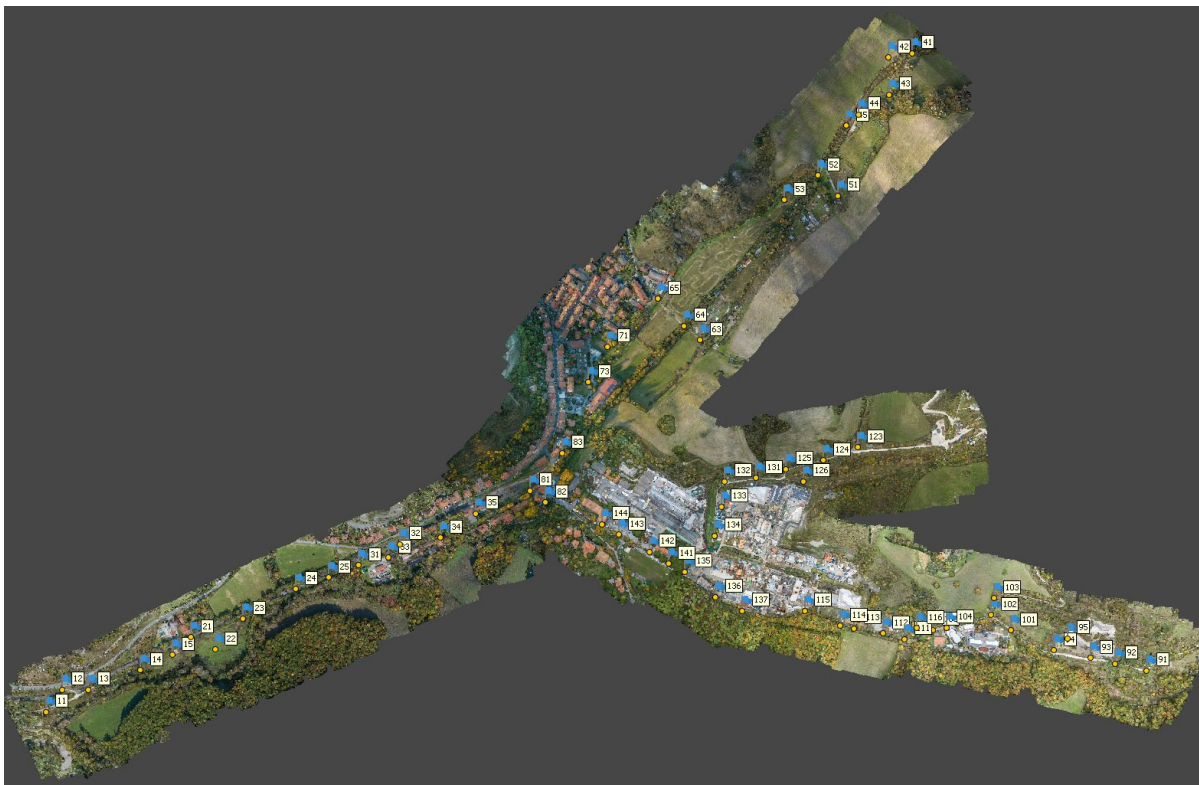
- Velocità di utilizzo: le operazioni di messa in stazione di una stazione totale sono più lunghe e rigorose rispetto alla "messa in bolla" di un GPS, quasi immediata;
- Praticità di utilizzo: la stazione totale necessita di punti di coordinate note per conoscere la propria posizione assoluta e trasformare conseguentemente le coordinate dei punti battuti che, inoltre, devono essere visibili dal cannocchiale dello strumento, rendendo necessario un elevato numero di stazioni di misura. Un ricevitore GPS in modalità RTK necessita esclusivamente di avere una buona copertura satellitare visibile nella porzione di volta celeste al di sopra dello stesso;
- Accessibilità dei luoghi: la stazione totale, con il treppiede per lo stazionamento, è uno strumento più pesante rispetto ad un ricevitore satellitare montato su palina in carbonio;
- Personale all'opera: la stazione totale necessita di un operatore allo strumento ed un secondo operatore, il canneggiatore, incaricato di posizionare il prisma riflettente montato su palina sul punto da battere. Il rilievo con GPS RTK necessita di un solo operatore che stazione direttamente sul punto.

È stata rilevata la posizione di **49 punti di controllo a terra G.C.P.** (*Ground Control Points*) che sono stati impiegati nella fase di elaborazione dei rilievi aerofotogrammetrici per l'orientamento e scalatura del modello restituito e di altri **13 punti di controllo della qualità Q.C.P.** (*Quality Control Points*) per la verifica dell'accuratezza finale della restituzione.

I punti a terra sono stati materializzati con target amovibili ad alta visibilità e contrasto, per rendere più semplice l'individuazione all'interno delle fotografie scattate in fase di elaborazione dei dati acquisiti.



Target artificiali e rilievo GNSS della loro posizione



Distribuzione dei punti di appoggio e controllo del rilievo aerofotogrammetrico all'interno dell'area rilevata.

TRASFORMAZIONE DELLE COORDINATE E QUOTA

Le coordinate rilevate dal ricevitore satellitare a terra sono riferite all'ellissoide GRS80.

Il sistema 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 a cui si è fatto appoggio durante il rilievo di campo con modalità *nRTK*.

Sono pertanto forniti valori di latitudine, longitudine e quota in tal senso.

Latitudine e longitudine individuano la posizione di un punto sulla superficie dell'ellissoide mentre la quota rilevata rappresenta la distanza del punto battuto dalla superficie dell'ellissoide. Considerare tale valore come quota reale comporterebbe un errore grossolano. Infatti la quota nota come tale è quella ortometrica (o geoidica), ossia la distanza del punto battuto dalla superficie del geoide. Nel territorio italiano il geoide e l'ellissoide hanno uno scostamento relativo variabile tra 40 e 50 m.

Al fine di georeferenziare il risultato del rilievo all'interno di sistemi di riferimento cartografici concordati (*Roma40 - Gauss Boaga - EPSG 3003*) e determinare precisamente ed univocamente la quota ortometrica dei punti della nuvola di punti e, conseguentemente, delle celle del *DTM*, si sono condotte opportune trasformazioni delle coordinate mediante l'impiego del software *Verto3K (IGM)*, unitamente alla *griglia di trasformazione emanata dall'IGM - 295.gk2* - valida per un intero foglio della cartografia nazionale *IGM* della serie 50L (1:50.000), che fornisce puntualmente i valori di scostamento tra geoide ed ellissoide, noto come *ondulazione del geoide (N)*, oltre che i parametri di conversione da applicare agli algoritmi di trasformazione delle coordinate.

ELABORAZIONE, ORIENTAMENTO E RESTITUZIONE DEI RISULTATI

Terminate le operazioni di campo i dati acquisiti sono stati elaborati per restituire i risultati topografici richiesti.

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.

Le tecniche di calcolo che sono implementate nei software utilizzati per questo scopo sfruttano diverse informazioni ricavabili dalle immagini per ricostruire la forma 3D degli oggetti, come per esempio le ombre (*shape from shading*), la texture (*shape from texture*), la silhouette (*shape from silhouette*). In generale si parla più comunemente di tecnologia *Structure from Motion*, includendo al suo interno tutte le tecniche che permettono la ricostruzione di oggetti 3D partendo da punti estrapolati da immagini 2D.

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 pixels. 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 densa.

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.

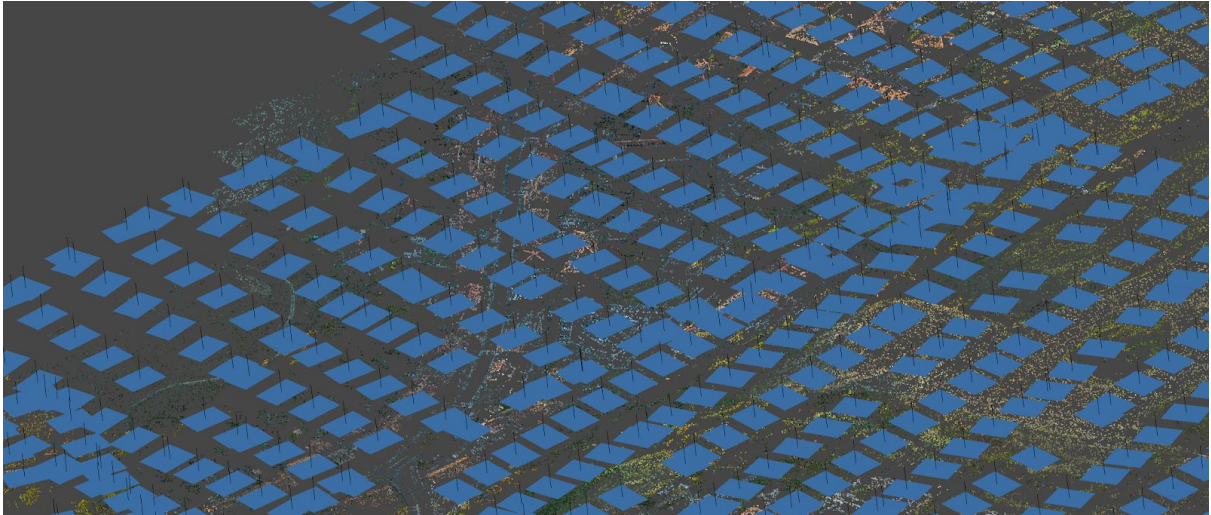
ELABORAZIONE DEI DATI

Il programma che è stato utilizzato per l'elaborazione delle immagini e dei dati rilevati a terra è *Agisoft Metashape Pro*, il quale lavora individuando i punti omologhi tra le diverse immagini e garantendo da qui la ricostruzione tridimensionale e l'estrazione di tutti i dati metrici ricercati.

