Analisi multi-temporale del volume di residui dell'invaso sito in Val Clarea

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea Magistrale



Relatore:

Prof. Andrea Maria Lingua

Correlatore:

Prof.ssa Irene Aicardi

Candidato:

Sergio Misiti

Anno accademico 2018/2019

Abstract

Un invaso è una costruzione idraulica il cui scopo è quello di contenere al suo interno ingenti quantità di acqua per fini che vanno da quello agricolo a quello per cui è maggiormente utilizzato, rappresentato dalla produzione di energia idroelettrica. Quest'ultimo è il caso dell'invaso sito in Val Clarea, oggetto di studio. Il presente lavoro di tesi ha come fine quello di monitorare il materiale residuo depositato dall'acqua all' interno della struttura, provocandone una riduzione notevole della effettiva. capacità Partendo dall'acquisizione di dati ottenuti da rilievi topografici, fotogrammetrici con drone e da rilievi con laser scanner terrestre, svolti nelle campagne del 2018 e 2019, si ottengono, attraverso gli attuali software di elaborazione, modelli tridimensionali da cui poter effettuare analisi mediante i moderni sistemi informativi geografici tridimensionali (GIS). Il risultato ultimo dello studio è la stima di materiale residuo depositato ottenuto mediante la stima del volume formatosi tra le due osservazioni. Infine, si ottiene una visualizzazione temporale dei dati elaborati, creando un modello che permetta l'implementazione futura di nuove osservazioni.

A reservoir is a hydraulic construction whose purpose is to contain inside a large quantities of water. Its use is different, for instance it can be used for agriculture or to generate electricity (hydropower), this is its greatest use. The latter is the case of the reservoir situated in Val Clarea, object of the study. The purpose of this dissertation is to monitor the residual material, deposited by the water, that flods the structure and, for effective this, reduces the capacity significantly. Starting from the acquisition of data, obtained from topography, photogrammetric surveys with drone and surveys with a terrestrial laser scanner, carried out in the countryside of 2018 and three-dimensional 2019. models are obtained through modern processing software from which it is possible to carry out the analysis using the modern threegeographic dimensional information systems (GIS). The final result of the study is the estimation of the deposited residual material and the estimated volume between the two observations. Finally, a temporal visualization of the processed data is obtained, creating a model that allows the future implementation of new observations.

Indice

Indice delle figure
Indice delle tabelle
Introduzione e finalità7
Inquadramento geografico e sito d'interesse
Integrazione tra tecniche
3.1 Elementi di topografia11
3.2 Tecnica fotogrammetrica
3.3 Tecnica aereo fotogrammetrica
3.4 Structure from motion
3.5 Strumentazioni
3.5.1 Stazione totale
3.5.2 Droni
3.5.3 Laser scanner terrestri
Acquisizioni
4.1 Acquisizione topografica
4.2 Acquisizione aereo fotogrammetrica
4.3 Rilievo con laser scanner terrestre
Elaborazione dati
5.1 Elaborazione dati topografici
5.2 Elaborazione dati fotogrammetrici43
5.3 Elaborazione scansioni laser
Analisi e confronti
6.1 Confronto dei modelli ottenuti con 3DReshaper
6.2 Stima del volume residuo72
6.3 Analisi multi-temporale
Conclusioni
Bibliografia94
Sitografia94
Ringraziamenti

Indice delle figure

Figura 1 - Inquadramento geografico - Italia, Piemonte, Torino, Giaglione	9
Figura 2 – Inquadramento geografico – Val Clarea [5]	10
Figura 3 – Invaso artificiale in Val Clarea	10
Figura 4 – Geoide	12
Figura 5 – Ellissoide	12
Figura 6 - Altezza ellissoidica e quota ortometrica	14
Figura 7 - Schema geometria della presa fotografica [15]	16
Figura 8 - Ripresa dell'oggetto da due fotogrammi [15]	16
Figura 9 - Orientamento interno [17]	17
Figura 10 - Orientamento esterno[17]	18
Figura 11 - Schema di ricostruzione [15]	19
Figura 12 - Parametri scala [15]	20
Figura 13 - Schema ripresa aerea [16]	21
Figura 14 - Copertura del territorio [16]	21
Figura 15 - Parametri di due strisciate adiacenti [16]	22
Figura 16 - Concatenamento tra modelli stereoscopici [16]	22
Figura 17 – Parametri di scala del fotogramma [16]	23
Figura 18 - Tabella della Commissione Geodetica Italiana [16]	24
Figura 19 - Copertura sito da rilevare [16]	25
Figura 20 - Prisma riflettente	27
Figura 21 - Total Station (Image Station Leica Geosystem)	27
Figura 22 - Aeromobili a pilotaggio remoto	28
Figura 23 - Drone multirotore	29
Figura 24 - Sistema Gimbal	30
Figura 25 - Drone DJI Phantom 4 PRO	31
Figura 26 - Laser scanner terrestre: Riegl VZ-400i	34
Figura 27 - Specifiche laser scanner Riegl VZ-400i	34
Figura 28 - Posizionamento vertici	
Figura 29 - Tassello con piattello in alluminio e rondella grigia	
Figura 30 - Chiodo con rondella grigia	36
Figura 31 - Tipi di marker	
Figura 32 - Posizionamento laser scanner	38
Figura 33 - Marker catarifrangente	
Figura 34 - Impostazione "Starnet" (Adjustment")	40
Figura 35 - Impostazione "Starnet" (General)	40
Figura 36 - Impostazione "Starnet" (Instrumet)	41
Figura 37 - Input "Starnet"	42
Figura 38 - Rete di dettaglio	42
Figura 39 - Procedimento Metashape	43
Figura 40 - Acronimo "Not Aligned"	43
Figura 41 - Posizionamento marker	44
Figura 42 - Marker posizionati	44
Figura 43 - Allineamento fotogrammi-vista dall'alto (rilievo 12/6/2018)	45

Indice delle figure

Figura 44 - Allineamento fotogrammi-ingrandimento (rilievo 12/6/2018)	46
Figura 45 - Allineamento fotogrammi-vista dall'alto (rilievo 12/3/2019)	46
Figura 46 - Allineamento fotogrammi-ingrandimento (rilievo 12/3/2019)	46
Figura 47 - Ingrandimento su triangoli della mesh creata (visualizzazione solid)	48
Figura 48 - Ingrandimento su triangoli della mesh creata (visualizzazione wireframe)	48
Figura 49 - Nuvola densa (rilievo 12/6/2018)	49
Figura 50 - Mesh triangolare tridimensionale con texure (rilievo 12/6/2018)	50
Figura 51 – DEM (rilievo 12/6/2018)	50
Figura 52 – Ortofoto (rilievo 12/6/2018)	51
Figura 53 - Nuvola densa (rilievo 12/3/2019)	51
Figura 54 - Mesh triangolare tridimensionale con texure (rilievo 12/3/2019)	52
Figura 55 – DEM (rilievo 12/3/2019)	52
Figura 56 – Ortofoto (rilievo 12/3/2019)	53
Figura 57 - Procedimento Riscan Pro	54
Figura 58 - Interfaccia "Riscan"	55
Figura 59 - Matrice SOP	55
Figura 60 - Nuvola "sporca"	56
Figura 61 - Nuvola pulita	56
Figura 62 - Impor "tiepoint"	57
Figura 63 - Visualizzazione tiepoints	57
Figura 64 – TPL (SOCS)	58
Figura 65 - Import tiepointlist	58
Figura 66 - TPL(GLCS)	59
Figura 67 - Scostamenti e "Find correspoding points"	59
Figura 68 - Nuvole di punti registrate	60
Figura 69 - Esportazione modello	60
Figura 70 - Nuvola densa (rilevo 12/6/2018)	62
Figura 71 - Nuvola densa "pulita" (rilevo 12/6/2018)	63
Figura 72 - Nuvola densa (rilevo 12/3/2019)	63
Figura 73 - Nuvola densa "pulita" (rilevo 12/3/2019)	64
Figura 74 – Mesh (rilievo 12/6/2018)	64
Figura 75 - Mesh "pulita" (rilievo 12/6/2018)	65
Figura 76 - Mesh (rilievo 12/3/2019)	65
Figura 77 - Mesh "pulita" (rilievo 12/3/2019)	66
Figura 78 - Nuvola pulita laser scanner (12/3/2019)	66
Figura 79 - Pareti inclinate nuvola invaso (12//6/2018)	67
Figura 80 - Pareti inclinate nuvola invaso (12//3/2019)	68
Figura 81 - Pareti inclinate mesh invaso (12//6/2018)	68
Figura 82 - Pareti inclinate mesh invaso (12//3/2019)	69
Figura 83 - Confronto 1	69
Figura 84 - Confronto 2	70
Figura 85 - Confronto 3	70
Figura 86 - Confronto 4	71
Figura 87 - Matrice raster	72
Figura 88 - DEM (12/6/2018)	73
Figura 89 - DEM (12/3/2019)	73
Figura 90 - Ortofoto (12/6/2018)	74

Indice delle figure

Figura 91 - Ortofoto (12/3/2019)	74
Figura 92 - DEM ritagliata (12/6/2018)	75
Figura 93 - Ortofoto ritagliata (12/3/2019)	75
Figura 94 - Marker (12/6/2018)	76
Figura 95 - Marker (12/3/2019)	76
Figura 96 - Posizionamento sezioni	78
Figura 97 - DEM senza prese d'acqua (12/6/2018)	78
Figura 98 - DEM senza prese d'acqua (12/3/2019)	79
Figura 99- Tabella attributi sezione	79
Figura 100 - Punti profilo ("Excel")	79
Figura 101 - Profili sezione A	80
Figura 102 - Profili sezione B	80
Figura 103 - Profili sezione C	81
Figura 104 - Profili sezione D	81
Figura 105 - Profili sezione E	82
Figura 106 - Profili sezione F	82
Figura 107 - Differenza tra DEM	83
Figura 108 - Differenza tra DEM tagliata	84
Figura 109 - Tabella delle altezze dei punti	84
Figura 110 - Statistiche (somma)	85
Figura 111 - Area materiale residuo	86
Figura 112 - Tabella attributi geodatabase con riferimento temporale	87
Figura 113 - Proprietà tempo	88
Figura 114 - Tabella attributi marker (12/6/2018)	88
Figura 115 - Visualizzazione temporale: ortofoto 12/6/2018	89
Figura 116 - Visualizzazione temporale: ortofoto con marker 12/6/2018	89
Figura 117 - Visualizzazione temporale: DEM con marker 12/6/2018	90
Figura 118 - Visualizzazione temporale: ortofoto 12/3/2019	90
Figura 119 - Visualizzazione temporale: ortofoto con marker 12/3/2019	91
Figura 120 - Visualizzazione temporale: DEM con marker 12/3/2019	91

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Datum usati in Italia [11]	14
Tabella 2 - Parametri di volo [16]	24
Tabella 3 - Scheda tecnica (Velivolo)	
Tabella 4 - Scheda tecnica (Sistema di visione)	
Tabella 5 - Scheda tecnica (Fotocamera)	
Tabella 6 - Scheda tecnica GIMBAL	
Tabella 7 - Scheda tecnica (Sistema a infrarossi)	
Tabella 8 - Vertici	
Tabella 9 - Acquisizione 12/6/2018	
Tabella 10 - Acquisizione 12/3/2019	
Tabella 11 - Tabella riassuntiva 1	53
Tabella 12 - Tabella riassuntiva 2	53
Tabella 13 - Tempi di elaborazione	54
Tabella 14 - Tabella riassuntiva 3	71
Tabella 15 - Tipi di target	77
Tabella 16 - Tabella riassuntiva 4	

Introduzione e finalità

Capitolo 1

Introduzione e finalità

La presente tesi si sviluppa in seguito ai rilievi eseguiti dal gruppo di geomatica del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, Territorio e Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino inerente alla raccolta delle informazioni necessarie, nell'ambito di progetto di Ricerca con IREN, per l'analisi multi-temporale del materiale residuo presente nell'invaso sito in Val Clarea.

Il lavoro svolto ha come finalità, quindi, quella di avere a disposizione una serie di dati utili alla gestione e al monitoraggio del sito; ottenere una stima di quanto materiale si accumula nel tempo per poter prevedere un'attività di manutenzione, in quanto la presenza di materiale provoca una riduzione della capienza di acqua. Ciò è stato fatto mediante l'applicazione di metodologie geomatiche.

Si prefigge come obiettivo quello di ottenere una precisione di 4 cm, con una tolleranza di 8 cm, utilizzando una scala di 1:200.

Sono state effettuate due campagne di acquisizione in data 12/6/2018 e 12/3/2019, quindi a distanza di 9 mesi. L'oggetto di studio si trova in contesto alpino ed è stato possibile riscontrare, nella prima osservazione, una condizione di svuotamento del fondo; nella seconda osservazione è stato possibile riscontrare una condizione di parziale accumulo del materiale.

La realizzazione del lavoro è avvenuta tramite diverse fasi complementari tra loro.

La prima fase è stata quella di acquisizione dei dati in situ, ottenuta mediante il rilievo topografico, fotogrammetrico e con laser scanner terrestre. Nel primo rilievo si è realizzata una rete d'inquadramento utilizzando una tecnica mista con posizionamento GNSS (Global Navigation Satellite System) e uso della stazione totale.

Si è proseguito con il rilievo fotogrammetrico, acquisendo, in questo modo, un numero idoneo di fotogrammi dell'area oggetto di studio attraverso l'uso di un drone con camera incorporata.

Successivamente, si è utilizzato un laser scanner terrestre per eseguire l'ultimo rilievo, utile per avere un riscontro sull' idoneità dei dati acquisiti in precedenza.

La seconda fase ha previsto l'elaborazione dei dati acquisiti, mediante l'ausilio di software, ricreando modelli digitali 3D georeferenziati della zona d'interesse, quali nuvole di punti, mesh tridimensionali triangolari, DEM e ortofoto.

La terza fase è stata quella di confrontare i diversi modelli ottenuti dalle diverse campagne d'acquisizione al fine di verificarne l'attendibilità.

Nell'ultima fase si è svolta la stima del volume di materiale sedimentato tra le due osservazioni e un'analisi multi-temporale tra i modelli relativi allo stesso intervallo di tempo, mediante software "GIS". Il fine ultimo di tale analisi è quello di creare un modello "base" affinché esso possa essere implementato attraverso osservazioni future, permettendo di avere così un resoconto dettagliato nel tempo dei cambiamenti che avverranno.

Inquadramento geografico e sito d'interesse

Capitolo 2

Inquadramento geografico e sito d'interesse

Il sito oggetto d'esame è situato in Val Clarea, che si trova in una breve valle tributaria della Val di Susa, percorsa dal torrente Clarea, località Giaglione, provincia di Torino (Piemonte) (figura 1). La valle deve il suo nome ai depositi ghiaiosi che si accumulano in seguito allo scorrere di corsi d'acqua.



Figura 1 - Inquadramento geografico - Italia, Piemonte, Torino, Giaglione

Inquadramento geografico e sito d'interesse



Figura 2 – Inquadramento geografico – Val Clarea [5]

Oggetto dello studio è l'invaso (figura 3) situato proprio in Val Clarea (figura 2); per invaso s'intende una struttura artificiale, costruita con lo scopo di contenere grandi quantità di acqua, rilasciata, poi, gradualmente secondo i parametri di progetto. E' posto ad una quota di circa 1013 m s.l.m, ha una capienza di circa 560000 m³ e comprende un'area totale di circa 50000 m². Il serbatoio è utilizzato per alimentare parzialmente l'impianto idroelettrico di Pont Ventoux-Susa.



Figura 3 – Invaso artificiale in Val Clarea

(Fonte:<u>http://www.alpina-spa.it/it/idraulica/progetti/vasca-di-accumulo-in-val-clarea-dellimpianto-idroelettrico-di-pont-ventoux-susa#descrizione</u>)

Capitolo 3

Integrazione tra tecniche

Si vuole dare in questo capitolo una breve introduzione ai concetti utilizzati in seguito, per aiutare il lettore a meglio comprendere il lavoro di tesi svolto.

Per ottenere un risultato ottimale in termini di accuratezza geometrica è stata necessaria l'integrazione di diverse tecniche di modellazione, derivanti dall'utilizzo di diversi strumenti.

3.1 Elementi di topografia

La topografia è la scienza che si occupa di determinare e rappresentare metricamente la superficie terrestre. Per comprendere la topografia è necessario partire dalla Geodesia, la quale si occupa di semplificare la forma della Terra. Questa semplificazione viene effettuata considerando il campo gravitazionale e, quindi, la direzione della forza di gravità, che è verticale; è possibile considerare, in questo modo, una superficie che è in ogni punto perpendicolare alla direzione della verticale che prende il nome di "geoide" (figura 4).



Figura 4 – Geoide

(Fonte <u>https://www.openoikos.com/wp-</u> content/uploads/2015/03/ellissoide geodie cinesat.png)

Esso è una superficie equipotenziale, cioè ha ugual valore di potenziale gravitazionale, e rappresenta, in modo ottimale, la superficie media dei mari e della parte terrestre, ma non ha una definizione matematica; per questo motivo si fa riferimento ad una superficie di rotazione, matematicamente definita, che è l'ellissoide di rotazione. Si tengono in considerazione diversi ellissoidi, che si differenziano per i parametri di semiasse equatoriale a ed eccentricità e (figura 5).



Figura 5 – Ellissoide

(Fonte: https://geomappando.com/2016/01/26/sistemi-di-riferimento-coordinate-1parte/)

Il parametro di eccentricità, *e*, si ricava dall'equazione $e = \sqrt{a^2 - b^2/a^2}$, dove b rappresenta il semiasse polare (figura 5).

Prima di qualsiasi operazione è di fondamentale importanza la definizione del sistema di riferimento, grazie al quale è possibile relazionare oggetti e luoghi per poter calcolare distanze, superfici, volume, traiettorie di veicoli, e altro ancora.

Con il termine "georeferenziazione" si definisce la posizione di un punto sulla superficie terrestre, tale posizione è espressa attraverso un Sistema di Coordinate, il quale è riferito ad un Sistema di Riferimento o Datum.

"Un sistema di riferimento (SR) o Datum è un insieme di misure e di regole per la determinazione della posizione spaziotemporale di punti, qualsiasi sia il sistema di coordinate (SC). Quest'insieme di misure e regole deve bloccare i gradi di libertà lasciati liberi dalle misure vere e proprie" [2]

In pratica definire un Datum vuol dire definire un ellissoide di riferimento con parametri assegnati e orientato opportunamente rispetto alla Terra. Quindi, un Datum è un sistema di riferimento che consente di definire matematicamente la posizione dei punti sulla superficie terrestre ed è necessario, quindi, associare sempre le coordinate di un punto al suo Datum di riferimento. Essendo un concetto puramente teorico, occorre associare, nella pratica, un insieme di punti che si materializzano sulla superficie della Terra, di cui si conoscono le coordinate mediante misurazioni; tale insieme di punti prende il nome di "rete geodetica", che costituisce il "frame", cioè la realizzazione del Datum. Come ultimo passaggio c'è l'associazione del Datum alla rappresentazione cartografica.

Non esiste un unico Datum universale, in quanto ad ogni categoria di applicazione (scientifico, civile/militare, operativo) ne corrisponde uno specifico, con aggiornamenti nel tempo. Ne deriva che i Datum possono essere classificati, in relazione alla validità della loro codifica, in:

- Globali: la Geodesia moderna è basata sui sistemi satellitari di navigazione, detti "GNSS" di cui si parlerà in seguito. E' necessario utilizzare Datum tridimensionali con orientamento globale, i quali presentano una terna di assi cartesiani (X,Y,Z) fissa rispetto alla Terra. Tale terna ha origine posizionata nel baricentro terrestre, asse Z che coincide con quello di rotazione terrestre convenzionale, assi X e Y posizionati sul piano equatoriale e nello specifico l'asse X diretto secondo il meridiano di Greenwich. L'ellissoide ha il centro che è coincidente con l'origine della terna e semiasse minore diretto secondo l'asse Z, mentre quelli maggiori secondo gli assi X e Y. Un sistema del genere, solidale e geocentrico con la Terra, prende il nome di "ECEF" (Earth Centered Earth Fixed);
- Locali, quelli riferiti a regioni terrestri, coincidenti in genere con i territori nazionali.

Un altro modo di classificazione si basa sul numero delle dimensioni utilizzate per la loro definizione, e si hanno:

- Datum planimetrici, usati maggiormente in ambito cartografico;
- Datum altimetrici, usati per definire e misurare le quote ortometriche di punti;
- Datum tridimensionali, usati per le procedure topografiche relative al posizionamento satellitare, per la cartografia numerica e formazione dei database dei sistemi territoriali.

Datum	Ellissoide	Orientamento	Frame	Rappresentazione cartografica
Roma40	Hayford	Roma Monte Mario	Rete fondamentale del 1° Ordine	Gauss-Boaga UTM
ED50	Hayford	Postdam (Germania)	Rete a catena risultante dall'unione di sottoinsiemi delle reti nazionali	UTM/ED50
ETRS89	WGS84	Globale	ETFR89, per l'Italia la Rete Statica IGM95	UTM/ETRF89
ETRF2000	WGS84	Globale	ETFR2000, per l'Italia la Rete Dinamica Nazionale RDN	UTM/ETRF2000

In Italia, attualmente, si utilizzano come Datum (tabella 1):

Tabella 1 - Datum usati in Italia [11]

Si precisa che ETRF2000 (European Terrestrial Reference Frame) non è un nuovo Datum ma un nuovo Frame del precedente ETRS89 (European Terrestrial Reference System), divenuto obbligatorio a livello nazionale nel febbraio 2012 a seguito del DM 10 novembre 2011.

Ci sono diversi tipi di Sistemi di Coordinate, in base ai quali le coordinate possono esprimere una posizione planimetrica o tridimensionale, passando, quindi, da una coppia ad una terna di coordinate:

• Coordinate geografiche ellissoidiche, espresse con latitudine φ e longitudine λ , per posizioni planimetriche, o aggiungendo, nel campo della geodesia, l'altezza ellissoidica *h*, per posizioni planoaltimetriche; nella pratica ingegneristica per descrivere l'altimetria viene usata la quota ortometrica, riferita al geoide *n* (figura 6);



Figura 6 - Altezza ellissoidica e quota ortometrica

(Fonte: https://www.openoikos.com/wp-content/uploads/2015/03/geoide-ellissoide-terra.jpg)

- Coordinate cartesiane geocentriche, espresse dalla terna geocentrica X,Y,Z, con origine nel centro di massa della Terra, asse Z diretto verso l'asse polare medio e gli assi X e Y sul piano equatoriale;
- Coordinate cartesiane locali, espresse da una terna euleriana e,n,h, con origine in un punto scelto e asse h diretto in direzione normale ad esso e gli assi n, e diretti secondo le tangenti rispettivamente ai meridiani verso Nord ed Est;
- Coordinate geodetiche polari, espresse dalla coppia distanza polare s e azimut α;
- Coordinate geodetiche ortogonali, espresse dalla coppia X,Y lunghezza di un arco di meridiano.

Si capisce che un punto riferito a due Datum diversi presenta coordinate diverse, per cui è necessario sempre il Sistema di Riferimento. Ci sono delle "tecniche" che permettono il passaggio di proiezione delle coordinate dei punti, esso può avvenire tra sistemi diversi ma appartenenti allo stesso Datum, in questo caso si effettua una "conversione"; oppure può avvenire tra sistemi appartenenti a Datum diversi, si effettua, quindi, una "trasformazione".

3.2 Tecnica fotogrammetrica

La fotogrammetria è una tecnica che consente, attraverso l'uso di informazioni contenute in immagini fotografiche riprese da punti diversi, di definire la posizione, la forma e le dimensioni di oggetti posti sul terreno.

Si compone di tre fasi fondamentali:

- *acquisizione*, che riguarda le operazioni di presa delle immagini;
- *orientamento*, che riguarda le operazioni per la determinazione della posizione dei centri di presa e lastre;
- *restituzione*, che riguarda le operazioni che consentono di effettuare le misure sul modello creato.

La nascita della fotogrammetria si deve all'invenzione della fotografia, la quale permise di sostituire il "tradizionale" goniometro, usato fino a quel momento nelle operazioni di campagna di acquisizione, con la macchina fotografica. Il rilievo viene, così, effettuato dalle camere, le quali producono fotogrammi su cui si eseguono misure di precisione. Compito della fotogrammetria è definire le posizioni dei punti di un oggetto situato in un ambiente reale. E' possibile fare ciò utilizzando delle relazioni geometriche che mettono in relazione le posizioni dei punti posti sul fotogramma con le corrispondenti dei punti reali.

La presa delle immagini avviene attraverso i fotogrammi; esse sono realizzate attraverso camera metrica e rappresentano proiezioni centrali.

Il piano fotografico prende il nome di "lastra" e questo contiene punti omologhi rispetto all'oggetto tridimensionale preso in considerazione. Ogni punto dell'oggetto nello spazio reale ($A \, e \, B$ in figura 7) è unito al corrispondente punto omologo sulla lastra ($A' e \, B'$ in figura 7) attraverso un segmento r, definito raggio proiettante. Si può considerare, quindi, la fotografia come una prospettiva centrale (figura 7). Tutti i segmenti che uniscono tutti i punti tra ambiente

reale e immagine si incontrano in un punto, distante pochi centimetri dal piano fotografico, che prende il nome di centro di presa O; la distanza tra il piano della lastra e il punto O si definisce distanza principale p (figura 7) e, trascurando eventuali distorsioni, risulta uguale alla distanza focale.



Figura 7 - Schema geometria della presa fotografica [15]

E' necessario al fine di ottenere posizione e dimensione dell'oggetto tridimensionale avere almeno due fotogrammi, con uno solo il problema diverrebbe geometricamente impossibile, in quanto ad ogni punto su una immagine corrisponderebbero infiniti punti nello spazio reale. I fotogrammi, che riprendono l'oggetto, sono ottenuti dalla stessa camera ma in posizioni e tempi diversi; si hanno, quindi, più punti omologhi (A' sulla prima fotografia e A'' sulla seconda, in figura 8), più punti di presa ($O_1 e O_2$, figura 8) e più lastre, ottenendo, così, più raggi proiettanti ($r_1 e r_2$, in figura 8). L'intersezione tra tali raggi permette di definire geometricamente il problema.



Figura 8 - Ripresa dell'oggetto da due fotogrammi [15]

Al fine di ottenere la restituzione del prodotto finale del rilievo occorre che la stella dei raggi proiettanti di ogni fotogramma sia collocata nello spazio con la stessa posizione che aveva durante la presa. Perciò è necessario effettuare una serie di operazioni definite orientamento. Tale operazione è costituita da due fasi, orientamento interno ed esterno.

Nell'orientamento interno si ricostruiscono, sostanzialmente, i raggi proiettanti nella geometria della proiezione centrale e, quindi, della presa. Bisogna ottenere, a tal proposito, dei parametri che definiscano la posizione del centro di presa *O* rispetto al piano della lastra. Si realizza un sistema interno (figura 9), incidendo, quindi, durante la presa, delle marche fiduciali sui bordi

del fotogramma in modo da ottenere un sistema di assi cartesiano x, y sulla lastra ed un asse z normale ad essa (figura 9).



Figura 9 - Orientamento interno [17]

Si può definire, allora, la posizione del punto O proiettandolo perpendicolarmente in un punto, detto principale, P sul piano della lastra, assumendo che tale proiezione ricada nell'origine del sistema x,y, coincidente con l'intersezione delle congiungenti delle marche fiduciali (figura 9). Tale assunzione, però, non è mai verificata, avendo uno scostamento di qualche centesimo di millimetro, per cui le coordinate della proiezione $P(x_P; y_P)$ insieme alla distanza principale p (figura 9) sono misurate esattamente e fornite dalla casa costruttrice della camera. Vi sono, anche, delle distorsioni, presenti nell'obiettivo della camera, le quali provocano delle piccolissime deformazioni, non trascurabili, sulle posizioni reali dei punti sulle immagini. L'obiettivo, quindi, dell'orientamento interno è quello di correggere le distorsioni appena descritte, conoscendo tali parametri, contenuti nel certificato di calibrazione della camera:

- posizione del punto principale $P(x_P; y_P);$
- distanza principale *p*;
- distorsioni dell'obiettivo.

Operativamente l'orientamento interno consiste nella collimazione delle marche fiduciali dei fotogrammi e nel considerare i tre parametri, nei software, durante le operazioni preliminari alla restituzione del rilievo.

Occorre, una volta ricomposti i fasci proiettivi con l'orientamento interno, collocare nella stessa posizione spaziale che avevano nella camera durante la fase di presa, attraverso l'orientamento esterno. Tale operazione si concretizza nella determinazione dei parametri di movimento che definiscono la posizione del corpo rigido nello spazio e, quindi, tre parametri di traslazione e tre di rotazione (figura 10):

- posizione del centro di proiezione $O(X_0; Y_0; Z_0);$
- angoli di assetto della camera ω, φ, κ, rispettivamente rollio (rotazione intono all'asse x), beccheggio (rotazione intono all'asse y) e sbandamento (rotazione intono all'asse z).



Figura 10 - Orientamento esterno[17]

E' importante, però, conoscere la misura della posizione dei punti omologhi sulle due fotografie, delle lastre e dell'oggetto ripreso. Tali informazioni si ricavano attraverso l'uso di punti d'appoggio, posizionati opportunamente sul terreno GCP (Ground Control Point), dei quali si conoscono con precisione le coordinate grazie alle tradizionali operazioni topografiche.

L'immagine nella lastra viene roto traslata per far coincidere i sistemi di riferimento, ottenendo, così, le coordinate di un punto fotografato dalle coordinate della sua immagine nella lastra. Per ottenere la rotazione si fa ruotare il piano del fotogramma secondo gli angoli ω , φ , κ , ricavando una matrice di rotazione; per la traslazione si sposta il centro di presa e l'origine del sistema di riferimento.

Operativamente, quindi, l'orientamento esterno si può eseguire con diverse modalità:

- orientamento contemporaneo di due fotogrammi con un'unica operazione;
- orientamento contemporaneo di due fotogrammi in due fasi dette orientamento relativo e assoluto;
- orientamento indipendente dei due fotogrammi.

La prima modalità consiste nella risoluzione di un sistema di equazioni dette di collinearità (equazione 1), che si ottengono dalla geometria analitica, le quali mettono in relazione le coordinate assolute incognite di un punto del terreno con quelle del punto immagine.

$$\begin{cases} x = x_0 - (z - z_0) \frac{r_{11}(\zeta - \zeta_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13} \cdot p}{r_{31}(\zeta - \zeta_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33} \cdot p} \\ y = y_0 - (z - z_0) \frac{r_{21}(\zeta - \zeta_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23} \cdot p}{r_{31}(\zeta - \zeta_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33} \cdot p} \end{cases}$$

Equazione 1 - Equazioni di collinearità

Dove (equazione 1):

- da orientamento esterno:
 - > x_0, y_0, z_0 sono le coordinate del centro di proiezione;
 - > r_{ij} sono i termini della matrice di rotazione;
- da orientamento interno:
 - *p* distanza principale;
 - > $\zeta_0 e \eta_0$ sono le coordinate del punto principale;
- *x*, *y*, *z* solo le coordinate terrestri del punto;
- $\zeta \in \eta$ sono le coordinate pixel del punto immagine;

Avvicinando idealmente i punti di presa lungo i raggi proiettanti dei diversi fotogrammi, si arriva alla ricostruzione del modello in scala ridotta. Tale parametro si ricava tramite il rapporto b/B, dove $b = \overline{O_1 O_2'}$ e $B = \overline{O_1 O_2}$, rispettivamente base ridotta e base di presa (figura 11).