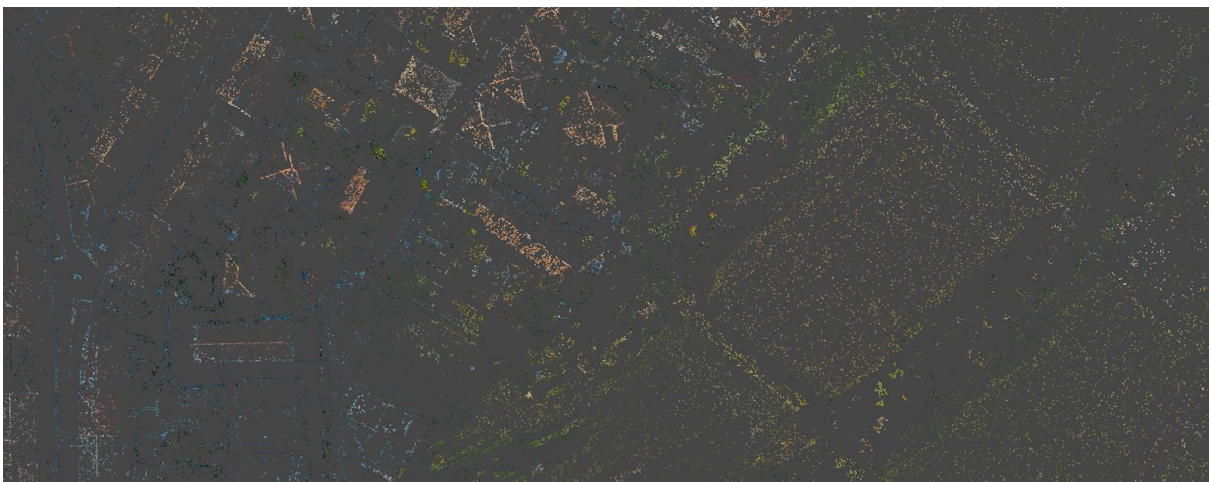
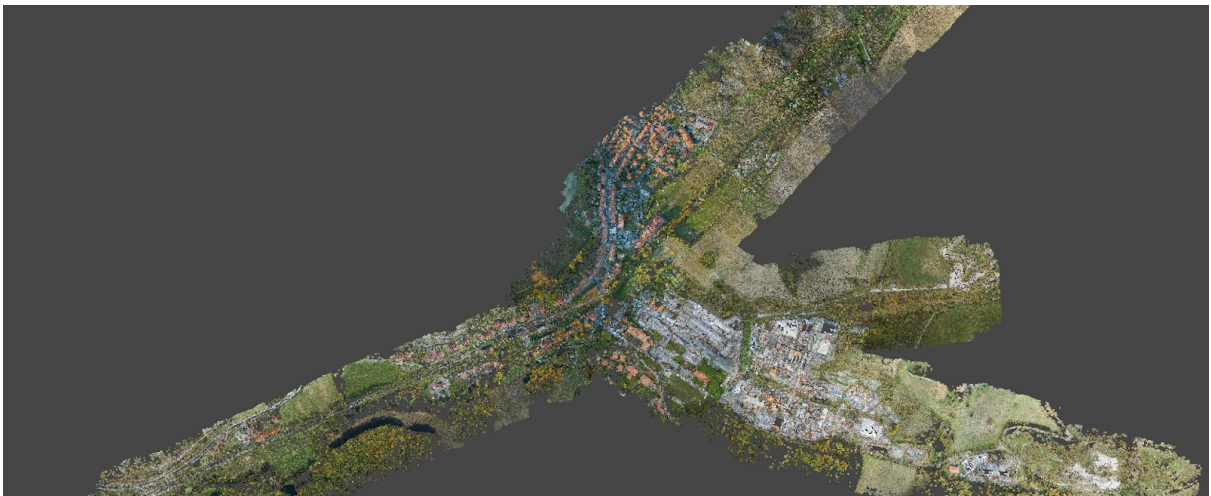
CARICAMENTO DELLE IMMAGINI ED ALLINEAMENTO

Inizialmente tutte le immagini scattate durante le operazioni di sorvolo e rilievo sono caricate all'interno del software. Essendo il drone equipaggiato con sistema GPS di bordo (di ridotta precisione rispetto ad uno strumento satellitare topografico a doppia frequenza), tutte le immagini hanno associato un dato exif contenente le informazioni sulla posizione dello scatto in coordinate WGS84.

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**.



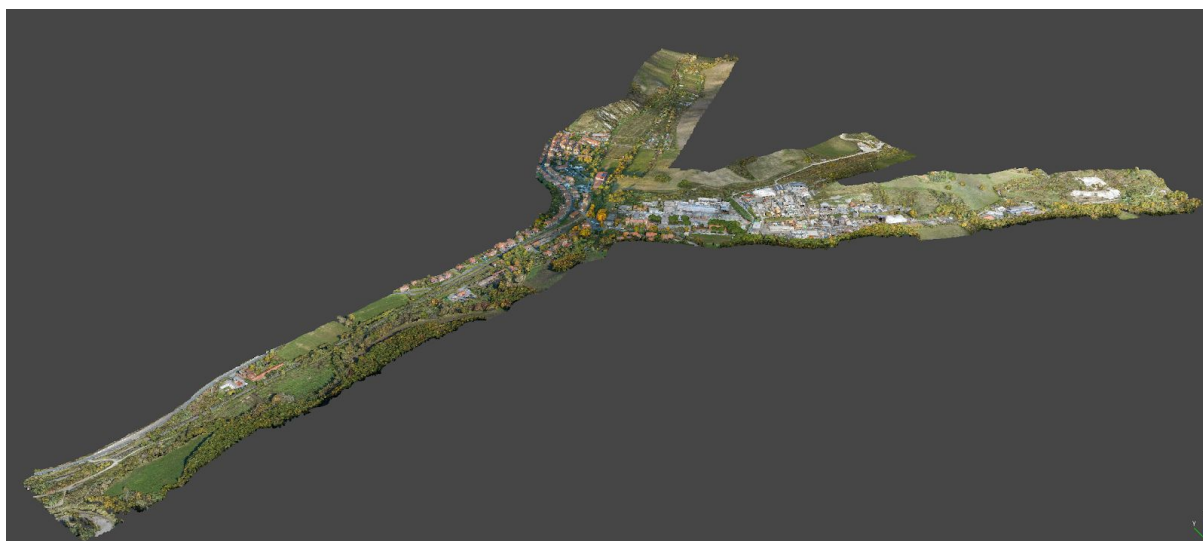
Posizione delle camere elaborate rispetto ai punti del terreno ed a tutte le altre immagini acquisite



Nuvola di punti sparsa formata dai punti di legame a seguito dell'allineamento delle immagini

NUVOLA DI PUNTI DENSA

A partire dalla nuvola sparsa e dopo l'orientamento della stessa mediante le coordinate dei punti di controllo (G.C.P.) 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.



Nuvola di punti densa

VERIFICA DELL'ACCURATEZZA DEL MODELLO

L'elaborazione dei dati rilevati sul campo termina con la generazione di un modello tridimensionale dell'area indagata.

Prima della restituzione dei risultati utilizzabili nello studio si è proceduto alla verifica dell'accuratezza globale mediante l'impiego dei punti di controllo a terra QCP la cui posizione è stata rilevata, ancora, mediante strumentazione GPS.

La stima dell'accuratezza è stata condotta internamente ed esternamente al software di modellazione *structure from motion*.

In entrambe i casi il principio impiegato è il medesimo: **analisi statistica degli scarti quadratici medi**.

La valutazione degli scarti tra la posizione rilevata sul campo e la posizione restituita dal modello elaborato rende possibile stimare l'accuratezza del rilievo.

L'analisi dell'accuratezza interna al modello è stata condotta impiegando le coordinate di target ad alta visibilità, già descritti al punto precedente.

Per quanto riguarda l'analisi esterna si è proceduto al rilievo di elementi presenti al suolo e di buona visibilità nelle immagini del dataset fotografico acquisito e, quindi, anche nel modello prodotto: *segnaletica stradale orizzontale, pozzetti ed elementi ben evidenti*.

Le coordinate degli stessi, rilevate in campo con le medesime tecniche topografiche descritte poco sopra, sono state confrontate con le coordinate desumibili tramite interrogazione della nuvola di punti 3D risultato dell'elaborazione *structure from motion*.

Si stima che **l'accuratezza media distribuita sulla superficie rilevata sia di 5 cm sia per il posizionamento planimetrico che per quello altimetrico**.



Rilievo di punti ben visibili al suolo per la valutazione esterna dell'accuratezza della restituzione

GEOREFERENZIAZIONE

Il sistema di riferimento dei dati elaborati e restituiti è **il sistema cartografico Roma40 - proiezione Gaus-Boaga - Fuso Ovest - Codice EPSG 3003** (conosciuto anche, a livello internazionale ed all'interno di software specialistici, come *Monte Mario Italy Zone 1*).

MODELLI DIGITALI ACCESSIBILI

A questi link sono ispezionabili ed accessibili, via browser i seguenti modelli tridimensionali:

- Nuvola di punti densa tridimensionale, georeferenziata nel sistema di riferimento Roma40 - Gauss Boaga - Fuso Ovest – EPSG 3003, visualizzabile, ispezionabile e misurabile al seguente link: <https://bit.ly/33yCrpC>

CORRISPONDENZA DEL RILIEVO CON I DATI TOPOGRAFICI GIÀ DISPONIBILI

Preliminarmente all'avvio delle attività sono stati acquisiti **dati topografici pregressi** di parti dell'area interessata dalle indagini di cui alla presente relazione.