Figura 11 - Schema di ricostruzione [15]

I risultati finali che si possono ottenere sono:

- Rappresentazioni grafiche, quali carte topografiche;
- Rappresentazioni numeriche, quali coordinate dei punti degli oggetti osservati;
- Ulteriori immagini, quali fotografie elaborate, modelli 3D, ortofoto, nuvole di punti, mesh.

Essendo una vista prospettica centrale dell'oggetto, la scala del fotogramma varia da punto a punto ma è possibile definire una scala media definita come 1/N pari al rapporto l/L, dove l è la dimensione massima del fotogramma e L quella dell'oggetto reale ripreso. Il valore di tale rapporto non è noto ma è ottenibile tramite un rapporto equivalente p/D, dove p rappresenta la distanza focale dell'obiettivo e D quella media dell'oggetto dal centro di presa O (figura 12).



Figura 12 - Parametri scala [15]

$$\frac{l}{L} = \frac{p}{D} \implies \frac{1}{N} = \frac{p}{D}$$

Gli elementi dell'oggetto ripreso devono essere visibili in modo ottimale sul fotogramma. Quindi, è necessario partire dalla scala di riproduzione dell'oggetto $1/N_{dis}$, che cambia in funzione del tipo di rilievo (cartografico, architettonico), per ottenere la scala dei fotogrammi 1/N da cui ricavare il valore della distanza di presa *D* tramite $D = N \cdot p$.

La fotogrammetria può essere classificata, in base al tipo di presa, in terrestre ed aerea, al tipo di elaborazione, in analogica e analitica, al tipo di fotografia, in classica e digitale.

In base al tipo di presa cambia il formato dei fotogrammi, si passa da 230 x 230 mm (standard) per le prese aere a più formati per le prese terrestri (130 x 180 mm, 115 x 160 mm, 100 x 130 mm).

3.3 Tecnica aereo fotogrammetrica

Nel lavoro svolto si è fatto riferimento alla fotogrammetria di tipo aerea. Essa è l'unico strumento, oramai, usato per ottenere la cartografia di medie e grandi estensioni di territorio. Il funzionamento ha alla base i principi esposti nel paragrafo precedente, ma, in questo caso, è necessario usare camere più sofisticate, quindi, dotate di numerosi automatismi. Tali camere vengono posizionate sulla parte inferiore di un aereo o di un drone al fine di tenere l'asse della camera il più verticale possibile, così da assicurare la presa definita "nadirale". La ripresa fotogrammetrica avviene ad intervalli di tempo regolari e ravvicinati, facendo percorrere all'aereo traiettorie rettilinee, a velocità costante ed a una certa altezza *H* dal terreno, in modo da assicurare l'osservazione di uno stesso punto da più fotogrammi. Secondo quanto detto e considerando due fotogrammi successivi, si ottengono il centro di presa della camera O₁ dal primo fotogramma ripreso all'istante di tempo t₁ ed il centro di presa O₂ all'istante t₂ dal secondo (figura 13).



Figura 13 - Schema ripresa aerea [16]

In fase di restituzione sono misurare le coordinate x'_A , y'_A e x''_A , y''_A rispettivamente della prima e della seconda lastra (figura 13).

L'operazione di sorvolo dell'aereo si ripete formando, così, una sequenza di percorsi rettilinei, ognuno dei quali definisce una "strisciata" di riprese, lungo direzioni parallele, l'insieme dei quali, distanziate da una distanza *i* (interasse), definisce il "blocco", ricoprendo tutta l'area oggetto di ripresa (figura 14).



Figura 14 - Copertura del territorio [16]

Avendo, quindi, un ricoprimento longitudinale μ , che in generale ha un valore del 60% e risulta maggiore in presenza di terreno irregolare, è necessario stabilire un valore d'interasse che garantisca un ricoprimento laterale ε che abbia un valore del 10-20% dell'"abbracciamento" *L*; tale parametro è la dimensione riquadro di terreno ripreso dal fotogramma (figura 15).



Figura 15 - Parametri di due strisciate adiacenti [16]

Si ottiene, così, una ripresa del terreno scomposta in modelli stereoscopici ma bisogna verificare che ogni punto del terreno compaia in almeno due fotogrammi, producendo un concatenamento tra i modelli adiacenti, cioè due strisce di sovrapposizione del 10% (figura 16).



Figura 16 - Concatenamento tra modelli stereoscopici [16]

E' buona norma programmare i voli durante le ore centrali della giornata, in modo da garantire la massima illuminazione e minimizzare le ombre, e durante condizioni meteorologiche perfette, per evitare presenza di nubi e foschia.

In condizioni di terreno pianeggiante e regolare la scala del fotogramma 1/N è pari al rapporto p/H, dove *p* rappresenta la distanza focale dell'obiettivo e *H* l'altezza media dal centro di presa *O* (figura 17).



Figura 17 – Parametri di scala del fotogramma [16]

Per ottenere il valore di scala desiderato è necessario far variare l'altezza di volo H tramite l'espressione

$$H = p \cdot N$$
Equazione 2

Come detto nel paragrafo precedente, la scala del fotogramma è funzione della scala di rappresentazione del rilievo $1/N_{dis}$; a tal proposito esiste una relazione empirica tra le due scale:

$$N = k \cdot \sqrt{N_{dis}}$$
Equazione 3

con valori di *k* pari a:

- $200 \div 300 \text{ per } 1/N_{dis}$ inferiori a 1:5000 (scale medio-piccole);
- $150 \div 200 \text{ per } 1/N_{dis} \text{ superiori a } 1:2000 \text{ (scale grandi).}$

Un procedimento alternativo è l'utilizzo della tabella realizzata dalla Commissione Geodetica Italiana (figura 18):

Scala	Scala de	ei fotogr.	Alte	ezza volo	H (per a	lcuni val	ori di <i>p</i>)	(m)
della carta	min.	max.	p = 30	00 mm	p = 15	52 mm	p = 8	8 mm
1:500	1:3000	1:2000	900	600				
1:1000	1:5000	1:3500	1500	1050	760	530		
1:2000	1:8000	1:6500	2400	1950	1220	1000		
1:5000	1:18 000	1:12000	5400	3600	1730	1830		
1:10 000	1:27 000	1:20 000	8100	600	4100	3100	2210	1770
1:25 000	1:50 000	1:40 000			7600	6080	4520	3530
1:50 000	1:70 000	1:60 000			10620	9130	6180	5310
1:100 000	1:90 000	1:80 000					7960	7070

Figura 18 - Tabella della Commissione Geodetica Italiana [16]

L'operazione preliminare per poter effettuare un volo aereo fotogrammetrico è la definizione dei parametri utili, sintetizzati in tabella 2; tali parametri permettono la programmazione di massima del volo, non è possibile, però, automatizzare completamente il processo a causa di problematiche che potrebbero riscontrarsi durante l'operazione, quali particolarità del terreno, presenza di vento, variazione della velocità *v* del velivolo.

Parametro	Formule
Denominatore della scala dei	$N = k \cdot \sqrt{N_{co}}$
fotogrammi	$N = \kappa^2 \sqrt{N_{dis}}$
Altezza del volo	$H = p \cdot N$
Quota del volo	$Q_V = Q_M + H$
Abbracciamento	$L = \frac{l \cdot H}{p}$
Base di presa	$B = \frac{l \cdot H}{p} \cdot (1 - \mu)$
Intervallo di scatto	$\Delta t = \frac{l \cdot H}{v \cdot p} \cdot (1 - \mu)$
Interasse delle strisciate	$i = \frac{l \cdot H}{p} \cdot (1 - \varepsilon)$
Numero di strisciate	$n_{s} = int \left[\frac{d_{2}}{L \cdot (1 - \varepsilon)} \right] + 1$
Numero di fotogrammi per strisciata	$n_f = int\left[\frac{d_1}{L \cdot (1-\mu)} + 1\right] + 1$
Numero di fotogrammi totale	$n_{tot} = n_s \cdot n_f$
Taballa 2 Bayanat	i di wala [16]

Tabella 2 - Parametri di volo [16]

Il parametro Q_V (tabella 2) rappresenta, in realtà, la quota ortometrica assoluta, valore rilevato dal velivolo, e si ottiene, come esplicitato nella suddetta tabella, dalla somma dell'altezza di volo H e la quota media assoluta Q_M , media aritmetica di alcuni punti a quota nota.

Il parametro Δt (tabella 2) rappresenta l'intervallo di tempo tra due scatti successivi; è necessario programmare tale parametro per effettuare prese aeree, in quanto avvengono con processi automatizzati.

I parametri n_s , n_f , n_{tot} (tabella 2) si utilizzano per avere una stima economica del rilievo, che dipende dal numero di fotogrammi da realizzare per avere copertura totale del sito (figura 19).



Figura 19 - Copertura sito da rilevare [16]

3.4 Structure from motion

La structure from motion (Sfm) è una tecnica attraverso la quale è possibile stimare modelli 3D o topografici, partendo da sequenze di immagini 2D sovrapposte, riprese da molti punti di osservazione e orientate. E' una tecnica basata su algoritmi di computer vision ed è molto utilizzata per la sua semplicità d'uso e la sua economicità. Per usufruire di tale tecnica è possibile utilizzare una qualsiasi fotocamera, di cui si devono conoscere solo alcuni parametri. Il rilievo avviene direttamente sull'oggetto o nell'ambiente, ottenendo una misura utile al dimensionamento di una nuvola di punti che ne descriva l'oggetto ripreso. A differenza della fotogrammetria classica, nella fase di presa è necessario riprendere uno stesso punto dell'oggetto da almeno 3 punti differenti; infatti, il numero minimo di foto che si riescono a collimare in modo automatico è 3. La structure from motion può essere considerata, quindi, una sorta di estensione del modello stereoscopico, ma non necessita conoscere inizialmente la posizione reciproca dei punti di vista, né di particolari vincoli di ripresa. La mancanza di tali vincoli particolari fa sì che le riprese reciproche delle fotografie possano essere effettuate tramite l'utilizzo di droni radiocomandati.

Acquisite le immagini, è necessario utilizzare software specializzati per effettuare le elaborazioni che potrebbero richiedere alcuni giorni per elevato numero di fotogrammi.

La procedura con cui si realizza il modello tridimensionale è composta da diverse fasi:

- La prima fase è detta "Image Alignment", in cui si determina l'orientamento delle immagini nello spazio e sono estratti dei "punti chiave"; il risultato è una prima nuvola di punti, definita "tie point", essa è una specie di modello spaziale che rappresenta gli oggetti ripresi. Si ottiene tale risultato grazie alla determinazione di punti notevoli dalle singole foto, alla definizione dei parametri fotografici e all'incrocio di punti individuabili sulle varie foto, ricavando, in questo modo, le coordinate nello spazio di tali punti.
- La seconda fase consiste nell' "infittimento" della nuvola ricavata nella fase precedente, ottenendo, così, una nuvola densa. Ad ogni punto di tale nuvola vengono, successivamente, assegnati dei segmenti di connessione che formano le facce triangolari, formando, così, una rete di triangoli definita mesh. E' possibile estrarre, a questo punto, una superficie tridimensionale triangolare, detta TIN (Triangulated Irregular Network).
- Nelle fasi successive, è possibile estrarre dalle fotografie di partenza una texture, che permette di colorare la superficie creata, ottenendo, così, un modello tridimensionale fotorealistico. Da tale modello è possibile estrarre ortofoto, fotografia aerea corretta e georeferenziata con scala uniforme, e DEM (Digital Elevation Model), rappresentazione della distribuzione delle quote di una superficie.

3.5 Strumentazioni

A seconda del rilievo da effettuare sono utilizzate diverse apparecchiature. Nel dettaglio, in questo capitolo, si fa riferimento agli strumenti utilizzati per effettuare il rilievo topografico con stazione totale, il rilievo aereo fotogrammetrico con drone e il rilievo con laser scanner terrestre.

3.5.1 Stazione totale

La stazione totale è l'evoluzione tecnologica del teodolite ottico-meccanico, è uno strumento topografico composto da un distanziometro elettronico, da due goniometri elettronici ed un computer di bordo permettendo, così, di ricavare angoli azimutali (orizzontali), angoli zenitali (verticali), distanze oblique e dislivelli.

Le misure vengono effettuate posizionando la stazione totale, su un punto chiamato stazione o vertice, materializzato a terra, verificando la verticalità tramite la livella torica; il topografo guarda dentro il cannocchiale dello strumento, "collimando" così i punti da misurare ricavandone la posizione. Nei teodoliti elettrici-ottici, un sistema di cerchi graduati permette automaticamente di leggere le misure degli angoli. Questa fase può avvenire con o senza un "prisma riflettente" (figura 20), oggetto a specchio che riflette il raggio laser del distanziometro integrato in presenza del quale si ottengono misure più accurate.



Figura 20 - Prisma riflettente

$(Fonte: \underline{http://www.pfcad.it/prodotti/hardware/accessori/accessori-topografia/prismanifiettente})$

Il principio di funzionamento, per misurare le distanze, si basa sul tempo necessario al raggio emesso dal distanziometro di colpire il bersaglio e tornare indietro, calcolando così la distanza. Il raggio emesso può essere infrarosso o laser. A questo punto un computer con interfaccia utente memorizza i dati raccolti in fase di campagna.

In questo caso è stata usata come stazione totale "Image Station Leica Geosystem" (figura 21).



Figura 21 - Total Station (Image Station Leica Geosystem)

3.5.2 Droni

Negli ultimi anni, ha preso piede l'utilizzo di Aeromobili a Pilotaggio Remoto (ARP), comunemente chiamati droni (figura 22).



Figura 22 - Aeromobili a pilotaggio remoto

(Fonte: http://www.archicz.it/web/wp1/wp-content/uploads/2015/04/dron.jpg)

Definizioni da Regolamento ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile), Ed. 1, 16/12/2013, delibera C.d.A nº 42/2013:

"Aeromobile a Pilotaggio Remoto (APR): mezzo aereo a pilotaggio remoto senza persone a bordo, non utilizzato per fini ricreativi e sportivi.

Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR): sistema costituito da un mezzo aereo (aeromobile a pilotaggio remoto) senza persone a bordo, non utilizzato per fini ricreativi e sportivi, e dai relativi componenti necessari per il controllo e comando da parte di un pilota remoto.

Sistema autonomo SAPR per il quale il pilota non ha possibilità di controllare il volo del mezzo intervenendo in tempo reale.

Pilota remoto: persona incaricata dall'operatore, responsabile della condotta del volo, che agisce sui comandi di volo, come appropriato, di un SAPR."

Operazioni Specializzate: per lo scopo di questo Regolamento si intendono le attività che prevedono l'effettuazione, con un SAPR, di un servizio a titolo oneroso o meno, quale ad esempio sorveglianza del territorio o di impianti, monitoraggio ambientale, impieghi agricoli, fotogrammetria, pubblicità, ecc..

Osservatore SAPR: persona designata dall'operatore che, anche attraverso l'osservazione visiva dell'aeromobile a pilotaggio remoto, può assistere il pilota remoto nella condotta del volo. Pilota remoto: persona incaricata dall'operatore, responsabile della condotta del volo, che agisce sui comandi di volo, come appropriato, di un SAPR." [29]

I droni sono, quindi, dei dispositivi volanti, di dimensioni molto variabili, radiocomandati da un pilota che resta a terra.

Esistono sul mercato diversi tipi, raggruppabili in tre famiglie:

- struttura ad eliche (multirotori), hanno un comportamento simile ad un elicottero grazie alla presenza di eliche montate, generalmente, su bracci estraibili;
- struttura planare, assimilabili ad aeroplani e quindi dotati di ali;

• ibridi, sono droni capaci sia di volare che muoversi sul terreno grazie alla presenza di ruote motrici.

Il loro utilizzo è regolamentato da specifiche norme, in quanto potrebbero infierire con strumenti di posizionamento, è possibile, comunque, avere una grande varietà di applicazioni:

- sicurezza e tracciamento, impiegati maggiormente dalle forze dell'ordine;
- monitoraggio ambientale e architettonico;
- telerilevamento;
- riprese video.

Nella maggior parte dei casi, per effettuare rilievi fotogrammetrici, si utilizza un drone SAPR, vista la possibilità di pilotare da remoto o impostare una rotta prestabilita azionando l'autopilota; grazie alla presenza a bordo di un sistema di posizionamento GNSS, infatti, è possibile ottenere la geolocalizzazione e la navigazione in ogni istante. Ciò risulta essere molto utile quando i rilievi da realizzare si trovano in luoghi poco accessibili. La maggior parte dei SAPR usati in questo ambito sono i multirotori (figura 23), simili agli elicotteri, essi sono sollevati e spinti da più rotori.



Figura 23 - Drone multirotore

(Fonte: <u>https://img.productz.com/383666/service-drone-multirotor-g4-surveying-robot-5-</u> small.jpg)

Un drone di questo tipo necessita di un giroscopio a tre assi e di un microcontrollore per gestire l'assetto. E' composto da un telaio, che rappresenta la struttura principale nella quale sono fissati i motori, posizionati in modo equidistante, la parte di elettronica, e un carrello di atterraggio, posto nella parte sottostante. La parte più importante del drone è la centralina di comando alla quale sono collegati giroscopi, motori, antenne e sensori, essa prende il nome di FCB (Flight Control Board); attraverso quest'ultima è possibile comandare il drone, grazie ai comandi ricevuti dal radiocomando. Alla FBC sono connessi giroscopio elettronico, accelerometro, barometro e GPS. Il giroscopio è il sensore attraverso il quale si mantiene l'assetto nei tre assi; l'accelerometro permette il riposizionamento automatico in parallelo al suolo; il barometro percepisce le variazioni di pressione modificando la quota; il magnetometro è una bussola elettronica usata in combinazione con il GPS, grazie al quale è possibile stabilizzare la posizione in condizioni di volo stazionario. La fotocamera è installata su una struttura che ne permette il movimento in modo autonomo da quello del drone, essa prende il

nome di Gimbal brushless (figura 24); è dotata di un giroscopio e di una centralina autonoma. Le immagini sono trasmesse dal drone a terra tramite un trasmettitore video e l'operatore, a terra, può osservarle in FPV (First Person View), avendo, così, un controllo real-time dell'inquadratura.



Figura 24 - Sistema Gimbal

(Fonte:<u>https://www.hobbyhobby.it/img/cms/Blog/Cause%20di%20guasto%20al%20gimbal.png</u>)

All'interno della camera digitale è presente un sensore che ne rappresenta la parte più importante. Si utilizzano, principalmente, due tipi di sensori: CCD (Charge-Couple Device) o CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). Il primo restituisce un segnale di uscita di tipo analogico, il secondo di tipo digitale.

Come detto, è possibile effettuare voli in modalità automatica, impostando la traiettoria apriori, oppure in modo manuale, in presenza di singolarità del sito da rilevare. La traiettoria dipende dalla precisione da ottenere nelle immagini o in modo manuale e a tal proposito è necessario definire alcuni parametri:

- Parametri della camera;
- Ricoprimento tra le fotografie;
- Dimensione dell'area in esame.

Si deve tenere in considerazione, anche, la distanza di campionamento al suolo GSD (Ground Sample Distance) che rappresenta la distanza tra due centri di pixel consecutivi misurata sul terreno; minore è tale valore, maggiore è la risoluzione spaziale dell'immagine con dettagli maggiormente visibili.

Conoscendo la precisione ed il valore GSD che si vogliono ottenere, si ricavano:

- Altezza di volo;
- Traiettorie delle strisciate;
- Tempi di volo.

$$GSD = \frac{S_W \cdot H}{F_R \cdot imW}$$

Equazione 4

Dove:

- S_w rappresenta la dimensione del sensore CMOS
- H rappresenta l'altezza media di volo
- F_R rappresenta la distanza focale
- imW rappresenta la dimensione dell'immagine in termini di numero di pixel

In particolare per questo studio è stato utilizzato il drone "DJI Phantom 4 PRO" (figura 25).



Figura 25 - Drone DJI Phantom 4 PRO

Si riporta la scheda tecnica (tabelle 3, 4, 5, 6, 7,):

	VELIVOLO
Peso (con batteria ed eliche)	1388 g
Diagonale (eliche escluse)	350 mm
Massima velocità ascensionale	Modalità S: 6 m/s ; Modalità P: 5 m/s
Massima velocità di discesa	Modalità S: 4 m/s ; Modalità P: 3 m/s
Velocità massima	Modalità S: 72 km/h ; Modalità A: 58 km/h ; Modalità P: 50 km/h
Angolo massimo di inclinazione	Modalità S: 42° ; Modalità A: 35° ; Modalità P: 25°
Massima velocità angolare	Modalità S: 250°/s ; Modalità A: 150°/s
Quota massima di tangenza operativa sul livello del mare	6000 m
Massima resistenza alla velocità del vento	10 m/s
Autonomia di volo	Circa 30 minuti
Temperatura operativa	$0^{\circ} - 40^{\circ} \text{ C}$
Sistemi di posizionamento satellitare	GPS/GLONASS
Accuratezza di stazionamento in volo	Verticale:Orizzontale:±0,1 m (con posizionamento visivo)±0,3 m (con posizionamento visivo)±0,5 m (con posizionamento GPS)±1,5 m (con posizionamento GPS)
Potenza del trasmettitore (EIRP)	2.400 - 2.483 GHz FCC: 26 dBm ; CE: 17 dBm ; SRRC: 20 dBm ; MIC: 17 dBm ; 5.725 - 5.825 GHz FCC: 28 dBm ; CE: 14 dBm ; SRRC: 20 dBm ; MIC: -

Frequenza operativa	2.400 - 2.483 GHz ; 5.725 - 5.825 GHz	
Tabella 3 - Scheda tecnica (Velivolo)		
SISTEMA DI VISIONE		
Sistema di visione	In avanti Varea il basso	

	Verso il basso
Intervallo di velocità	≤50 km/h a 2 m dal suolo
Intervallo di quota	0 - 33 piedi (0 - 10 m)
Intervallo operativo	0 - 33 piedi (0 - 10 m)
Distanza di rilevamento anti-collisione	2 - 98 piedi (0,7 - 30 m)
Campo visivo (FOV)	Frontale: 60°(orizzontale), ±27°(verticale) Posteriore: 60°(orizzontale), ±27°(verticale) Verso il basso: 70°(frontale e posteriore), 50°(laterale)
Frequenza di misurazione	Frontale: 10 Hz ; Posteriore: 10 Hz ; Verso il basso: 20 Hz
Ambiente operativo	Superfici definite e adeguatamente illuminate (>15 lux)
Frequenza operativa	2.400 - 2.483 GHz ; 5.725 - 5.825 GHz

Tabella 4 - Scheda tecnica (Sistema di visione)

	FOTOCAMERA
Sensore	CMOS 1"; Pixel effettivi: 20 M
Obiettivo	Campo visivo (FOV) 84° 8,8 mm/24 mm (formato 35 mm equivalente) f/2.8 - f/11 messa a fuoco automatica 1 m - ∞
Intervallo ISO	Video: Foto: 100 - 3200 (automatico) 100 - 3200 (automatico) 100 - 6400 (manuale) 100 - 12800 (manuale)
Velocità dell'otturatore meccanico	8 - 1/2000 s
Velocità dell'otturatore elettronico	8 - 1/8000 s
Dimensione dell'immagine	3:2 rapporto d'aspetto: 5472 × 3648 4:3 rapporto d'aspetto: 4864 × 3648 16:9 rapporto d'aspetto: 5472 × 3078
Dimensioni immagine PIV	4096×2160(4096×2160 24/25/30/48/50p) 3840×2160(3840×2160 24/25/30/48/50/60p) 2720×1530(2720×1530 24/25/30/48/50/60p) 1920×1080(1920×1080 24/25/30/48/50/60/120p) 1280×720(1280×720 24/25/30/48/50/60/120p)
Modalità fotografiche	Scatto singolo Scatto a raffica: 3/5/7/10/14 fotogrammi Bracketing automatico dell'esposizione (AEB): 3/5 fotogrammi con esposizione variata a 0.7 EV bias Intervallo: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s
Modalità video	H.265 C4K:4096×2160 24/25/30p a 100Mbps 4K:3840×2160 24/25/30p a 100Mbps

	$2.7V.2720\times1520.24/25/20n = 65Mhms$				
	$2.7 \text{ K}:2720 \times 1530 24/25/50 \text{ p a } 05\text{Mbps}$ $2.7 \text{ K}:2720 \times 1530 48/50/60 \text{ p a } 80\text{ Mbps}$				
	$2.7 \text{ K}.2720^{-1}330$ 46/30/000 a outlops FHD:1920×1080 24/25/30n a 50Mbns				
	$FHD.1920^{1000} 24/25/50p a 5000ps$				
	$FHD.1920^{1080} 46/30/00p a 05W0ps$ $FHD.1920\times1080 120p a 100Mbps$				
	HD: 120×1000 120p a 100000ps HD: 1280×720 24/25/30p a 25Mbps				
	$HD(1280\times720.48/50/60n = 3.5Mbps)$				
	HD: 1280×720 120n a 60Mhns				
	Н 264				
	$C4K \cdot 4096 \times 2160 \ 24/25/30/48/50/60n \ a \ 100 Mbns$				
	$4K \cdot 3840 \times 2160 \ 24/25/30/48/50/60n \ a \ 100Mbns$				
	$2.7 \text{K} \cdot 2720 \times 1530 24/25/30$ a 80Mhns				
	$2.7 \text{K} \cdot 2720 \times 1530 48/50/60 \text{ a } 100 \text{Mbns}$				
	$FHD:1920\times1080\ 24/25/30n\ a\ 60Mbns$				
	FHD:1920×1080 48/50/60 a 80Mbps				
	FHD:1920×1080 120n a 100Mbns				
	HD: $1280 \times 720 \ 24/25/30n \ a \ 30Mhns$				
	$HD \cdot 1280 \times 720$ 48/50/60n a 45Mhps				
	HD: 1280×720 120p a 80Mbps				
Bit-rate massimo del video	100 Mbps				
File system supportati	FAT32 (\leq 32 GB); exFAT (> 32 GB)				
Foto	JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG				
Video	MP4/MOV (AVC/H.264: HEVC/H.265)				
Schede SD supportate	microSD™ ; Capacità massima: 128GB				
Schede SD supportate	Velocità di scrittura ≥15MB/s, Classe 10 o livello UHS-1				
Temperatura operativa	$0^{\circ} - 40^{\circ} \mathrm{C}$				

Tabella 5 - Scheda tecnica (Fotocamera)

SOSPENSIONE CARDANICA (GIMBAL)				
Stabilizzazione	3 assi (inclinazione, rollio, panorama)			
Intervallo controllabile	Inclinazione: da -90° a +30°			
Massima velocità angolare controllabile	Inclinazione: 90°/s			
Intervallo di vibrazione angolare	±0.02°			

SISTEMA A INFRAROSSI				
Distanza di rilevamento anti-collisione	0,2 - 7 m			
Campo visivo (FOV)	70° (orizzontale), $\pm 10^{\circ}$ (verticale)			
Frequenza di misurazione	10 Hz			
Ambiente operativo	Materiali con riflessione diffusa, e superfici con riflettività diffusa > 8% (muri, alberi, persone ecc.)			

Tabella 7 - Scheda tecnica (Sistema a infrarossi)

(Fonte: https://www.dji.com/it/phantom-4-pro/info#specs)

3.5.2 Laser scanner terrestri

Il laser scanner è uno strumento che rileva, ad altissima velocità, la posizione di centinaia di migliaia di punti, andando a definire, così, la superficie degli oggetti circostanti. Si ottiene da questa operazione un insieme di punti molto denso che prende il nome di "nuvola di punti". E', quindi, un sistema di misura diretta. Per quanto riguarda il suo funzionamento, esso si basa sulla emissione ripetuta di impulsi; stima, quindi, la distanza tra lo strumento e l'oggetto, in relazione al tempo di volo, in inglese denominato TOF, "Time Of Flight", dell'impulso.

Per questo studio è stato utilizzato il laser scanner "Riegl VZ-400i" (figura 26).



Figura 26 - Laser scanner terrestre: Riegl VZ-400i

Esso è un laser scanner terrestre che permette l'acquisizione di 500000 punti/sec. Possiede un'elevata precisione e una grande portata, arrivando fino a 800 metri, per questo motivo è considerato estremamente versatile e adatto a molti campi di applicazione. E' composto da un sistema GPS integrato, un sensore inclinometrico interno e una bussola, integrati fra loro permettendo la georeferenziazione e l'allineamento automatico delle scansioni; inoltre è presente una fotocamera esterna Nikon D810 con obiettivo Nikkor 20 mm resa solidale allo strumento stesso, avendo, così, la possibilità di acquisire, anche, immagini.

Si riportano le specifiche del laser scanner (figura 27):

Laser Pulse Repetition Rate PRR (peak)	100 kHz	300 kHz	600 kHz	1,200 kHz	
Max.Effective Measurement Rate (meas./sec)	42,000	125,000	250,000	500,000	
Max. Measurement Range ($\rho \ge 90$ %)	800 m	480 m	350 m	250 m	
Max. Measurement Range ($\rho \ge 20$ %)	400 m	230 m	160 m	120 m	
Minimum Range	1.5 m				
Accuracy / Precision	5 mm / 3 mm				
Field of View (FOV)	100° vertical / 360° horizontal				
Eye Safety Class	Laser Class 1 (eyesafe)				
Main Dimensions (width x height) / Weight	206 mm x 308 mm / 9.7 kg				

Figura 27 - Specifiche laser scanner Riegl VZ-400i

(Fonte: https://www.microgeo.it/public/userfiles/RIEGL_VZ-400i_at_a_glance_2015-09-

<u>11_01.pdf</u>)
Capitolo 4

Acquisizioni

L'autore della tesi, per poter effettuare l'elaborazione, si è servito dei dati acquisiti, durante le due campagne del 12/6/2018 e del 12/3/2019, nelle fasi di rilievo topografico, aereo fotogrammetrico e con laser scanner, non avendone preso parte.

4.1 Acquisizione topografica

Durante le campagne di acquisizione topografica del 12/6/2018 e del 12/3/2019, sono state svolte delle operazioni preliminari per verificare la rete topografica realizzata durante rilievi precedenti effettuati nel 2017, al fine di adottare un sistema di coordinate di riferimento comune per la georeferenziazione. Durante i rilievi precedenti era stato usato un sistema misto per la misurazione della rete, adottando GNSS, Total station e la materializzazione mediante tasselli infissi nella roccia con piattello in alluminio e rondella colorata. E' stata effettuata, quindi, la ricognizione, durante la quale sono stati ritrovati e verificati i vertici chiamati "1000" e "2000" (figura 28). Questi ultimi hanno coordinate compensate nel sistema UTM-ETRF200. Per quanto

riguarda la parte altimetrica sono state considerate l'altezza ellissoidica H, riferita all'ellissoide, e la quota ortometrica h, legata al geoide (tabella 8).