In particolare si fa riferimento a:

- *Rilievo topografico plano-altimetrico del Botro di Santa Marta, Botro Sant'Antonio e Botro dei Canonici in Comune di Volterra - Frazione Saline di Volterra - Realizzato da Regione Toscana - Ufficio del Genio Civile (2014);*
- *Studio di fattibilità progettazione nuova area a parcheggio e realizzazione stadio nella frazione di Saline di Volterra - Rilievo topografico plano-altimetrico di supporto alle indagini dell'area "Botro dei Canonici" - Realizzato dal Comune di Volterra (2015)*

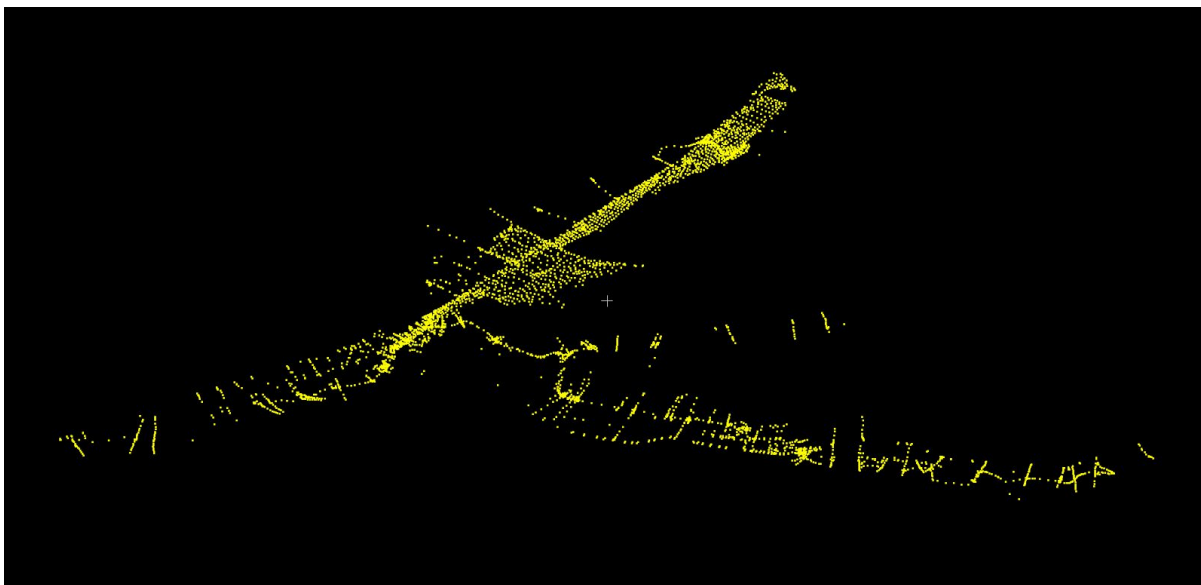
Le risultanze di tali rilievi sono punti acquisiti con tecniche topografiche terrestri/tradizionali (GNSS e Stazione Totale) descrittivi degli alvei presenti all'interno dell'area di studio (sezioni idriche) e di parte delle aree limitrofe.

I punti di cui sopra forniscono informazioni plano-altimetriche.

La componente planimetrica è riferita al sistema cartografico Roma40 - Gauss Boaga - Fuso Ovest (EPSG 3003), la componente altimetrica fornisce la quota dei punti riferita al livello medio del mare (quota ortometrica).

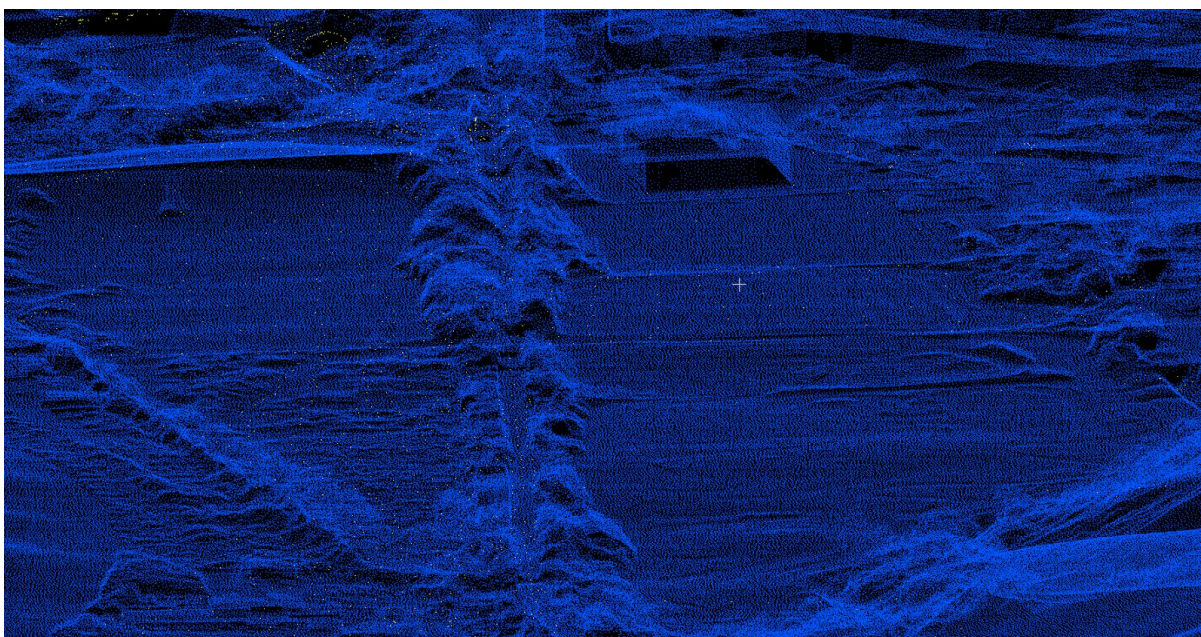
Al fine di verificare la corrispondenza tra quanto disponibile ed acquisito ed i risultati del presente rilievo sono state condotte analisi preliminari in tal senso, di seguito brevemente descritte:

- Acquisizione dei punti di cui ai rilievi di cui sopra in formato vettoriale 3D (entità punto) e **generazione di nuvola di punti** formata esclusivamente da tali dati;



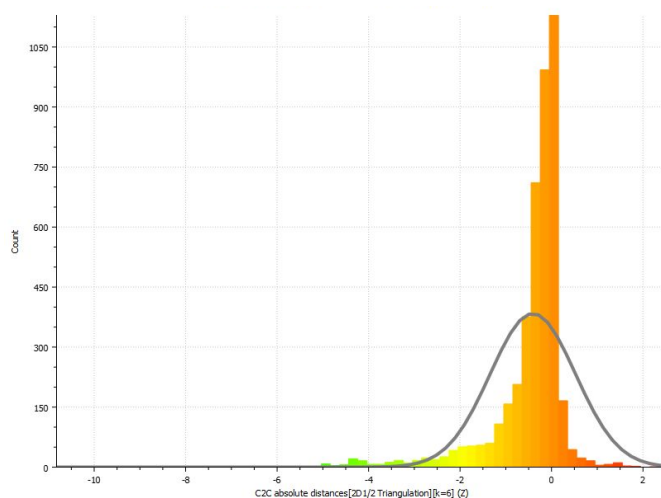
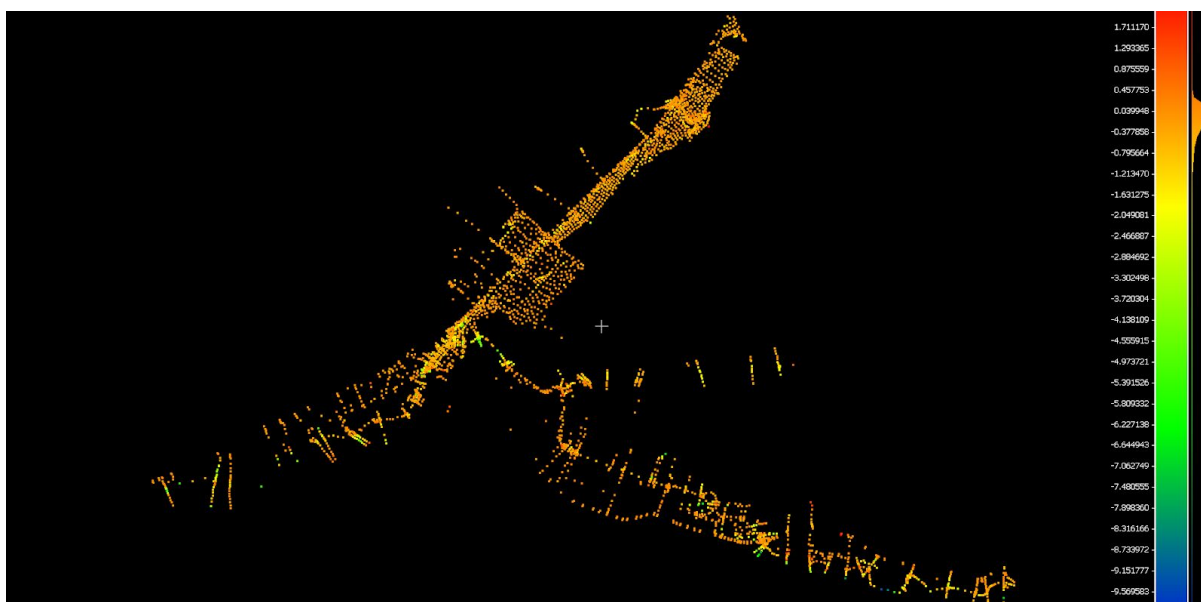
Nuvola di punti costituita dai punti dei rilievi plano-altimetrici pregressi acquisiti

- Sovrapposizione della nuvola di punti di cui sopra con la nuvola di punti aerofotogrammetrica all'interno del medesimo sistema di riferimento di lavoro (EPSG 3003);