Figura 28 - Posizionamento vertici

Nome vertice	Immagine	Coordinate UTM-ETRF 2000
1000	Figura 29 - Tassello con piattello in alluminio e rondella grigia	E=339902.507 m N=5000613.529 H=1038.582 m h=1092.5426 m
2000	Figura 30 - Chiodo con rondella grigia	E=340162.140 m N=5000467.603 m H=1034.641 m h=1088.5731 m

Tabella 8 - Vertici

Si è passato, quindi, al rilievo dettagliato dei punti 38 GCP, disposti in modo opportuno per avere una copertura ottimale dell'intera area ed essere visibili dal drone durante i voli e dalle scansioni laser terrestri, partendo dai vertici ritrovati in precedenza. Tale operazione, importante per le fasi successive, è stata effettuata misurando angoli azimutali e zenitali e distanze con l'ausilio della stazione totale, realizzando uno schema di intersezione

distanziometrica. Si ricavano, così, le coordinate dei GCP, effettuando un'elaborazione dati con il software Starnet. I marker o target artificiali (figura 31), ovvero i punti GCP, che si posizionano a terra, devono avere due caratteristiche fondamentali: alta visibilità e facile individuazione del loro centro.



Figura 31 - Tipi di marker

4.2 Acquisizione aereo fotogrammetrica

In seguito alla fase di acquisizione topografica nelle campagne sopracitate, inizia la fase di acquisizione immagine e video. La prima fase ha previsto l'utilizzo del drone "DJI-Phantom 4 PRO" (figura 25).

Nel rilievo aereo fotogrammetrico del 12/6/2018 è stato effettuato un volo ricavando 802 fotogrammi (tabella 9):

Volo	Altezza dal bordo [m]	Strisciate	Direzione
1	75	Parallele	Nadirale

Tabella 9 - Acquisizione 12/6/2018

In data 12/3/2019, sono stati acquisiti 799 fotogrammi tramite 4 voli (tabella 10):

Volo	Altezza dal bordo [m]	Strisciate	Direzione
1	20	Parallele	Nadirale
2	50	Parallele e incrociate	Nadirale
3	90	Parallele	Nadirale e inclinata di 45°
4	150	Parallele	Nadirale e inclinata di 45°

Tabella 10 - Acquisizione 12/3/2019

I voli sono stati realizzati in modo tale da coprire l'intera area, per una durata complessiva, per rilievo, di circa 60 minuti.

Per quanto riguarda il piano di volo, si è scelto una soluzione manuale e, quindi, non automatica, cioè con pianificazione precedente, in modo tale da migliorare l'esposizione gradualmente e migliorare i parametri durante il volo stesso. Si è preferita tale scelta in quanto si sono riscontrate zone con colorazione diversa dovute alla presenza di acqua, sedimenti o elementi naturali. Ottenendo un ricoprimento longitudinale di circa il 70% e uno trasversale di circa il 30%.

4.3 Rilievo con laser scanner terrestre

La campagna di acquisizione effettuata con laser scanner si è svolta solo per uno dei due rilievi, quello in data 12/3/2019. La fase successiva al rilievo fotogrammetrico ha previsto l'uso del laser scanner terrestre ad alte prestazioni "Riegl VZ-400i" (figura 26), grazie al quale sono state svolte 13 scansioni, di cui solo 12 utilizzabili, dal bordo dell'invaso e una all'interno (figura 32, in rosso), quindi, da punti di stazione diversi per avere una copertura ottimale del sito. Si sono usati gli stessi punti GCP utilizzati nella fase precedente al fine di georeferenziarle nello stesso sistema di riferimento, aggiungendone alcuni catarifrangenti (figura 33), per facilitarne l'individuazione nelle scansioni.



Figura 32 - Posizionamento laser scanner



Figura 33 - Marker catarifrangente

(Fonte: http://recambiosterramar.com/wp-content/uploads/2015/06/z_001-1220072.png)

Capitolo 5

Elaborazione dati

Nelle fasi precedenti si sono acquisiti i dati da rilievo topografico, rilievo aereo fotogrammetrico e rilievo con laser scanner terrestre. E' necessario, a questo punto, elaborare i dati ricavati mediante software specifici, al fine di ottenere modelli da cui poter effettuare la stima del volume di residuo e l'analisi multi-temporale.

5.1 Elaborazione dati topografici

Per compensare la rete e, quindi, elaborare i dati acquisiti dal rilievo topografico, si utilizza il software della MicroSurvey, Star*Net. Il software consente di ricavare le coordinate assolute a partire dalle misure di angoli e distanze effettuate tramite stazione totale. E' molto intuitivo da usare, si presenta con un Editor di Testo dove inserire i dati raccolti, potendoli modificare o selezionare solo alcuni sui quali eseguire la compensazione.

La prima operazione effettuata è stata quella di impostare le opzioni in modo ottimale:

• unità di misura, sistema di coordinate, tipo di rete (figura 34);

O 2D	Linear:	Meters 🗸 🗸	Angular: ODMS GONS	
Coordinate System	~	UTM: 3	32:N WGS-84	
2D Jobs				
Average Project Elevation:		0.000	Meters	
Local Jobs Datum Scheme Apply an Average Scale Facto Reduce to a Common Bevatio	r. n:	1.000000000	Meters	
Grid Jobs Average Geoid Height:		200.000	(Meters)	

Figura 34 - Impostazione "Starnet" (Adjustment")

• la convenzione degli angoli, l'inserimento delle coordinate, il tipo di distanza, parametri di output (figura 35);

Adjustment Converge Maximum Chi Squai Fixed Std	Solutio nce Li Iteratio e Sign Err:	n nit: ons: ficance Leve Linear: 1.0	0.010 10 1: 5.000 0000e-007	En %	or Propaga Perform Confidence	ition e Level:	95.000 %	
 Input / Out; North- East-N Longitude \$ Positive 	out Cor East Iorth iign Co e Wes	Angular: 3.0 ordinate Order Label Nort	8673e-004	mg s: Dis	gle Data Si At-From From-At- stance / Ve Slope D Slope D	tation On -To -To ertical Da list/Zenii	der ta Type th Type	
Earth Radiu	s / Re	fraction Infom	nation			st / Liev	Dir	
Earth Ra Default C	lius of p <mark>effici</mark> e	Curvature for int of Refraction	Local Jobs: on:	6372000	000	Reset Reset	(Meters)	

Figura 35 - Impostazione "Starnet" (General)

• le costanti di precisione dello strumento (figura 36).

Distance Constant: Distance PPM: Angle: Direction: Azimuth / Bearing:	0.009144 0.000 1.234568 0.925926 1.234568	Meters MilliGons MilliGons MilliGons	Eevening Sections as Elev Diff: [:	○ Tums] Meters/Km
Zenith: Elev Diff Constant: Elev Diff PPM:	3.086420 0.015240 0.000	MilliGons Meters			
Centering Errors: Horiz Instrument: Horiz Target: Vertical:	0.000000 0.000000 0.000000	Meters Meters Meters			

Figura 36 - Impostazione "Starnet" (Instrumet)

A questo punto inizia la fase di input dei dati (figura 37); come detto sopra, il software si presenta come un Editor di Testo per cui le misure sono inserite sotto forma di codice:

- C = coordinate;
- D = distanze;
- V = angoli zenitali;
- B = angoli azimutali.
- DB = comando per iniziare una sequenza di misure di angoli ricavate dalla stessa stazione totale, seguito dal nome della stazione;
- DN = comando per inserire i vari punti collimati;
- DE = comando per terminare la sequenza.

Occorre inserire, alla fine della stringa delle coordinate, uno o più punti esclamativi "!" secondo il numero di coordinate che si vuole fissare.

Esempio:

C Nome coordinata Est Nord Quota !!!

Per una sequenza di misure di angoli effettuate dalla stessa stazione:

DB Nome stazione

DN Nome punto	(1)	Angolo	o azimutale	Э
---------------	----	---	--------	-------------	---

- DN Nome punto (2) Angolo azimutale
- DN Nome punto (3) Angolo azimutale
- DN Nome punto (4) Angolo azimutale

DE

eters

V Nome stazione (1)/ Nome stazione (2) Angolo zenitale Altezze strumentali(1)/(2)

D Nome stazione (1)/ Nome stazione (2) Distanza (1)/(2) Altezze strumentali(1)/(2)

/	Clar	ea.d	at* 🗙						
	1	С	1000	33990	2.50700	500	0613.52900	1038.58200	111
	2	С	3000	3399	76.86100	500	0559.95600	1034.58500	111
	3								
	4	DE	3000						
	5	DN	1000	120	285928				
	6	DN	1000	120	284104				
	7	DN	1002	320	281729				
	8	DN	D1	221	701093				
	9	DN	D2	305.	782161				
	10	DN	I D3	308.	221349				
	11	DN	D4	309.	420010				
	12	DN	D5	317.	852781				
	13	DE	2						
	14								
	15	v	3000-	1000	97.1563	05	1.505000/1	.610000	
	16	V	3000-	1000	97.1564	63	1.505000/1	.610000	
	17	V	3000-	1002	302.834	781	1.505000/1	.610000	
	18	V	3000-	Dl	94.2715	46	1.505000/2	.000000	
	19	v	3000-	·D2	99.4403	99	1.505000/2	.000000	
	20	V	3000-	D3	99.6520	25	1.505000/2	.000000	
	21	v	3000-	D4	99.7932	81	1.505000/2	.000000	
	22	V	3000-	D5	99.8488	47	1.505000/2	.000000	
	23	V	3000-	D6	99.8770	56	1.505000/2	.000000	
	24								
	25	D	3000-	1000	91.7538	00	1.505000/1	.610000	
	26	D	3000-	1000	91.7540	00	1.505000/1	.610000	
	27	D	3000-	1002	91.7542	00	1.505000/1	.610000	
	28	D	3000-	Dl	6.72810	0	1.505000/2	.000000	
	29	D	3000-	D2	77.1957	00	1.505000/2	.000000	
	30	D	3000-	-D3	138.619	600	1.505000/2	.000000	
	31	D	3000-	·D4	201.005	200	1.505000/2	.000000	
	32	D	3000-	D5	251.652	500	1.505000/2	.000000	
	33								

Figura 37 - Input "Starnet"

Effettuata l'elaborazione, si ottengono le coordinate dei punti collimati partendo dai vertici di stazione, le loro distanze reciproche e le ellissi di errore. Il risultato finale è la rete di dettaglio (figura 38) usata come dato di input nelle elaborazioni successive.



Figura 38 - Rete di dettaglio 42

Tramite le operazioni sopraelencate è stato possibile ricavare le coordinate assolute dei punti dei marker utilizzati, elementi essenziali nella fase successiva relativa al rilievo fotogrammetrico.

5.2 Elaborazione dati fotogrammetrici

Per elaborare i dati ottenuti da drone, è stato utilizzato il software Metashape, versione aggiornata del software Photoscan, entrambi della Agisoft. Nel dettaglio, in un processo fotogrammetrico, tale software permette la ricostruzione della nuvola densa di punti, della mesh triangolare 3D, del DEM e dell'ortofoto dell'area presa in esame, partendo dalle immagini acquisite.

Si riporta uno schema delle operazioni principali (figura 39).



Figura 39 - Procedimento Metashape

Le operazioni elencate di seguito sono state svolte in modo esattamente identico per entrambe le due campagne di acquisizione.

La prima operazione da fare, necessaria all'elaborazione dei dati, è il settaggio delle impostazioni di base: comando "Tools – Preferences", in cui si impostano le opzioni iniziali: lingua, vista di default, tema, formato latitudine e longitudine, unità di misura.

La fase successiva è quella di caricare le foto acquisite dal drone: comando "Workflow – Add Photos".

Caricate le immagini, si può notare a fianco al nome delle stesse l'acronimo NA (Not Aligned) (figura 40); quest'ultimo sta ad indicare che la foto a cui si riferisce non è allineata, cioè non è stato svolto l'orientamento relativo.

🥁 Untitled* — Agisoft Metashape Professional	
File Edit View Workflow Model Photo Ortho Tools Help	
□ ె □ □ □ □ □ □ • ● • ◆ • ▲ • ▲ • ▲ • ▲ • ▲ • ▲ • ▲ • ▲ • ▲	8 🕶 🏢 🕶 📣 🖛 🏭 🕶 🔯 🕶 💌 💌 🖆
Workspace	e ×
 Workspace (1 chunks, 801 cameras) Chunk 1 (801 cameras) 	^
 Cameras (0/301 aligned) DJI_0001, NA 	
 DJI_0002, NA DJI_0003, NA 	
III DJI_0004, NA	
DJL0005, NA DJL0006, NA	
III DJI_0007, NA	
Z DJ_0008, NA	
I DJI 0010, NA	

Figura 40 - Acronimo "Not Aligned"

Prima di effettuare l'allineamento dei fotogrammi, si inseriscono i marker (figura 42), in modo tale da avere una precisione ottimale, nell'ordine dei centimetri. E' possibile effettuare l'operazione di allineamento prima dell'inserimento dei punti di appoggio ma ne risulterebbe un allineamento peggiore. Nella campagna di acquisizione dati, infatti, sono stati distribuiti lungo il sito d'interesse dei marker, con coordinate note, ricavate dal rilievo topografico. Queste ultime, inserite in un file di testo, possono essere caricate nel progetto tramite il comando "Import" nella finestra "Reference", al fine di georeferenziare correttamente il modello creato. Prima di effettuare l'importazione è stato necessario settare correttamente le opzioni, inserendo il sistema di coordinate WGS84/UTM zone 32N e precisando come sono state divise le coordinate nel file di testo.

Per il posizionamento dei marker (figura 41) è stato scelto l'approccio manuale: aprire le foto dove è possibile visualizzare dei marker, riscontrabili con una bandierina, attraverso il comando "Place Marker" selezionabile dal tasto destro del mouse. Tale operazione, una volta che è stata fatta per almeno due volte, in almeno due foto allineate diverse, verrà fatta automaticamente dal software che troverà le proiezioni in tutte le altre foto indicandole sempre con una bandierina. Al fine di migliorare il posizionamento, è possibile spostare le bandierine sul centro preciso del marker, dopo di ciò la bandierina cambierà il colore da bianco a verde (figura 41).



Figura 41 - Posizionamento marker



Figura 42 - Marker posizionati 44

Questa operazione è importante per migliorare l'allineamento e la localizzazione delle foto.

È ora possibile dare un primo orientamento relativo alle immagini, attraverso il comando "Workflow – Align Photos". Nella finestra di settaggio sono state scelte come impostazioni:

- "Accurancy", voce che definisce l'accuratezza nella stima della posizione delle camere e ricostruzione:
 - ✓ "High" per riferirsi ad immagini a scala originale;
- "Preselection", voce che serve ad accelerare il rilevamento delle coppie di fotogrammi dividendole in sottoinsiemi secondo le proprie caratteristiche:
 - "Generic", per realizzare un abbinamento secondo una prima impostazione con precisione inferiore;
 - ✓ "Reference", per realizzare un abbinamento in funzione della posizione misurata dalla fotocamera.

Il software opera individuando ed associando tra loro i punti omologhi, tra le varie foto, e ricava automaticamente delle informazioni quali:

- Parametri di calibrazione della fotocamera;
- Posizione di presa per ogni foto.

Può, a questo punto, elaborare una prima nuvola di punti sparsi detta Tie Cloud (figura 43). Sono state scelte le opzioni sopraelencate per ottenere un allineamento ottimale.

In figura 43, 44, 45, 46 sono raffigurati due esempi di allineamento per ogni rilievo, i rettangoli azzurri rappresentano i fotogrammi allineati.



Figura 43 - Allineamento fotogrammi-vista dall'alto (rilievo 12/6/2018)



Figura 44 - Allineamento fotogrammi-ingrandimento (rilievo 12/6/2018)



Figura 45 - Allineamento fotogrammi-vista dall'alto (rilievo 12/3/2019)



Figura 46 - Allineamento fotogrammi-ingrandimento (rilievo 12/3/2019)

Si ottiene a questo punto, anche, il valore dell'errore di georeferenziazione dei singoli marker e quello totale di tutti i marker. Tali valori sono ottimizzati tramite i comandi:

- "Update", per aggiornare i parametri già elaborati;
- "Optimize camera alignment", per controllare la presenza e usufruire di parametri aggiuntivi della camera per migliorare l'allineamento.

Si raggiunge, in questo modo, un valore al disotto dei 5 cm, definendo lo scostamento dei marker posizionati dai corrispettivi marker sulle immagini e rispettandone il valore secondo le "Linee guida" per "Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala" del Cisis [42], Centro Interregionale di Coordinamento e documentazione per le informazioni territoriali.

Si ricavano ora i vari modelli utili alle fasi successive.

Il primo modello digitale è la nuvola densa. Quest'ultima si ottiene tramite il comando "Workflow – Build dense cloud". Essa è un insieme di punti che sono caratterizzati dalla loro posizione in un sistema di coordinate e da valori di intensità, come colore, profondità, ad essi associati. Rispetto alla prima creata in fase di allineamento, Tie point, la nuvola densa contiene molti più punti, passando da circa 5000000 a circa 30000000. La nuvola di punti serve a dare una rappresentazione tridimensionale dell'invaso. Le opzioni sono state scelte in funzione del grado di accuratezza voluto.

Nella finestra di settaggio sono state scelte come impostazioni:

- "Quality", voce che definisce la qualità di ricostruzione desiderata:
 - ✓ "Medium", per realizzare una geometria dettagliata ed accurata;
- "Depth filtering", in fase di generazione sono calcolate mappe di profondità per ogni immagine che possono essere soggette ad anomalie per la presenza di rumore o di cattive focalizzazioni:
 - ✓ "Mild", per non considerare i dettagli di piccole dimensioni come anomalie.

Successivamente alla generazione della nuvola di punti si procede con la creazione di una Mesh triangolare tridimensionale. Essa consiste in una superficie data dall'unione di punti della nuvola formando dei triangoli (figure 47, 48). Tale operazione si effettua attraverso il comando "Workflow – Build mesh". Nella finestra di settaggio sono state scelte come impostazioni:

- "Source data", voce che definisce il modello da cui si genera la mesh:
 - ✓ "Dense cloud", per ottenere una mesh di alta qualità basata sulla nuvola densa;
- "Suface type", voce che definisce il tipo di superficie del rilievo:
 - ✓ "Arbitrary", poichè può essere utilizza per la modellazione di qualsiasi tipo;
- "Depth maps Quality", voce che definisce la qualità di modellazione desiderata:
 - ✓ "High", in quanto si vuole realizzare una geometria della profondità il più possibile dettagliata ed accurata;
- "Face count", specifica il numero massimo di poligoni della mesh:
 - "Medium", si è scelta tale opzione per ottenere un numero ottimale di poligoni e, quindi, per ottenere un livello di dettaglio medio della mesh.



Figura 47 - Ingrandimento su triangoli della mesh creata (visualizzazione solid)



Figura 48 - Ingrandimento su triangoli della mesh creata (visualizzazione wireframe)

Si vuole, a questo punto, colorare la mesh tridimensionale appena creata mediante il comando "Workflow – Build Texture". Nella finestra di settaggio sono state scelte come impostazioni:

- "Mapping mode", voce che definisce la modalità di mappatura usata:
 - ✓ "Generic", si utilizza tale opzione per ottenere una mappatura generica;
- "Blending mode", voce che definisce la modalità con cui i valori dei pixel delle diverse foto sono combinati:

✓ "Mosaic", si preferisce tale scelta per definire maggiormente i dettagli.

A partire dalla nuvola densa o dalla Mesh è possibile creare un DEM (Digital Elevation Model) modello digitale di elevazione che descrive la superficie del terreno e dà informazioni altimetriche; per ottenerla si utilizza il comando "Workflow – Build DEM". Nella finestra di settaggio sono state scelte come impostazioni:

- "Projection type", voce che consente di scegliere il sistema di coordinate:
 ✓ "Geographic" WGS84/UTM zone 32N;
- "Source data", voce che definisce il modello da cui si genera il DEM:
 - ✓ "Dense cloud", poiché si vuole ottenere maggiore accuratezza.

Sulla base del DEM è possibile generare l'ortofoto, una fotografia aerea geometricamente corretta e georeferenziata, considerata equivalente ad una carta geografica; si utilizza il comando "Workflow – Build Orthomosaic". Nella finestra di settaggio sono state scelte come impostazioni:

- "Projection type", voce che consente di scegliere il sistema di coordinate:
 ✓ "Geographic" WGS84/UTM zone 32N;
- "Surface", voce che definisce il modello su cui basare l'ortofoto:
 - ✓ "DEM", in quanto particolarmente efficiente per rilievi aerei.

Si riportano di seguito i modelli realizzati in questa fase per entrambe le campagne di acquisizione (figure 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56).

Rilievi del 12/6/2018:



Figura 49 - Nuvola densa (rilievo 12/6/2018)



Figura 50 - Mesh triangolare tridimensionale con texure (rilievo 12/6/2018)



Figura 51 – DEM (rilievo 12/6/2018)



Figura 52 – Ortofoto (rilievo 12/6/2018)

Rilievi del 12/3/2019:



Figura 53 - Nuvola densa (rilievo 12/3/2019)



Figura 54 - Mesh triangolare tridimensionale con texure (rilievo 12/3/2019)



Figura 55 – DEM (rilievo 12/3/2019)



Figura 56 – Ortofoto (rilievo 12/3/2019)

I modelli realizzati sono stati esportati per poterli utilizzare nelle fasi successive, in particolare:

- nuvola densa e mesh per effettuare i confronti con il software 3DReshaper;
- DEM e ortofoto, sotto forma di immagini raster, per le analisi con il software GIS.

L'elaborazione dei dati ha fornito una esatta riproduzione della realtà, fornendo modelli completi sui quali è stato possibile effettuare le analisi successive in modo ottimale. Durante questa fase non si è riscontrato alcun tipo di problema. Si riassumono nelle tabelle 11 e 12 i prodotti finali.

Rilievi	Residui totale marker	Punti nuvola sparsa	Punti nuvola densa	Densità media punti riferita ad una sfera con r = 0.1 m	Numero facce mesh
12/6/2018	0,021	4875786	30675389	11,8	6051187
12/3/2019	0,043	5589014	26758461	28,5	5338542
		T 1 11 11	T 1 11 · · ·	1	

Rilievo	Modello	Dimensione immagine [pix]	GSD [cm/pix]	Memoria [GB]
	Nuvola densa	/	/	0,77
12/6/2018	Mesh	/	/	0,53
12/0/2018	DEM	8631 x 7728	5,88	0,08
	Ortofoto	24143 x 22217	1,47	1,1
	Nuvola densa	/	/	3,54
12/3/2019	Mesh	/	/	2,54
	DEM	7851 x 6888	8,97	0,36
	Ortofoto	29745 x 28320	2,34	1,07

Tabella 12 - Tabella riassuntiva 2

In tabella 12 è possibile notare dei valori per il rilievo del 12/3/2019 decisamente più elevati rispetto a quelli del rilievo del 12/6/2018, ciò è dovuto al fatto che nel primo caso l'area acquisita, intorno l'invaso, è notevolmente maggiore.

Rilievo	Tempo operazioni utente (collimazione marker) [h]	Tempo operazioni software (ricostruzione modelli) [h]
12/6/2018	≈ 15	≈ 84 (90% solo per la nuvola densa)
12/3/2019	≈ 18	≈ 96 (90% solo per la nuvola densa)

Si riportano in tabella 13 i tempi relativi alle elaborazioni:

Tabella 13 - Tempi di elaborazione

5.3 Elaborazione scansioni laser

Ognuna delle scansioni produce una nuvola di punti che descrive parzialmente il sito, in quanto alcune porzioni di rilievo si trovano fuori dalla portata dello strumento. Per ottenere, quindi, una copertura totale della zona oggetto di studio, è necessario fare scansioni da punti differenti. Ciò comporta la necessità di allineare ed unire le singole acquisizioni in una sola, secondo un sistema di riferimento globale. Si utilizza, quindi, il software "Riscan PRO", prodotto dalla stessa "Riegl", per elaborare le nuvole di punti ottenute. Si descrive il procedimento effettuato con un flow chart (figura 57).



Figura 57 - Procedimento Riscan Pro

Il software lavora su più sistemi di coordinate differenti:

- SOCS (Scanner's Own Coordinate System), il sistema di coordinate fornito dallo stesso laser scanner;
- PRCS (Project Coordinate System), un sistema locale di coordinate riferito al progetto;
- GCLS (Global Coordinate System), sistema di coordinate nel quale viene incorporato il PCRS;
- CMCS (Camera Coordinate System), sistema di coordinate della camera montata sulla parte superiore del laser scanner.

L'interfaccia del software si presenta come nell'immagine seguente (figura 58):



Figura 58 - Interfaccia "Riscan"

Come si può notare, all'interno della "cartella SCANS" (figura 58) sono presenti le singole scansioni chiamate "ScanPos" (figura 58) all'interno della quale si trova, anche, la relativa nuvola di punti (figura 58). Una "ScanPos" è caratterizzata dal SOCS, quindi, la posizione e l'orientazione dello scanner all'interno del PCRS. Tale posizione e orientazione sono descritte da una matrice di rototraslazione 4 x 4, al cui interno sono presenti parametri di rotazione e traslazione che prende il nome di "SOP" (Sensor's Orientation and Position) (figura 59).

eneral				50 D.57770						
MATR	XIX									
SOP:	Roll:	77.851 deg	Pitch: -	57.288 deg	Yaw:	-124.703 d	eg	3		
	-0.3076727	15	0.6413180	018	-0.70	2885980	-442	6781.48	3046141	
	-0.4442854	83	0.556412	473	0.70	2150675	449	8829.61	3092332	
	0.8413964	05	0.528314	641	0.11	3735350	-552	8202.63	7659109	
	0.0000000	00	0.0000000	000	0.00	0000000		1.00	0000000	
Modi	ify other SOPs to	o								
□ Modi POSI ☑ Posit X: [ify other SOPs to T I O N tion measured et 4474180.018	xternally (GP	5, totalstatio ordinate syst	n, [m] nem: GLCS		×				
POSI ✓ Posit X: - Y: -	fy other SOPs to T I O N tion measured ex 4474180.018 546710.772	xternally (GP	s, totalstation ordinate syst	n, [m] teem: GLCS racy: 1.197		>				

Figura 59 - Matrice SOP

Le nuvole si presentano "sporche" (figura 60), ovvero sono presenti dei punti sparpagliati provocati dal disturbo ambientale e dal disturbo analogico dello strumento. Si effettua, quindi, un'operazione di pulitura per rendere più "leggere" le nuvole (figura 61), selezionando manualmente tali punti tramite il comando "Selection mode(space)" e cancellandoli.



Figura 60 - Nuvola "sporca"



Figura 61 - Nuvola pulita

A questo punto è necessario introdurre nelle varie scansioni la posizione dei marker. In genere i target riflettenti posizionati in fase di acquisizione sono individuati in modo automatico dal software ma se questi sono poco visibili, come in questo caso, è necessario svolgere tale operazione in modo manuale, individuando i pochi target riflettenti visibili. Si è pensato, allora, di utilizzare i marker utilizzati in fase di rilievo fotogrammetrico, conoscendone le coordinate, ma anche questa soluzione si è rivelata non adatta, sempre per la scarsa visibilità dei marker. Si è fatto riferimento, per questo motivo, a dei punti caratteristici di elementi naturali e di edifici vicini (figura 62), ovviamente di coordinate note. Tale operazione manuale si effettua tramite il comando "New tiepoint" (figura 61). Tali punti sono importanti per la registrazione delle scansioni nel sistema globale, che si illustrerà in seguito.



Figura 62 - Impor "tiepoint"



Figura 63 - Visualizzazione tiepoints

Si va, così, a definire la matrice TPL (SOCS) (figura 64) che mostra le coordinate dei target nella singola scansione; queste, appena descritte, sono operazioni che sono state effettuate per tutte le scansioni.

 Name 	Link	Ref Finesca	in ReflType	Size	Points	Ampli	Reflec	Х	Y	Z	Range	θ	φ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔR	Δθ	Δφ	
9003		0		0.000	0	8.580	-5.38	-61.580	103.545	-2.056	120.490	90.978	120.741	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
9004		0		0.000	0	14.190	-2.18	0.773	94.722	-2.070	94.748	91.252	89.532	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
9005		0		0.000	0	18.100	-11.52	6.943	14.306	-0.646	15.915	92.326	64.112	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
9006		0		0.000	0	17.510	-3.95	-25.120	-46.545	0.870	52.898	89.058	241.645	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
9007		0		0.000	0	4.270	-12.69	-42.217	-77.830	1.925	88.564	88.755	241.523	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10053		0		0.000	0	8.390	-6.55	-20.270	-107	20.810	111.684	79.261	259.355	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10056		0		0.000	0	10.270	-1.91	-70.588	-132	28.702	153.054	79.191	241.996	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10057		0		0.000	0	11.350	-4.74	-44.250	-86.880	5.060	97.631	87.029	243.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10058		0		0.000	0	10.650	-2.47	-95.922	-98.020	5.460	137.254	87.720	225.620	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10059		0		0.000	0	11.420	-1.02	-108	-101	6.115	148.517	87.640	222.935	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10060		0		0.000	0	7.150	-4.65	-120	-105	6.400	160.198	87.710	221.185	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10061		0		0.000	0	7.170	-4.27	-125	-109	8.624	166.826	87.037	220.948	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10062		0		0.000	0	1.970	-9.23	-135	-104	8.405	171.240	87.187	217.687	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10063		0		0.000	0	4.150	-6.59	-145	-106	8.530	180.495	87.291	216.302	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10064		0		0.000	0	6.100	-4.26	-152	-109	7.799	188.405	87.628	215.740	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
200032		0		0.000	0	1.280	-3.17	-369	16.135	20.165	370.305	86.878	177.499	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
200034		0		0.000	0	2.710	-1.43	-382	28.310	22.843	383.912	86.589	175.764	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
□N1		0		0.000	0	10.240	-3.06	-117	-63.013	-17.082	134.664	97.288	208.147	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
N2		0		0.000	0	7.060	-7.07	-105	-59.552	-19.278	122.413	99.061	209.514	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
N3		0		0.000	0	6.700	-4.89	-144	-76.476	-12.654	163.924	94.427	207.900	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
🗹 N4		0		0.000	0	8.110	-3.12	-154	-71.440	-16.375	170.828	95.501	204.843	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
🗖 f3		0		0.000	0	1.260	-3.00	-376	27.220	25.040	378.501	86.207	175.867	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
🗖 f4		0		0.000	0	9.320	4.93	-371	26.583	22.723	373.140	86.509	175.907	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
🗖 f5		0		0.000	0	6.910	2.53	-372	16.522	22.896	373.630	86.487	177.461	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
🗖 f6		0		0.000	0	0.630	-3.62	-377	17.802	25.411	379.036	86.156	177.302	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
						E:		(1		coc	21)									-

Figura 64 – TPL (SOCS)

Si definisce ora la matrice "GLCS" importando le coordinate dei punti considerati nella parte precedente, tali coordinate sono quelle ottenute tramite la stazione totale (figura 65). Questa operazione si effettua tramite il comando "Import tiepointlist..."