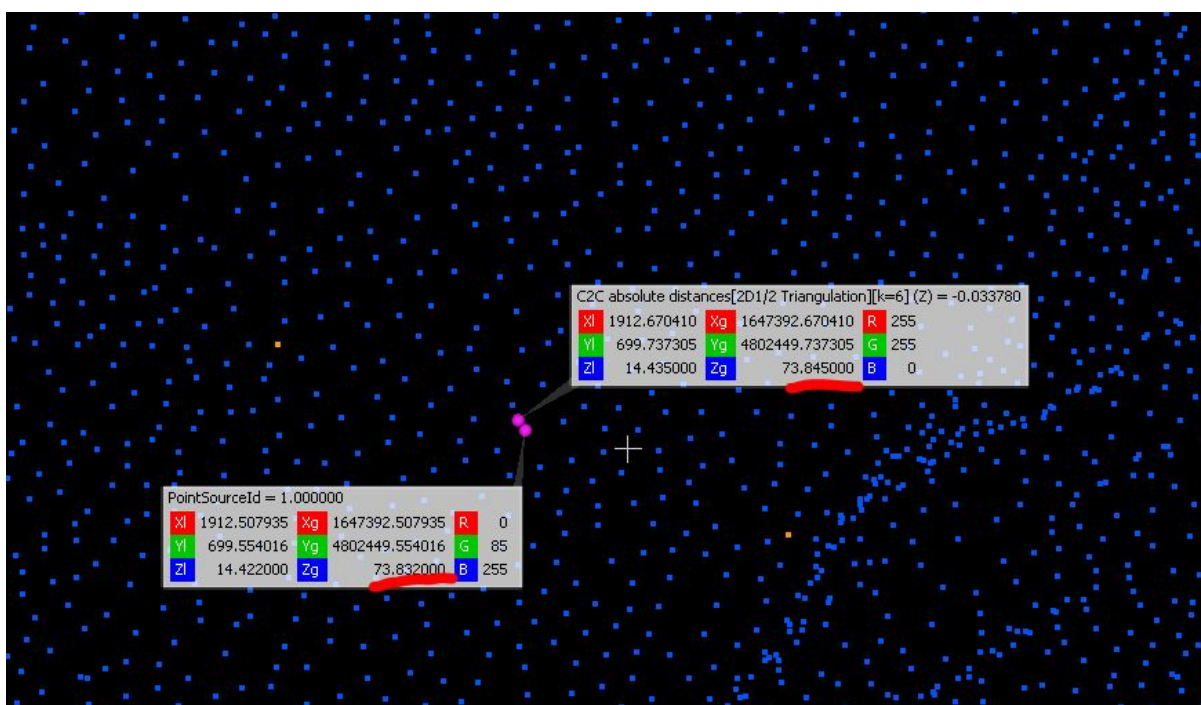
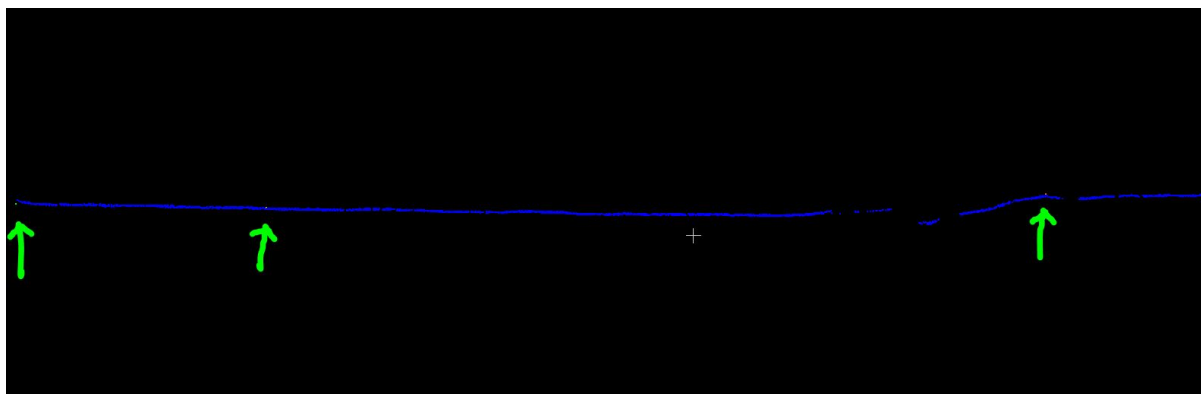
Sovrapposizione di nuvole di punti. In colore blue sono rappresentati i punti della nuvola aerofotogrammetrica ed in colore giallo quelli dei rilievi topografici pregressi

- Analisi generale mediante calcolo della distanza relativa tra i dati confrontati lungo la direzione z. Tale comparazione non è localmente ed ovunque rappresentativa in quanto i rilievi pregressi hanno restituito dati di zone non coperte dal rilievo aerofotogrammetrico (sezioni in aree vegetate, ponti ed attraversamenti). In tali aree la carenza della nuvola aerofotogrammetrica conduce ad una distanza necessariamente elevata. Tuttavia tale analisi è indicativa di un trend degli scarti contenuto, sulla totalità dei punti misurati. La distribuzione gaussiana riporta valori centrali della curva compresi tra -5 e 5 cm. Se si considerano le diverse condizioni al suolo al momento dei rilievi, le difformità nelle tecniche di acquisizione e la diversa densità di dati restituiti, si ritiene che **tale analisi renda i modelli confrontabili tra loro.**



Analisi comparative di nuvole di punti mediante calcolo della distanza relativa lungo la direzione z.

- Analisi localizzata mediante interrogazione puntuale dei modelli. Tale analisi si ritiene più significativa della precedente in quanto in grado di correlare tra loro informazioni estratte da dati paragonabili. Si sono individuate aree dove sia le tecniche tradizionali che la restituzione aerofotogrammetrica forniscono dati robusti e da tale analisi si sono potuti misurare scarti contenuti all'interno dell'accuratezza del rilievo di cui alla presente relazione da cui **si conferma la compatibilità dei dati preesistenti con quanto restituito con il presente studio**.



Analisi localizzata di nuvole di punti in aree rappresentative per il confronto mediante sezioni (sopra) ed interrogazioni puntuali di coordinate (sotto). I punti di colore blu sono quelli relativi al rilievo aerofotogrammetrico.

TRATTAMENTO DEI DATI, RASTER E MODELLI DIGITALI DI ELEVAZIONE

Al termine del processo fotogrammetrico/*structure from motion* il risultato è una nuvola di punti: milioni di punti nello spazio tridimensionale le cui coordinate (Est, Nord, quota ortometrica) sono riferimento al sistema di riferimento di progetto (EPSG 3003).

A partire da questa informazione si è proceduto all'elaborazione ed alla produzione degli output utili alla modellazione idraulica per cui questo rilievo è stato condotto.

Si tratta di **prodotti raster 2D**, o meglio 2.5D, che sono conosciuti come **Modelli Digitali di Elevazione - DEM** (*Digital Elevation Model*).

MODELLI DIGITALI DI ELEVAZIONE - DEM, DSM, DTM

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.

“Una superficie statistica è una rappresentazione della distribuzione dei valori di un determinato fenomeno definito, per ogni coppia di coordinate (X, Y), da un valore di Z, misurato o calcolato” (Robinson et al., 1995; DeMers, 1997).

Il termine statistico, associato al concetto di superficie, deriva dal fatto che questo tipo di rappresentazione si ottiene attraverso la stima del valore di una variabile dove non è stata fatta nessuna misura.

Le tecniche statistiche di stima si usano quando una variabile è calcolata in ogni punto di una superficie a partire da dati misurati solo in alcune posizioni.

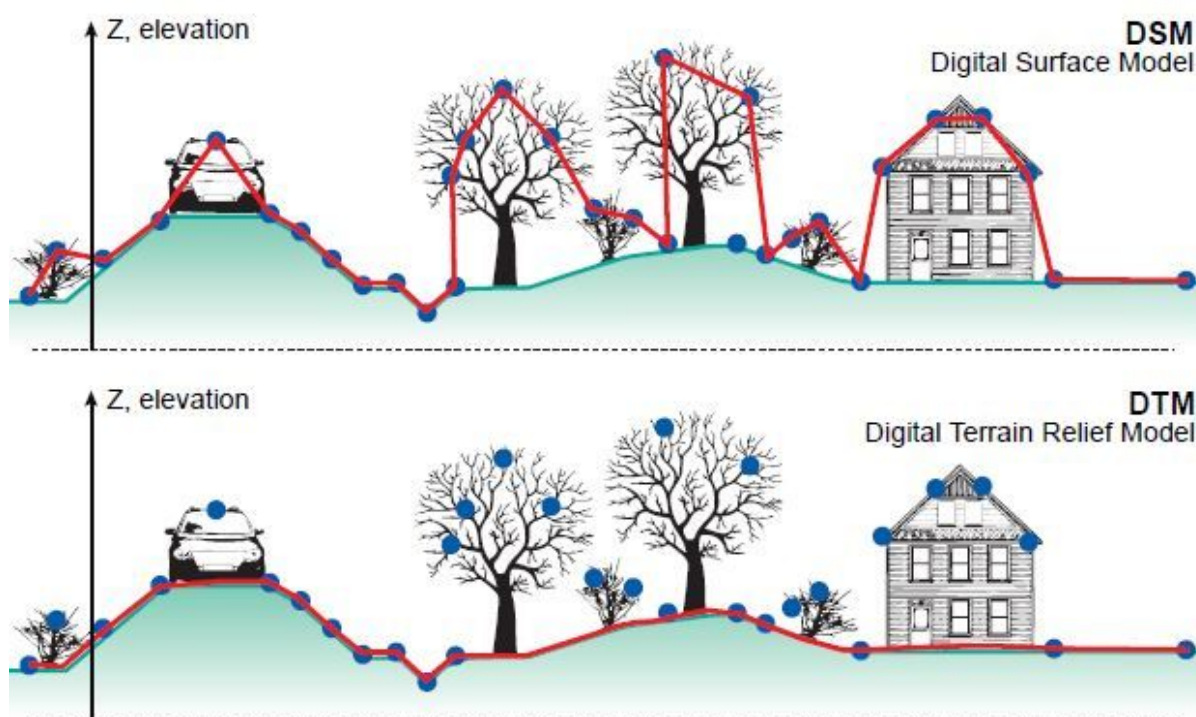
Per calcolare i punti sconosciuti ci si affida a processi di interpolazione o estrapolazione.

L'interpolazione usa algoritmi che calcolano i punti incogniti da misure esistenti attorno ad essi. L'estrapolazione invece stima le informazioni oltre il limite dei dati disponibili.

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.

Nello specifico del caso topografico con **DSM** (*Digital Surface Model*) si intende la **superficie terrestre comprensiva degli oggetti che ci sono sopra: edifici, alberi ed altri manufatti**.

Il **DTM** (*Digital Terrain Model*), rappresenta invece l'**andamento della superficie del suolo senza gli elementi antropici e vegetazionali**.