Figura 65 - Import tiepointlist

Si ottiene, in questo modo, la matrice TPL (GLCS) (figura 66).

Name	Ref	ReflType	Size	Х	Y	Z	Rod h
9002	2		0.00	4474	5465	4499	0.000
9003	2		0.00	4474	5467	4499	0.000
9004	2		0.00	4474	5467	4499	0.000
9005	2		0.00	4474	5467	4498	0.000
9006	2		0.00	4474	5466	4498	0.000
9007	1		0.00	4474	5466	4498	0.000
9008	2		0.00	4474	5464	4499	0.000
9009	2		0.00	4474	5464	4499	0.000
9010	2		0.00	4474	5464	4499	0.000
10001	2		0.00	4474	5466	4498	0.000
10002	2		0.00	4474	5466	4498	0.000
10003	2		0.00	4474	5466	4498	0.000
10004	2		0.00	4474	5466	4498	0.000
10005	2		0.00	4474	5462	4499	0.000
10006	2		0.00	4474	5462	4499	0.000
10007	2		0.00	4474	5462	4499	0.000
10008	2		0.00	4474	5462	4499	0.000
10009	2		0.00	4474	5462	4499	0.000
10010	2		0.00	4474	5462	4499	0.000
10011	2		0.00	4474	5463	4499	0.000
10012	2		0.00	4474	5463	4499	0.000
10013	2		0.00	4474	5463	4499	0.000
10014	2		0.00	4474	5463	4499	0.000
10015	2		0.00	4474	5462	4499	0.000
10016	2		0.00	4474	5462	4499	0.000
10017	2		0.00	4474	5462	4499	0.000
10018	2		0.00	4474	5463	4499	0.000
10019	2		0.00	4474	5463	4499	0.000
10020	2		0.00	4474	5463	4499	0.000
10021	2		0.00	4474	5463	4499	0.000
10022	2		0.00	4474	5463	4499	0.000

Tali coordinate sono copiate nel PRCS; è, ora, possibile effettuare un confronto tra le coordinate delle singole scansioni con quelle del progetto, al fine capire se ci sia scostamento (figura 67), tramite il comando "Find correspondig points".

Corresponding tiepoints: 12		12 Av	rg. radial devi	0.0011																
Standard devia	tion [m]:	0.0364 Av	g. theta devia g. phi deviati	ation [m]: on [m]:	0.0000															
lame	Link	Ref	Finescan	RefIType	Size	Points	Ampli	Reflec	Х	Y	Z	Range	θ	φ	🔺 ΔX	ΔY	ΔZ	ΔR	Δθ	Δ¢
9002	9002	0			0.000	0	0.000	0.00	-34.510	172.193	-0.310	175.618	90.101	101.333	-0.049	0.039	0.028	0.048	-0.028	0.040
200032	200032	0			0.000	0	7.080	-2.54	-188	79.451	19.880	205.139	84.439	157.099	-0.043	-0.011	-0.041	0.031	0.045	0.027
10058	10058	0			0.000	0	12.760	-2.86	101.518	17.847	0.395	103.075	89.780	9.971	-0.040	-0.030	0.018	-0.044	-0.018	-0.022
10060	10060	0			0.000	0	14.670	-3.27	78.777	6.052	1.419	79.022	88.971	4.393	-0.027	-0.036	-0.002	-0.030	0.001	-0.034
10059	10059	0			0.000	0	12.800	-3.97	89.600	12.497	1.120	90.474	89.291	7.940	-0.026	-0.028	0.020	-0.029	-0.020	-0.024
10064	10064	0			0.000	0	13.860	-8.38	47.886	-4.397	3.086	48.186	86.329	354.753	-0.007	-0.037	0.035	-0.001	-0.035	-0.037
9006		0			0.000	0	0.000	0.00	161.736	81.667	-3.907	181.227	91.235	26.791	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10056		0			0.000	0	10.000	-3.22	133.298	-11.919	22.676	135.737	80.383	354.891	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10063	10063	0			0.000	0	11.180	-9.94	54.669	0.165	3.765	54.799	86.060	0.173	0.000	-0.008	-0.003	0.000	0.003	-0.008
200030		0			0.000	0	4.650	-5.34	-186	59.218	20.345	196.802	84.066	162.391	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
200033		0			0.000	0	7.670	-1.67	-189	93.039	19.985	211.887	84.588	153.828	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
■ N2		0			0.000	0	2.230	-13.34	85.088	54.434	-23.647	103.741	103.176	32.608	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N 3		0			0.000	0	16.300	-3.95	49.577	30.444	-16.920	60.589	106.216	31.553	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
🗖 N4		0			0.000	0	14.370	-6.63	39.106	33.843	-20.374	55.586	111.502	40.873	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10062	10062	0			0.000	0	12.210	-7.52	64.060	4.159	3.593	64.295	86.796	3.715	0.009	0.020	0.006	0.011	-0.005	0.019
9008	9008	0			0.000	0	11.480	-17.87	-16.096	3.621	0.204	16.500	89.290	167.321	0.015	-0.015	0.001	-0.017	-0.001	0.011
9010	9010	0			0.000	0	6.300	-6.28	-117	87.359	1.688	146.197	89.338	1/13 303	0.038	0.030	0.011	-0.012	-0.011	-0.047
9009	9009	0			0.000	0	7.850	-8.67	-85.430	37.021	1.314	93.116	89.191	[lie point "	1.8006			19	-0.005	-0.032
9007	9007	0			0.000	0	27.510	15.61	150.668	47.734	-3.381	158.085	91.226	Linked tie p	oint: /clarea	1203_08_0	5/TPL (PRCS	5)/9008 7	0.074	0.034

Figura 67 - Scostamenti e "Find correspoding points"

Si sono ottenuti scostamenti che non superano i 5 cm ricavando una registrazione delle scansioni ottimali.

Si passa, quindi, alla registrazione delle scansioni, consistente nell'allineamento delle varie scansioni secondo un sistema globale unico, sovrapponendo, così, tra loro le nuvole di punti, prendendo in considerazione i "tiepoints" applicati.

L'operazione di registrazione è stata effettuata in due modi:

- per forma, usando il comando "Registration Automatic Registration 2";
- tramite i marker ottenuti dal rilievo topografico, usando il comando "Registration Multi Station Adjustment 2".

La prima consente di registrare automaticamente le scansioni senza una minima interazione da parte dell'utente, facendo riferimento alle forme simile.

La seconda è utilizzata per allineare ulteriormente le scansioni e si effettua dopo l'operazione precedente, in questo caso il software oltre ai tiepoints fa riferimento alle coordinate dei punti ottenuti dal GPS durante la fase di rilievo topografico.



Figura 68 - Nuvole di punti registrate

Si vuole ottenere, a questo punto, un modello utile alle fasi successive del lavoro (figura 68); si esportano, a tal fine, le nuvole di punti registrate, avendo cura di impostare il sistema di coordinate uguale a quello usato per i modelli precedenti (figura 69), ricavati con tecnica fotogrammetrica.

xport For	nat:	LAS (*.las, *.laz)	~	Restore def	ault S	ave Settings
Export For	nat S	Settings		- Land and the second se	inclusion in the	
Intensity:	No	Intensity		~		
Color:	Ref	lectance as Color		~		
	-25	5 dB				
Las forma	t ver	sion				
() Las 1.2	2	O Laz 1.2		Las 1.4	01	.az 1.4
Coordinat	e Re	solutions				
Easting[m	ŀ.	0.00025	●R	ecommended v	alues	
Northing[n]:	0.00025	00	ustom values		
Height[m]		0.00025				
Compa	tibility	y mode: "Exclude Extra	a Bytes"			
Coordinate	Syst	tems Settings				
WGS 84 / I	JTM :	zone 32N	~	2		
				~		

Figura 69 - Esportazione modello

In questa fase si sono riscontrati diversi problemi relativi al posizionamento dei tiepoints, in quanto solo pochissimi marker, posizionati in fase di acquisizione, erano visibili dalle nuvole di punti. Si è optato, quindi, per la soluzione descritta in precedenza facendo ritardare il lavoro. Quindi, il tempo necessario ad eseguire l'elaborazione è stato di circa un mese e mezzo, ottenendo alla fine buoni risultati, come si evince dal confronto effettuato nella fase successiva.

Capitolo 6 Analisi e confronti

Nel capitolo precedente, si è esposto il procedimento eseguito per elaborare i dati ottenuti dai vari rilievi eseguiti. Si è ottenuta la rete di dettaglio dalla quale sono state ricavate le coordinate dei marker usati nelle fasi di rilievo aereo fotogrammetrico e di rilievo con laser scanner terrestre. Sono stati ottenuti, quindi, nuvole dense di punti, mesh tridimensionali triangolari, DEM e ortofoto dei due rilievi fotogrammetrici. E, infine, la nuvola di punti dal rilievo con laser scanner terrestre. Tutti questi modelli dell'invaso, oggetto di studio, sono stati esportati nel sistema di coordinate WGS84/UTM zone 32N in modo tale da poter essere confrontati in questa fase, che è stata articolata in due parti:

- la prima ha come obiettivo quello di trovare una corrispondenza tra le varie campagne d'acquisizione e confermare, quindi, l'attendibilità dei dati ottenuti, attraverso software per il confronto 3DReshaper;
- la seconda mira all'analisi della stima del volume di residuo e, quindi, all'analisi multitemporale tra le due osservazioni del 12/6/2018 e del 12/3/2019, attraverso il software ArcGis.

6.1 Confronto dei modelli ottenuti con 3DReshaper

In questa fase si mettono a confronto le nuvole di punti e le mesh ottenute nelle operazioni precedenti, al fine di capire se i dati ottenuti rispecchiano la situazione reale dell'invaso.

La prima operazione effettuata è stata quella di importare i modelli ottenuti dal rilievo aereo fotogrammetrico (figure 70, 72, 74, 76) e dal rilievo con laser scanner terrestre per effettuare l'elaborazione dati. A questo punto, al fine di rendere il progetto più "leggero" e maggiormente gestibile, tali modelli sono stati "puliti" eliminando tutta la zona circostante l'invaso (figure 71, 73, 75, 77,78) tramite il comando "Nuvola – Pulisci o scomponi nuvola", per le nuvole di punti, ed il comando "Mesh – Pulisci o scomponi mesh", per le mesh 3D. Un'altra operazione effettuata, al fine di migliorare il confronto, è stata quella di eliminare gli oggetti che potessero creare disturbo alla successiva fase di confronto, quali automezzi presenti all'interno dell'invaso che avevano lo scopo di ripulire il fondo dai residui di deposito di materiale. Ciò è stato effettuato, sempre tramite il comando "Pulisci" citato sopra, al quale è seguito il comando "Mesh – Tappabuchi" per riempire eventuali buchi ottenuti dalla precedente operazione.



Figura 70 - Nuvola densa (rilevo 12/6/2018)



Figura 71 - Nuvola densa "pulita" (rilevo 12/6/2018)



Figura 72 - Nuvola densa (rilevo 12/3/2019)



Figura 73 - Nuvola densa "pulita" (rilevo 12/3/2019)



Figura 74 – Mesh (rilievo 12/6/2018)



Figura 75 - Mesh "pulita" (rilievo 12/6/2018)



Figura 76 - Mesh (rilievo 12/3/2019)



Figura 77 - Mesh "pulita" (rilievo 12/3/2019)



Figura 78 - Nuvola pulita laser scanner (12/3/2019)

Si è passato, quindi, alla fase di confronto, realizzata tramite il comando "Nuvola – Confronta/Ispeziona", per le nuvole di punti e il comando "Mesh – Confronta/Ispeziona", per le mesh. In questa fase sono stati scelti come situazione di riferimento, per i vari confronti, i modelli rilevati durante la campagna di data 12/3/2019.

Il software chiede di selezionare, anche, un secondo modello, in questo caso, quelli relativi alla data del 12/6/2018 e quello ottenuto dall'acquisizione da laser scanner, ognuno per ogni confronto da effettuare, da misurare e proiettare sul modello di riferimento. In particolare, è stata realizzata un'ispezione tridimensionale, quindi, il software cerca il punto più vicino nelle tre dimensioni. Per realizzare tale operazione, il software identifica un piano locale sul modello di riferimento e calcola la distanza più vicina dal punto da misurare a tale piano. Ogni punto, quindi, viene proiettato, in direzione normale al modello, sul piano locale. Il risultato finale è una barra colorimetrica, in funzione della distanza in metri, e un relativo istogramma continuo dei punti che corrispondono a tale distanza.

Volendo ottenere una verifica della precisione dei modelli ottenuti, si considera un valore di distanza limite pari a 12 cm, la tolleranza accettabile. Durante le campagne di acquisizione, si è riscontrato un accumulo differente di materiale, è insensato, quindi, effettuare un confronto sul fondo, dove è presente il materiale. L'analisi, quindi, è stata effettuata solo per le pareti inclinate dell'invaso (figura 79, 80, 81, 82), essendo rimaste invariate tra le due osservazioni.



Figura 79 - Pareti inclinate nuvola invaso (12//6/2018)



Figura 80 - Pareti inclinate nuvola invaso (12//3/2019)



Figura 81 - Pareti inclinate mesh invaso (12//6/2018)



Figura 82 - Pareti inclinate mesh invaso (12//3/2019)

Si elencano nel dettaglio i confronti realizzati:

- 1) Nuvole di punti ottenute da drone e laser scanner nella stessa data di campagna d'acquisizione, 12/03/2019 (figura 83);
- 2) Nuvole di punti e mesh 3D ottenute, rispettivamente da laser scanner e drone nella stessa data di campagna d'acquisizione, 12/03/2019 (figura 84);
- Nuvole di punti ottenute da drone nelle due date di campagna d'acquisizione, 12/03/2019 e 12/06/2018 (figura 85);
- 4) Mesh 3D ottenute da drone nelle due date di campagna d'acquisizione, 12/03/2019 e 12/06/2018 (figura 86);

Si riportano i risultati ottenuti, riferendosi alla numerazione precedentemente menzionata:

1)



69

Risulta esserci una buona sovrapposizione tra le due nuvole, quasi il 100% dei punti risulta essere ad una distanza prossima a 0 m. 2)



Figura 84 - Confronto 2

Anche in questo caso risulta esserci una sovrapposizione, circa 85,5% dei punti sono intorno ad una distanza 0,102 m. La presenza di zone "non definite" (in nero) sono dovute ai buchi presenti nella nuvola di punti ottenuta dal laser scanner. Tali buchi sono dovuti alla presenza di elementi di disturbo alla scannerizzazione, quali acqua, rumore, disturbo analogico dello strumento.

3)



Figura 85 - Confronto 3

Risulta esserci una buona sovrapposizione lungo le pareti inclinate dell'invaso, infatti, circa il 90% dei punti si trova ad una distanza compresa tra 0 e circa 0,12 m, rispettando, così, il valore di tolleranza prefissato. E' presente, però, anche una piccola percentuale, circa il 5%, di punti che supera il valore, tolleranza, ma nel complesso si è ottenuto un buon riscontro.


Figura 86 - Confronto 4

Il confronto tra le mesh ha ottenuto un riscontro non ottimale come per le analisi precedenti, infatti, circa solo il 60% dei punti si trova nell'intervallo di tolleranza prefissato. Il segno negativo è dovuto alle superfici irregolari delle mesh e, quindi, possono non rispettare il piano locale di riferimento, realizzato dal software; è possibile considerare tali valori di distanza in valore assoluto.

Si conclude facendo notare che il confronto effettuato, in generale, risulta aver dato un buon riscontro, per cui si è potuto proseguire con le fasi successive; questa fase ha avuto una durata di circa 3 settimane.

Si riassumono nella tabella 14 le percentuali di punti, per ogni confronto, che si trovano nell'intervallo di tolleranza prestabilito.