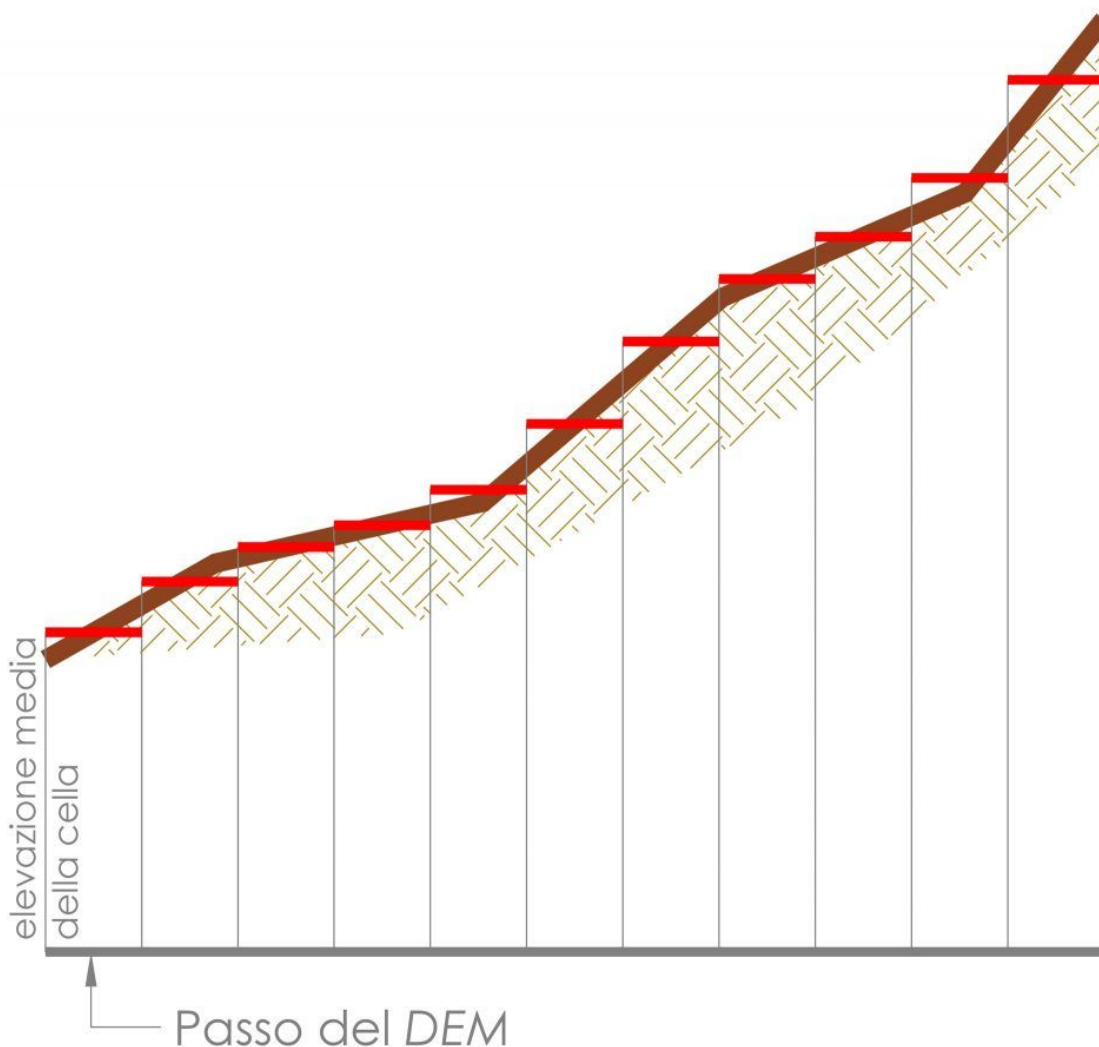
Differenze tra DSM (*Digital Surface Model*) - sopra - e DTM (*Digital Terrain Model*) - sotto.

RISOLUZIONE DEI DEM

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**.

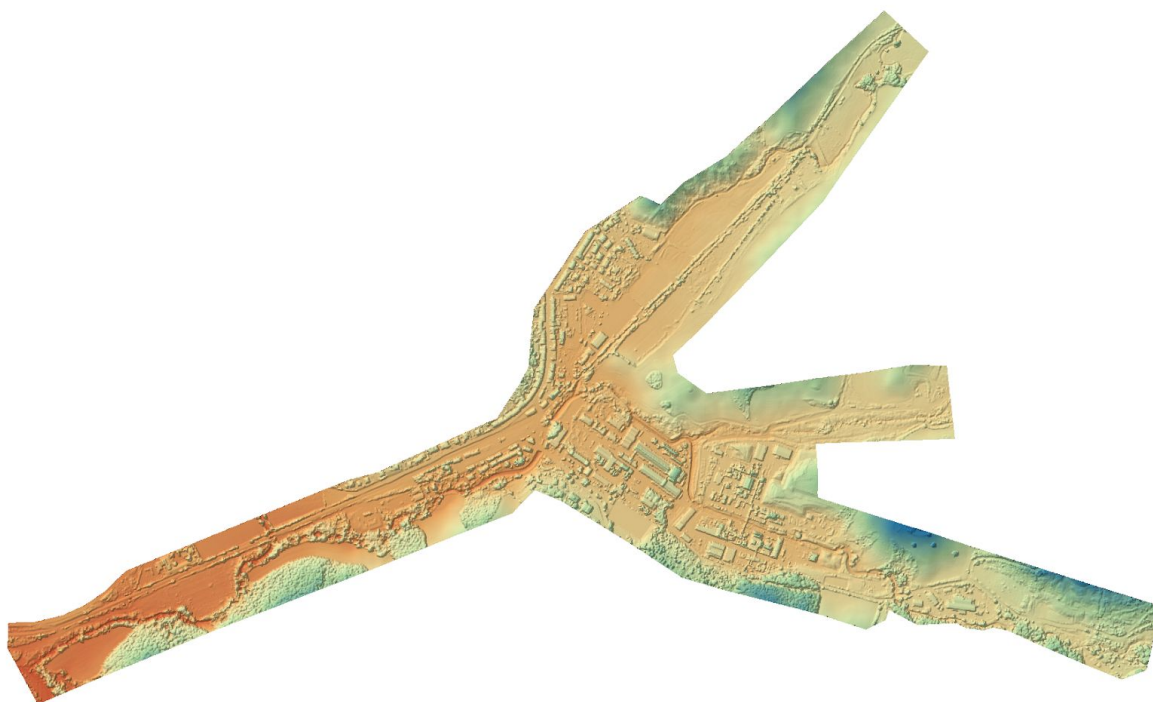
Ciascun quadrato è parte di piano orizzontale delimitato dai suoi quattro vertici (di cui sono note le coordinate X e Y) ed ha un'elevazione (un valore di Z) che è pari all'elevazione media di tutti i punti che ricadono all'interno.



Al fine di garantire una descrizione completa del territorio modellato, sufficientemente accurata ma non troppo dettagliata da rischiare di mandare in crisi i software di modellazione idraulica, si è scelto di elaborare i modelli digitali di elevazione affinché la **risoluzione fosse pari a 50 cm/pixel**.

MODELLO DIGITALE DELLE SUPERFICI - DSM

Il primo DEM ottenibile dalla nuvola di punti è il modello digitale delle superfici - DSM - dove è descritto e rappresentato tutto quello presente al suolo al momento dell'acquisizione dei dati.



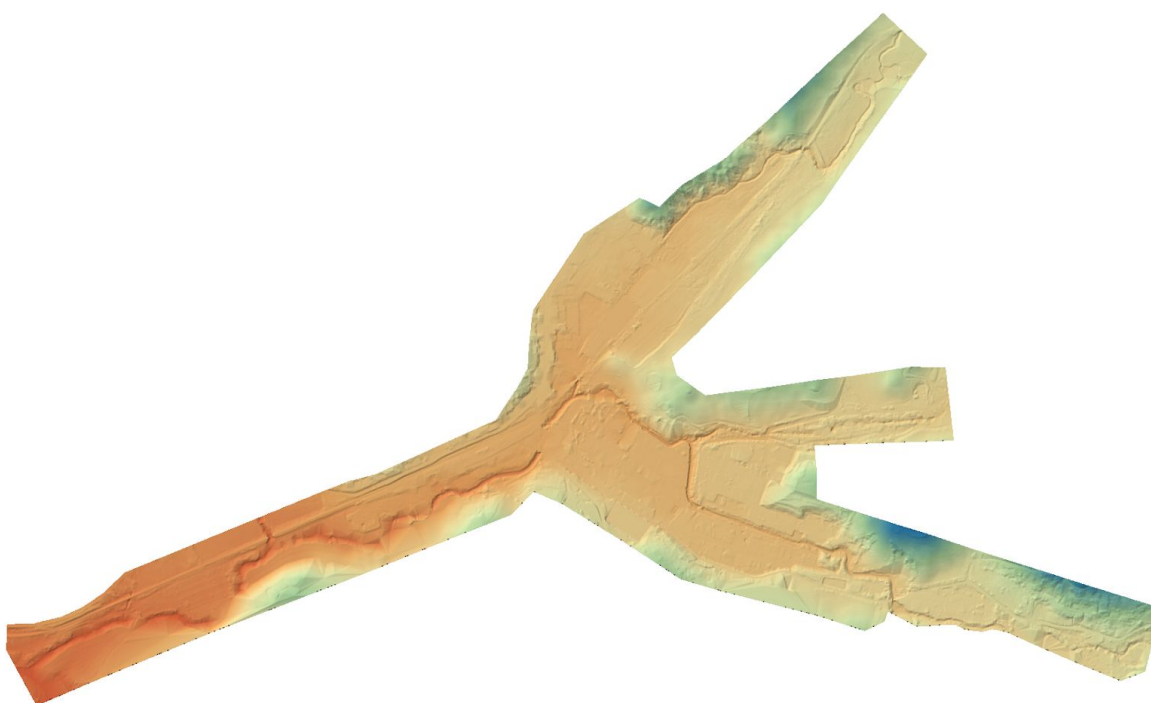
Modello Digitale delle Superfici - DSM - per l'area oggetto di indagine

MODELLO DIGITALE DEL TERRENO - DTM

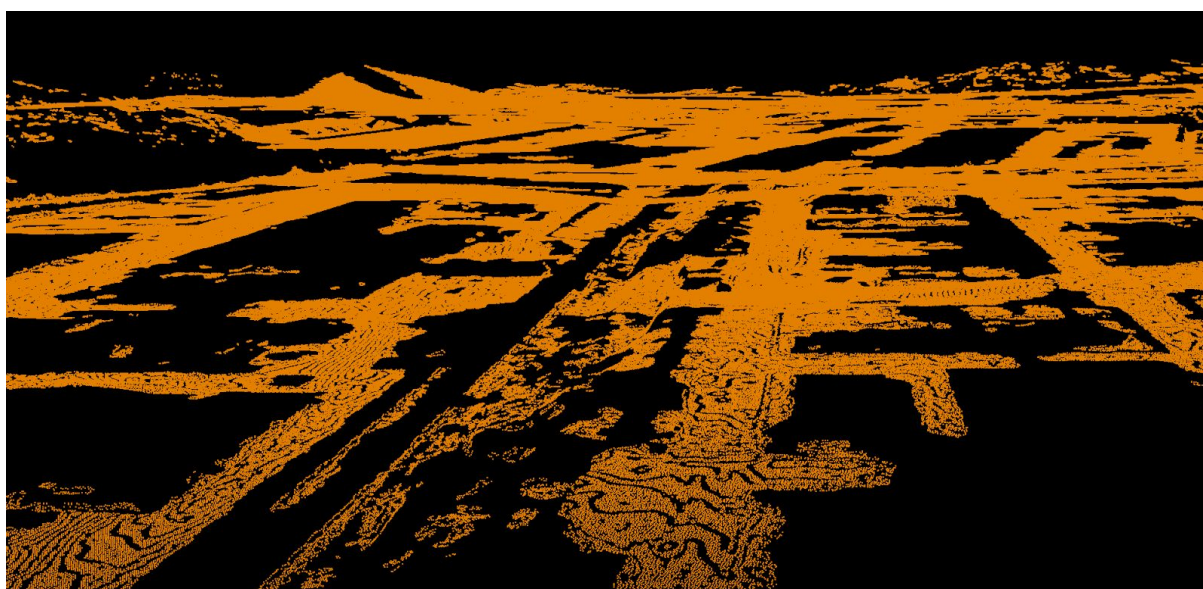
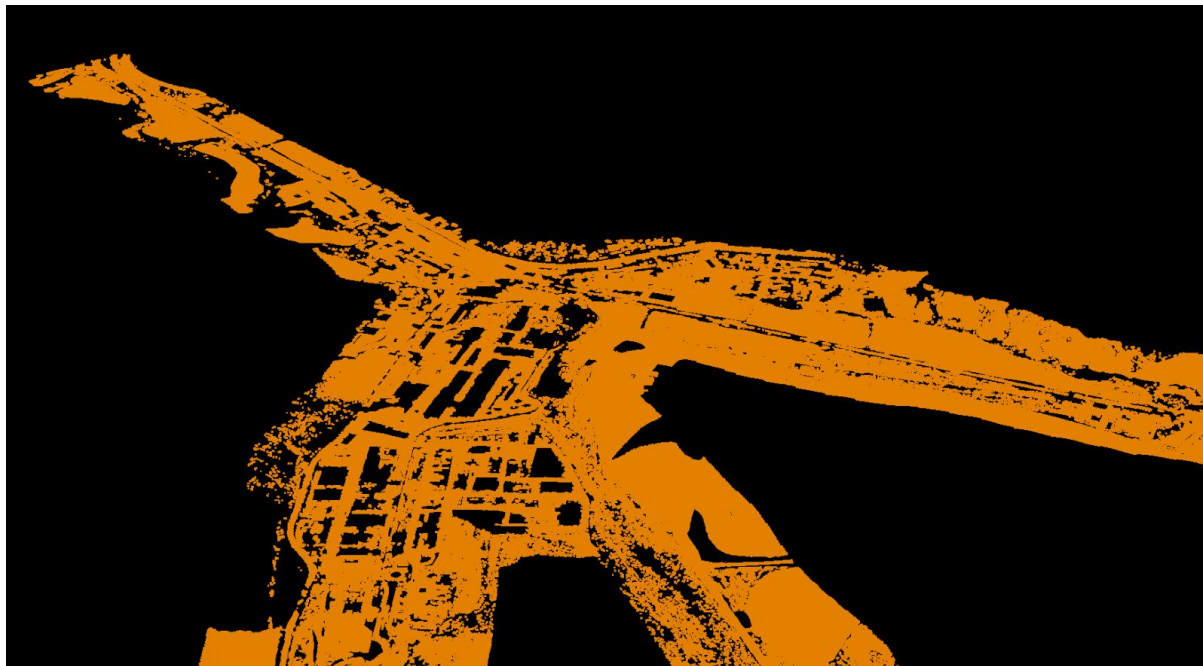
Il processo per l'elaborazione del DTM - Modello Digitale del Terreno - richiede un'elaborazione specifica della nuvola di punti, finalizzata a rimuovere tutti gli elementi diversi dal suolo nudo.

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 aerofotogrammetrica 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 ed edificate, escluse dal filtro di classificazione del terreno di cui ai punti precedenti;
4. Sottocampionamento della nuvola di punti al fine di ottenere in output un output meno denso ma comunque significativo per la generazione del Modello Digitale del Terreno (spaziatura media tra i punti 20 cm);
5. Generazione del Modello Digitale del Terreno secondo un processo di rasterizzazione del dato 3D a formare un output con passo 50 cm/pixel.



Modello Digitale del Terreno - DTM - per l'area oggetto di indagine ricavato al termine della procedura di elaborazione dei dati tridimensionali da rilievo aerofotogrammetrico



Classificazione ed estrazione dei punti del terreno dalla nuvola di punti aerofotogrammetrica

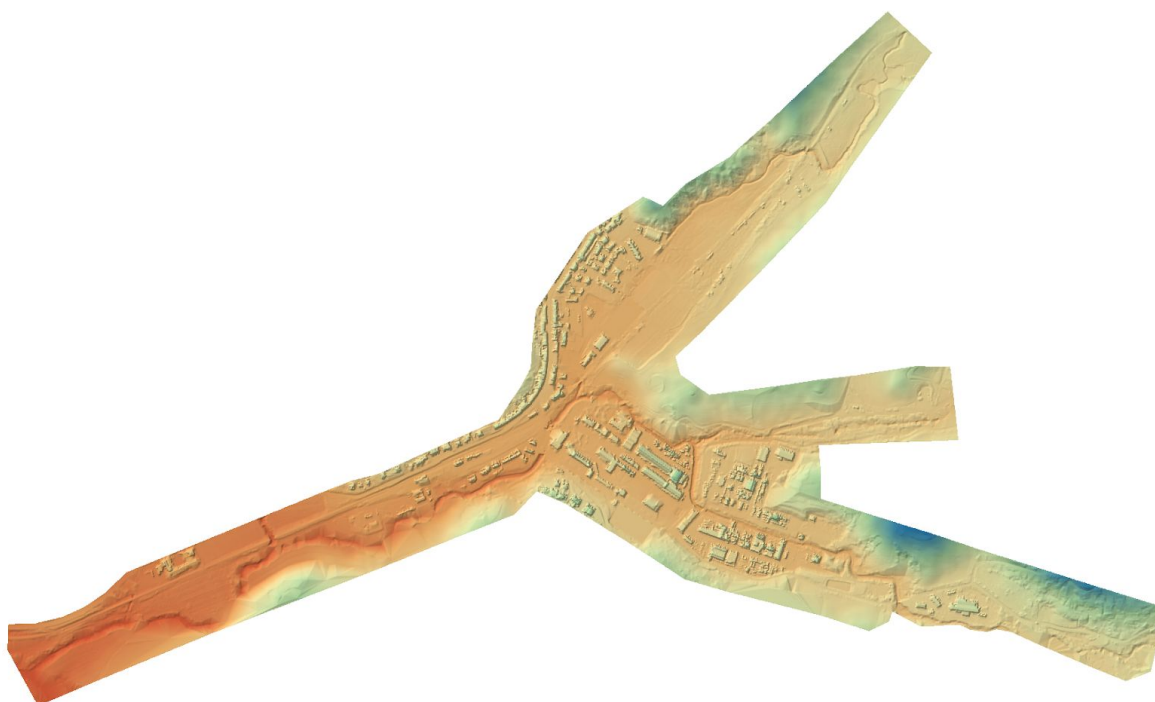
MODELLO DIGITALE DELLE SUPERFICI OPACHE

In considerazione dell'impiego di tali modelli digitali di elevazione è stato infine elaborato un modello che comprendesse le **informazioni del terreno unite solamente all'edificato in sito.**

In tal modo è possibile usufruire di informazioni 2.5D riferite a quanto effettivamente impermeabile al suolo e che possa costituire un ostacolo al deflusso della acque.

Edifici ed insediamenti industriali offrono infatti una barriera all'acqua e possono modificare la distribuzione delle velocità ed i tiranti idrici locali.

L'elaborazione di tale DSM, che è stato chiamato *Modello Digitale delle Superfici opache (DSMo)*, parte dalla definizione del DTM, di cui al punti precedente, a cui si è sommato un nuovo modello costituito solo dai contributi dell'edificato estratti dalla nuvola di punti.



Modello Digitale delle Superfici opache per l'area del rilievo (sopra) e estrazione dei fabbricati dalla nuvola di punti aerofotogrammetrica (sotto).

NOTA TECNICA SUL PROCESSO FOTOGRAMMETRICO

La fotogrammetria è una tecnica passiva. Ciò significa che è possibile ricostruire (in termini di dimensione, posizione e forma) solo quanto visibile nelle immagini del dataset.

Nelle aree vegetate e boscate il suolo è nascosto alla vista dell'ottica fotografica dalle chiome degli alberi. Per tale motivo risulta difficile risalire ai dati topografici, ricavati dal processo fotogrammetrico, in tali contesti.

Al fine di produrre un modello digitale del terreno (DTM) rappresentativo delle aree limitrofe ai corsi d'acqua si è pertanto fatto ricorso alla tecnica dell'**interpolazione**.

A tale scopo gli algoritmi di creazione del raster (DEM) hanno riempito i buchi del dato 3D (nuvola densa) mediante tecniche di ricostruzione a partire dalle informazioni reperite dalle zone limitrofe.

Se per piccoli settori tale processo produce dati ancora significativi è pur vero che in corrispondenza di aree più vaste e di zone perimetrali (con riferimento ai limiti dell'area rilevata) tale interpolazione può portare ad una semplificazione marcata della realtà.

Tuttavia, in considerazione della presenza di dati topografici pregressi e di cui ai rilievi precedentemente condotti, che hanno descritto con maggior dettaglio le sezioni di deflusso, descritte in modo meno preciso dal rilievo aerofotogrammetrico (perchè nascoste alla vista della fotocamera a bordo del drone), si ritiene che il modello digitale del terreno nelle aree limitrofe ai corsi d'acqua, anche nelle parti interpolate, sia sufficientemente rappresentativo della morfologia, della topografia e dell'orografia del terreno.



(Sopra) Fotografia area presa durante i voli fotogrammetrici di un'area boscata e (sotto) nuvola di punti rappresentativa dei punti del terreno da cui è stata rimossa la componente vegetazionale al suolo

ORTOFOTO

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.

L'ortomosaico prodotto per l'area di cui al presente rilievo ha una **risoluzione di 3 cm/pixel**.

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.



Ortomosaico in alta definizione dell'area oggetto di rilievo



RILIEVO A MEZZO DRONE
*Finalizzato all'adeguamento dello studio idraulico di supporto
alla redazione del Piano Operativo in Loc. Saline di Volterra (PI)*

APPENDICE

REPORT DI ELABORAZIONE FOTOGRAMMETRICA

Survey Data

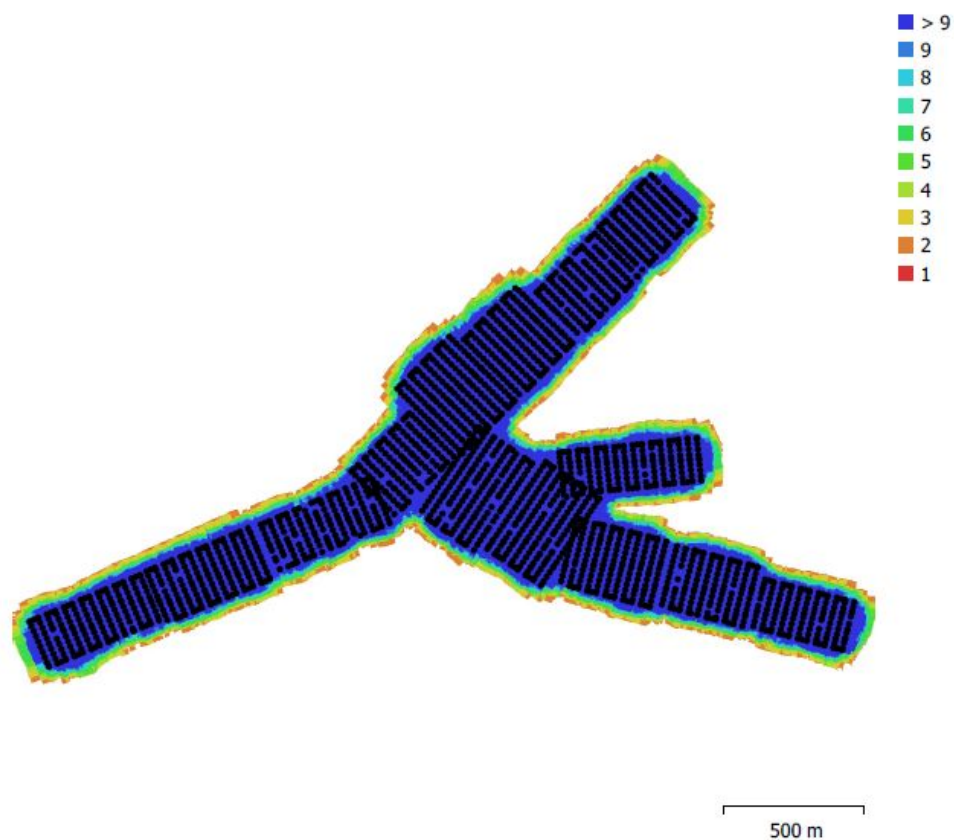


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	2,311	Camera stations:	2,311
Flying altitude:	116 m	Tie points:	1,291,741
Ground resolution:	2.86 cm/pix	Projections:	5,192,347
Coverage area:	1.8 km ²	Reprojection error:	0.312 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310, 24.0 mm (8.8mm)	5464 x 3640	8.8 mm	2.42 x 2.42 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

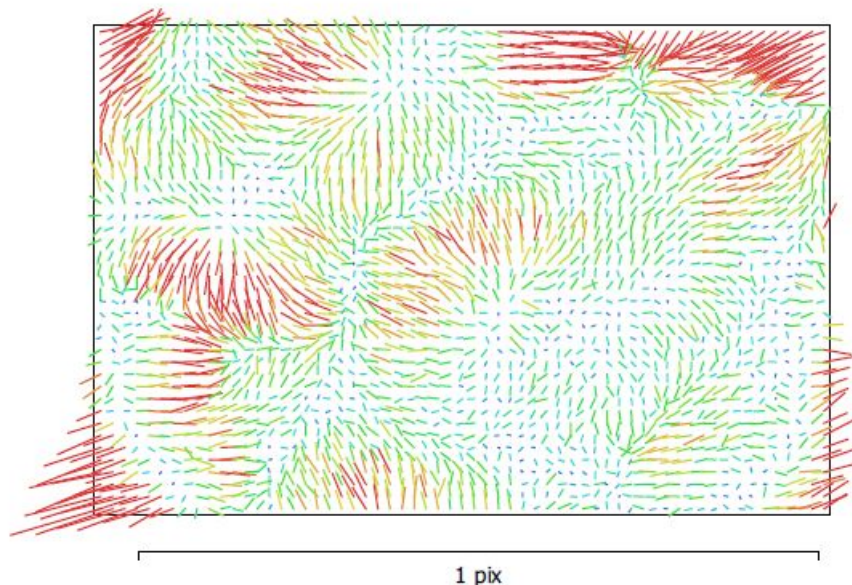


Fig. 2. Image residuals for FC6310, 24.0 mm (8.8mm).

FC6310, 24.0 mm (8.8mm)

2311 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5464 x 3640	8.8 mm	2.42 x 2.42 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3666.09	0.18	1.00	0.46	0.25	-0.01	-0.09	-0.14	0.15	-0.10	0.05	-0.02	0.04
Cx	-1.04812	0.0065		1.00	0.11	0.03	0.00	-0.06	0.06	-0.04	0.01	0.53	0.01
Cy	12.1417	0.005			1.00	-0.07	0.02	-0.03	0.03	-0.02	0.01	-0.01	0.48
B1	-0.261682	0.0012				1.00	0.01	0.04	-0.04	0.03	-0.03	0.02	-0.02
B2	-0.856618	0.0011					1.00	0.01	-0.01	0.01	-0.00	0.05	0.02
K1	-0.0166282	1.1e-05						1.00	-0.97	0.92	-0.87	0.01	-0.00
K2	0.0391015	5.4e-05							1.00	-0.99	0.95	-0.01	0.00
K3	-0.0328688	0.0001								1.00	-0.99	0.01	-0.00
K4	0.00681573	6.7e-05									1.00	-0.00	0.00
P1	-3.09531e-05	3.8e-07										1.00	-0.00
P2	0.00012357	2.9e-07											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

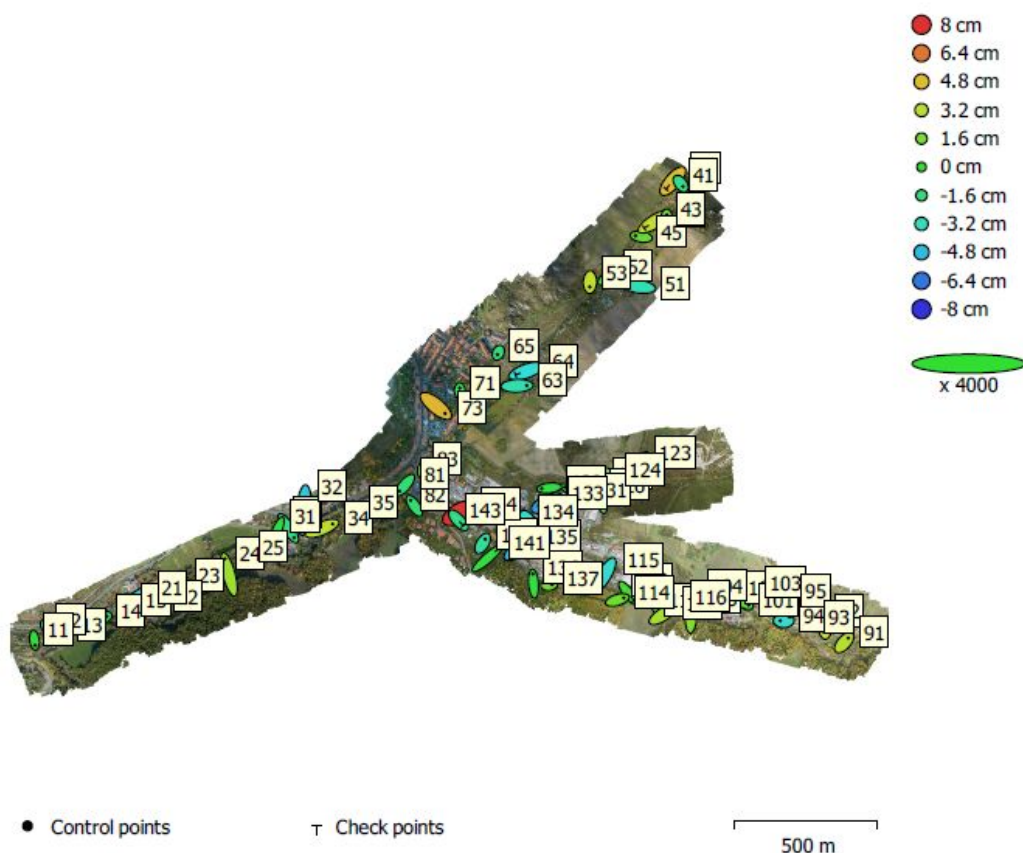


Fig. 3. GCP locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
49	0.98031	1.10267	2.46343	1.47543	2.87148

Table 3. Control points RMSE.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
13	1.33052	1.19163	3.08089	1.78613	3.5612

Table 4. Check points RMSE.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
126	-0.366725	1.56189	-0.922216	1.85053	0.165 (38)
51	-1.82606	0.263963	-3.06681	3.57904	0.119 (37)
14	0.483582	0.122538	-1.11856	1.22476	0.141 (34)
123	-0.483067	-0.80367	2.34979	2.52998	0.156 (34)
45	-1.0021	0.166525	1.12773	1.5178	0.190 (34)
73	1.58877	-1.2949	4.91456	5.32483	0.129 (32)
15	-0.548748	0.581721	0.684133	1.05241	0.147 (32)
33	1.04412	-1.63647	-1.84972	2.68136	0.116 (31)
102	-1.07907	1.15728	0.545204	1.6736	0.148 (30)
131	-1.40809	0.667735	-0.292558	1.58561	0.196 (30)
132	-1.30314	-0.145127	-0.338184	1.3541	0.250 (30)
112	-0.567814	0.93481	0.423543	1.17289	0.127 (29)
136	-0.128964	1.69545	-0.369263	1.73998	0.223 (29)
34	1.86992	0.765005	3.21671	3.79856	0.169 (29)
142	0.471708	0.764712	-2.42216	2.58344	0.151 (28)
124	1.69558	-0.45709	1.12672	2.08648	0.170 (28)
135	-1.65041	-1.18986	-4.97596	5.37585	0.169 (28)
71	-0.0238627	0.503497	-1.07174	1.18436	0.133 (26)
94	-0.604985	0.0046684	-3.68437	3.73371	0.196 (26)
83	0.195309	0.730812	0.686437	1.02148	0.212 (26)
52	1.06569	0.92741	0.491223	1.49569	0.163 (25)
115	-1.12975	-1.91511	-3.61076	4.24047	0.243 (25)
82	-0.647582	0.943458	-1.40052	1.80857	0.159 (24)
43	-0.0159251	0.483701	1.48788	1.56461	0.134 (24)
137	0.507001	0.0647801	1.41446	1.50397	0.148 (24)
101	0.729057	-0.349839	0.674443	1.05299	0.173 (24)
81	-0.908619	-1.04997	-1.42906	1.99254	0.203 (23)
103	-1.63814	0.623423	-0.0790077	1.75453	0.201 (23)
114	1.14093	0.34155	1.32075	1.77842	0.161 (22)
134	0.694513	-1.0577	-3.62149	3.83618	0.324 (22)
31	-0.783451	-1.86309	-0.181429	2.02924	0.231 (22)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
35	0.202337	1.3385	1.0339	1.70337	0.300 (22)
91	0.697829	0.789818	3.12841	3.30117	0.161 (21)
95	-0.0436605	-1.44623	-0.940686	1.72579	0.220 (21)
23	-0.474173	1.29564	-0.102974	1.38352	0.238 (20)
12	0.25461	-0.363424	-1.98406	2.03308	0.153 (19)
93	-0.721547	-0.469206	-0.0149791	0.860819	0.151 (19)
104	0.537962	-0.969748	-2.22932	2.48991	0.172 (19)
111	1.41087	0.89157	2.74076	3.20893	0.247 (18)
144	-1.30649	-0.792887	7.90379	8.05019	0.574 (16)
11	0.113597	-0.900937	-0.0823575	0.911798	0.151 (16)
116	2.19611	-1.52789	3.1687	4.14705	0.279 (16)
53	-0.026921	-0.829217	3.34293	3.44435	0.347 (13)
41	0.394278	-0.494287	-2.09561	2.18891	0.276 (10)
24	-0.726614	2.74878	2.46749	3.76461	0.229 (9)
22	0.000143489	0.408187	1.45859	1.51463	0.186 (28)
65	-0.153369	-0.318756	-1.72933	1.76514	0.296 (22)
63	1.69913	0.0768575	-2.85779	3.32564	0.277 (21)
32	-0.204702	-3.12484	-4.50386	5.48555	0.207 (30)
Total	0.98031	1.10267	2.46343	2.87148	0.204

Table 5. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
125	-1.3708	-0.133787	-1.56838	2.0873	0.140 (44)
92	0.119309	-1.4262	3.87983	4.13538	0.170 (35)
113	1.0033	-1.29186	0.405716	1.68526	0.132 (31)
13	1.61373	0.758707	-0.245336	1.79999	0.124 (29)
133	-1.47782	-0.710094	-5.3684	5.61319	0.129 (27)
44	-1.83108	-1.12965	3.39772	4.02163	0.228 (27)
105	0.0865265	2.1031	1.87183	2.81679	0.118 (25)
141	1.9918	1.72091	-0.327485	2.65255	0.105 (20)
143	0.834369	-0.904059	-2.0235	2.36814	0.117 (16)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
42	-1.17192	-1.36802	4.65496	4.99135	0.202 (12)
21	1.36511	1.01928	-4.48113	4.79406	0.233 (26)
64	-1.87659	-0.648216	-3.83867	4.32171	0.208 (15)
25	0.737049	0.92216	1.04977	1.57976	0.304 (26)
Total	1.33052	1.19163	3.08089	3.5612	0.177

Table 6. Check points.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

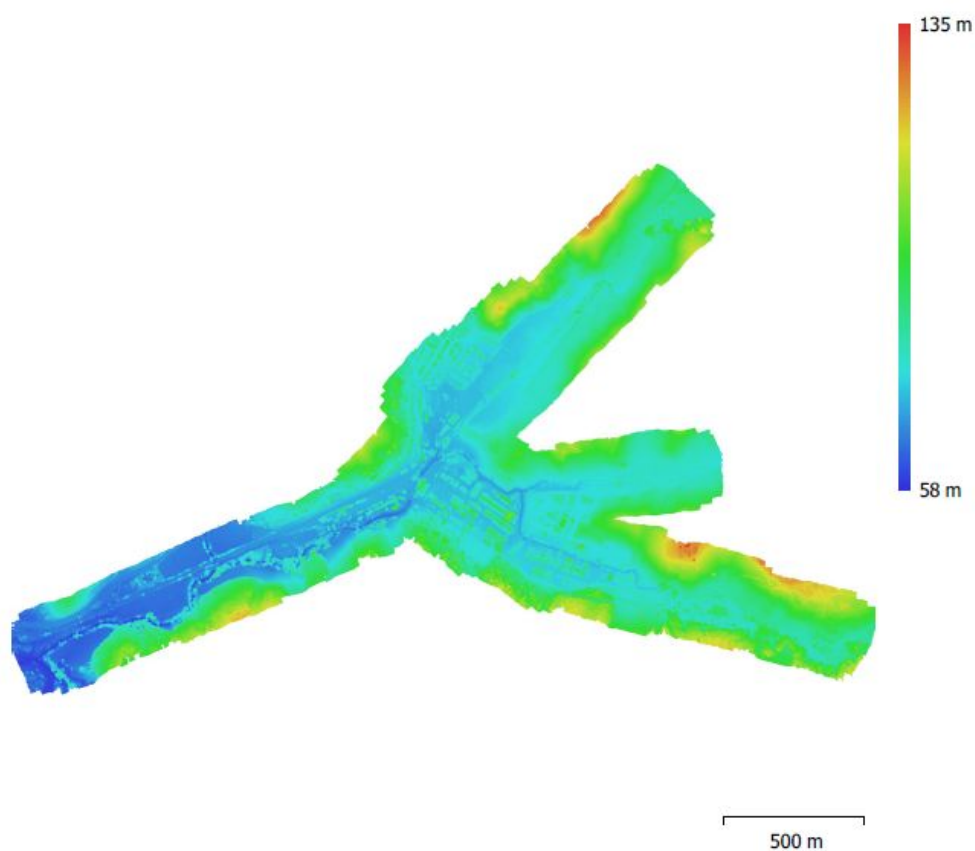


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 5.72 cm/pix
 Point density: 306 points/m²

Processing Parameters

General

Cameras	2311
Aligned cameras	2311
Markers	62
Coordinate system	Monte Mario / Italy zone 1 (EPSG::3003)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	1,291,741 of 1,907,645
RMS reprojection error	0.100663 (0.31183 pix)
Max reprojection error	0.482345 (2.17589 pix)
Mean key point size	3.01785 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	5.01606

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	2 hours 5 minutes
Matching memory usage	1.37 GB
Alignment time	16 minutes 7 seconds
Alignment memory usage	954.37 MB

Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Fit additional corrections	Yes
Adaptive camera model fitting	Yes
Optimization time	1 minutes 36 seconds
Software version	1.6.3.10732
File size	181.33 MB

Depth Maps

Count	2311
-------	------

Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Aggressive
Processing time	20 hours 43 minutes
Memory usage	4.06 GB
Software version	1.6.3.10732
File size	12.94 GB

Dense Point Cloud

Points	949,640,066
Point colors	3 bands, uint8

Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Aggressive
Processing time	20 hours 43 minutes
Memory usage	4.06 GB



Dense cloud generation parameters	
Processing time	12 hours 30 minutes
Memory usage	14.73 GB
Software version	1.6.3.10732
File size	13.28 GB
DEM	
Size	66,219 x 49,776
Coordinate system	Monte Mario / Italy zone 1 (EPSG::3003)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	1 hours 19 minutes
Memory usage	375.41 MB
Software version	1.6.3.10732
File size	2.20 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.6.5 build 11249
OS	Windows 64 bit
RAM	63.91 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-5820K CPU @ 3.30GHz
GPU(s)	GeForce GTX 980