	Punti sovrapposti
Confronto	che rispettano la
Connonito	tolleranza (≤ 12 cm)
	[%]
1	≈ 100
2	≈ 100
3	≈ 90
4	pprox 60

Tabella 14 - Tabella riassuntiva 3

Si riporta a fine tesi, per completezza, il report ottenuto dai vari confronti, sopraelencati, rilasciato dallo stesso software.

6.2 Stima del volume residuo

In questa fase si effettua l'analisi per ottenere la stima del volume di residuo che si è formato tra i due rilievi aereo fotogrammetrici del 12/6/2018 e del 12/3/2019. Per realizzare ciò, sono state effettuate analisi tramite il software ArcMap, uno dei principali componenti di GIS (Geographic Information System), prodotto dalla ESRI. Tramite tale software è possibile, infatti, realizzare elaborazioni geospaziali, nello specifico, di visualizzare, modificare, creare e analizzare dati georeferiti, in questo caso i DEM e le ortofoto. Queste ultime sono acquisite dal software come immagini raster, cioè una griglia ortogonale di punti (figura 87). Si può pensare ad un'immagine raster come una scacchiera ad ogni elemento della quale corrisponde un pixel a cui è associato un colore. Il modo più diffuso per definire un colore è il sistema RGB (Red, Green, Blue) da cui le schede grafiche generano il segnale da visualizzare nel monitor.



Figura 87 - Matrice raster

(Fonte: https://docs.qgis.org/2.8/it/docs/gentle_gis_introduction/raster_data.html)

Ogni cella della matrice (figura 87), quindi, corrisponde ad un pixel; dalle dimensioni di tale cella è possibile definire la risoluzione dell'immagine (più sono ridotte maggiore è la risoluzione).

La prima operazione è stata quella di caricare i modelli creati tramite il software Metashape, DEM e ortofoto delle due campagne di acquisizione, già georiferite nel sistema di coordinate WGS84 UTM Zone 32N (figure 88, 89, 90, 91).



Figura 88 - DEM (12/6/2018)



Figura 89 - DEM (12/3/2019)



Figura 90 - Ortofoto (12/6/2018)



Figura 91 - Ortofoto (12/3/2019)

Al fine di circoscrivere lo studio alla sola zona d'interesse, si è eliminata la zona al di fuori dell'invaso attraverso il comando "Estrai per maschera". Per utilizzare questa funzione è

necessario servirsi di un poligono (figura 91 in rosso) che funge da "maschera" ed in base al quale viene effettuato il ritaglio, tale poligono è stato creato appositamente prendendo in considerazione solo la zona di interesse. Si ottengono i modelli del solo invaso, si riportano a titolo di esempio solo DEM e ortofoto di un rilievo.(figura 92, 93).



Figura 93 - Ortofoto ritagliata (12/3/2019)

Si procede, quindi, inserendo le coordinate dei marker utilizzati, nelle due diverse campagne di acquisizione, per la fase di rilievo fotogrammetrico (figure 94, 95); assicurandosi di convertire

in elementi grafici georiferiti il file di testo contenente le coordinate, ottenute in fase di rilievo topografico.



Figura 95 - Marker (12/3/2019)

Sono stati utilizzati diversi codici per rappresentare i diversi tipi di target adoperati (tabella 15).

Codice	Tipo di target					
3000	Vertice					
	Vertice					
1000	(non visibile dalle figure					
1000	perché molto fuori dalla zona					
	d'interesse)					
M	Marker posizionati in					
IVI	verticale					
Р	Prismi					
INV	Marker dentro l'invaso					
П	Marker posizionati in					
D	orizzontale					
СТ	Marker catarifrangenti					
TS	Total station					



Si nota una differenza visibile nelle due immagini soprastanti, infatti, nel 2018 l'invaso era in fase svuotamento; nel 2019, l'invaso si è riempito nuovamente.

A questo punto si calcolano i profili del fondo dell'invaso, facendo riferimento a sei sezioni opportunamente inserite per avere una distribuzione il più uniforme possibile. Per ottenere ciò, sono state disegnate delle rette lunghe quanto le dimensioni dell'invaso stesso (figura 96).

Prima di eseguire tale operazione, è stato, però, necessario realizzare due procedimenti preliminari al fine di ottimizzare il più possibile l'analisi della stima dei profili e, quindi, del volume dei residui:

- 1) Ritornare sul software 3DReshaper per riempire i buchi relativi alle prese d'acqua presenti nell'invaso, tramite il comando "Tappa buchi", modificando le mesh ottenute in precedenza. Si riottengono, quindi, attraverso il riutilizzo del software Metashape, nuovi DEM, avendo come riferimento le mesh modificate (figure 97, 98).
- 2) Ottenere una risoluzione uniforme per i due DEM, appena ottenuti, utilizzando il software ArcMap. Si è usato, quindi, il comando "Ricampiona", attraverso il quale è possibile dimensionare le celle di un raster. impostando la dimensione (passo) delle celle (di forma quadrata) del DEM pari a 0,05 m.

Si fa presente che i DEM ottenuti, in funzione dell'accuratezza, della tolleranza e del passo ricavati, appartengono al Livello di Precisione 9, relativo ai modelli altimetrici, previsto dalle "Linee guida" per "Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala" del Cisis [42], facendo riferimento alla "Tabella riassuntiva delle caratteristiche dei vari livelli di modelli altimetrici".



Figura 97 - DEM senza prese d'acqua (12/6/2018)



Figura 98 - DEM senza prese d'acqua (12/3/2019)

Si sono, quindi, ricavati i profili del fondo dell'invaso mediante il comando "Profilo stack", inserendo, come file di input, il DEM e la retta, che rappresenta la sezione, di riferimento. Il software restituisce una tabella (figura 99) contenente due dati desiderati, distanza lungo l'asse della sezione (FIRST DIST) a cui corrisponde l'altezza in quel punto (FIRST Z).

Tab	ella								
0	- 🔤 - 🖷	🔂 🗉 🚑 🗙							
Sez	ione_A_StackPro	ofile3							
T	OBJECTID *	FIRST DIST	FIRST Z	SEC DIST	SEC Z	LINE ID	SRC TYPE	SRC ID	SRC NAME
E	1	0	1034,5109	<null></null>	<null></null>	0	Surface	0	dem_19_nuovo
	2	0,049999	1034,5166	<null></null>	<null></null>	0	Surface	0	dem_19_nuovo
	3	0,099998	1034,5838	<null></null>	<null></null>	0	Surface	0	dem_19_nuovo
	4	0,149997	1034,7372	<null></null>	<null></null>	0	Surface	0	dem_19_nuovo
	5	0,199997	1034,8232	<nuil></nuil>	<null></null>	0	Surface	0	dem_19_nuovo
	6	0,249996	1034,8157	<null></null>	<null></null>	0	Surface	0	dem_19_nuovo
	7	0,299995	1034,8495	<null></null>	<null></null>	0	Surface	0	dem_19_nuovo

Figura 99- Tabella attributi sezione

Avendo ricavato queste informazioni per tutte le sezioni nei due DEM, si trovano i profili del fondo corrispondenti. Per facilitare la visualizzazione, si sono esportate le varie tabelle in formato "EXCEL" (figura 100), da cui è stato possibile plottare i risultati per avere una visualizzazione grafica.

	Sezione A		S	ezione B				
12\03\	2019	12\06\	2018		12\03\	2019	12\06\	2018
Distanza	z	Distanza	z		Distanza	z	Distanza	Z
0	1034,5109	0	1034,538		0	1034,7508	0	1034,9343
0,04999917	1034,5166	0,04999917	1034,538		0,04999969	1034,7969	0,04999969	1035,1365
0,09999833	1034,5838	0,09999833	1034,5448		0,09999938	1034,8255	0,09999938	1035,2254
0,1499975	1034,7372	0,1499975	1034,5464		0,14999907	1034,8798	0,14999907	1035,619
0,19999667	1034,8232	0,19999667	1034,6496		0,19999876	1034,896	0,19999876	1035,741

Figura 100 - Punti profilo ("Excel")

Si riportando i sei profili ottenuti, relativi ai modelli dei due rilievi aereo fotogrammetrici (figure 101, 102, 103, 104,105, 106).



Figura 101 - Profili sezione A



Figura 102 - Profili sezione B

Le sezioni "A" e "B" (figure 101, 102) rappresentano la parte più lunga dell'invaso. Dai due grafici seguenti si nota una modesta differenza di materiale residuo presente tra le due osservazioni nella parte centrale di entrambi, che rappresenta il fondo. Si può, anche, notare come la parte destra dei grafici, per il profilo rappresentante l'osservazione del 12/6/2018 (linea arancione), coincida con il piano svuotato del fondo (di quota circa di 1013 m) e procedendo

verso sinistra vada ad aumentare la sua altezza, rappresentante il materiale residuo ammassato dai mezzi di cantiere.



Figura 103 - Profili sezione C



Figura 104 - Profili sezione D



Figura 105 - Profili sezione E



Figura 106 - Profili sezione F

I grafici seguenti, "C", "D", "E", "F" (figure 103, 104, 105, 106), rappresentano, invece, la parte più stretta; sono, quindi, ortogonali alle sezioni viste sopra. Anche in questi casi, è ben visibile la differenza di materiale presente nelle due diverse osservazioni. Si presta attenzione

all'intervallo compreso tra i valori 20 e 60 m di lunghezza dei grafici "D" ed "E" (figure 104, 105); si nota, infatti, un andamento "anomalo" che fa scendere i valori ben sotto la quota del piano del fondo stesso, privo di materiale residuo (ad esempio una quota di circa 1012,4 m nel 2018 per la sezione "D" e di circa 1011,8 m nel 2019 per la sezione "E"). Questi andamenti sono dovuti alla presenza dei buchi per la presa d'acqua e non vanno tenuti in considerazione, in quanto non utili al fine dello studio. Si fa presente che si è cercato di coprire tali buchi, come descritto precedentemente, non riuscendo, però, a farlo totalmente.

Dai profili ottenuti è stato possibile fare una prima stima grafica sulla differenza di materiale di residuo formatosi tra le due osservazioni.

Si vuole ottenere, a questo punto, una stima numerica del volume.

La prima operazione è stata quella di calcolare la differenza tra i due DEM, inseriti come input, tramite il comando "Meno", ottenendo un modello delle differenze (figura 107), in cui si oscilla tra valori negativi e positivi essendo una semplice operazione di sottrazione.



Figura 107 - Differenza tra DEM

Queste informazioni ottenute sono per lo più utili ad avere una rappresentazione del residuo depositatosi tra i due rilievi. Al fine di avere una stima ottimale del volume presente sul fondo, si è ritagliato ancora una volta il DEM, usando un poligono (figura 107 in rosso), circoscrivendo la zona il più possibile al fondo (figura 108).



Figura 108 - - Differenza tra DEM tagliata

E' necessario, però, ottenere un valore numero del volume. A tal fine, non ricavando valori numerici dal raster, si effettua una conversione da raster a punti, i quali rappresentano il centro di ogni cella presente nel raster, attraverso il comando "Da Raster a Punto". L'output darà come informazione il valore dell'altezza di ogni punto (grid_code) (figura 109).

Tabella			
•	a - 🔓	N 🛛 🕮	×
DEM_ut_	punti		
FID	Shape	pointid	arid code
0	Punto	1	0,406982
1	Punto	2	0,421326
2	Punto	3	0,40802
3	Punto	4	0,395813
4	Punto	5	0,399536
5	Punto	6	0,381348
6	Punto	7	0,365845

Figura 109 - Tabella delle altezze dei punti

Avendo ricavato circa 12000000 punti non è stato possibile estrarre tutti i dati per effettuare un calcolo sul software "Excel", per cui, dopo essersi assicurato di considerare i valori in "valore assoluto" tramite il comando "Calcolatore campo", all'interno della tabella contenente i dati, si è ottenuta la somma di tali dati dal comando "Statistiche" (figura 110).



Figura 110 - Statistiche (somma)

Tale somma (figura 110), effettuata solo tra i valori presenti nel campo "grid_code", in "valore assoluto", è stata moltiplicata per l'area della singola cella del raster A_{pixel} , di forma quadrata avente lato di 0,05 m, pari a 0,0025 m².

Il risultato finale è il volume V del residuo di materiale depositatosi a distanza di nove mesi, pari a 28491 m³.

A questo punto, si è stimata la precisione del valore ottenuto attraverso la legge di propagazione della varianza (equazione 5), ricavando, quindi una stima della varianza del volume σ_v pari a 1354 m³.

$$\sigma_v = A_{pixel} \cdot n_{pixel} \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_q$$

Equazione 5 - Legge di propagazione della varianza

Si ottiene, quindi, una percentuale di precisione pari a 4,7 % ottenuta dall'equazione 6.

$$Precisione = \frac{\sigma_v}{V} \ [\%]$$

Equazione 6 - Precisione in percentuale

Si verifica, infine, il valore di volume ottenuto, mediante l'ausilio del software "Excel". Tale verifica è stata realizzata mediante i profili ottenuti in precedenza; isolando da questi ultimi i valori relativi al fondo dell'invaso; si è, così, ottenuta una media delle differenze tra i profili, ricavati dalle due osservazioni, considerando tutte le sezioni, pari a 1,057 m.

Si ottiene, a questo punto, l'area del fondo dell'invaso, rappresentante la zona dove si è depositato il materiale residuo, mediante il software Arcgis. A tal fine è stato creato uno "shapefile", poligonale (figura 111 in rosso) e avente lo stesso sistema di coordinate rispetto a quello utilizzato finora (WGS84 UTM Zone 32N), della dimensione di materiale visibile dall'ortofoto. E'stato, così, possibile ricavare il valore dell'area da considerare per il calcolo, generando un nuovo campo con tale informazione, mediante il comando "Calcolo geometria" dalla tabella attributi, ottenendo un valore pari a 26543,9 m².



Figura 111 - Area materiale residuo

Si ricava, quindi, la stima media del volume, moltiplicando l'area, appena ottenuta, con la media di altezza tra le varie sezioni; si ottiene un volume di materiale residuo formatosi tra le due osservazioni pari a 28077 m³.

Il valore ottenuto è una stima media, ma è utile a verificare il valore di volume ricavato in precedenza, in quanto i due valori si discostano di poco.

Si riporta una tabella riassuntiva dei valori ottenuti (tabella 16).

	Da differenza tra raster	Da differenza (media) tra profili
	$[m^3]$	[m ³]
Volume	28491	28077

Tabella 16 - Tabella riassuntiva 4

6.3 Analisi multi-temporale

Si vuole ottenere, a questo punto, un modello temporale, in modo tale da visualizzare l'evoluzione, nel tempo, del deposito di residuo all'interno dell'invaso.

Per realizzare ciò, è necessario immettere le informazioni temporali relative alle due campagne di acquisizione nelle ortofoto e nei DEM. A tal fine si crea un Geodatabase contente tutti i dati utili, nel quale è possibile inserire le informazioni temporali sopracitate.

Un Geodatabase è una raccolta di set di dati, in questo caso, di file raster, grazie al quale è possibile dare l'informazione temporale di cui si necessita. Creato il "Geodatabase file" tramite il comando "Nuovo – Geodatabase file" sulla cartella selezionata dal menù Catalog, si prosegue generando, all'interno del file appena realizzato, un catalogo raster tramite il comando "Nuovo – Catalogo raster", inserendo come input il file di geodatabase, appena creato.

A questo punto bisogna inserire, come input, i raster per collocarli all'interno del catalogo, tramite il comando "Carica Dataset raster" sul catalogo appena prodotto.

Si è ottenuto, così, un file contenente al suo interno le due ortofoto e i due DEM relativi alle due campagne, in tale file, tramite la "tabella attributi" (figura 112), è possibile conferire dati agli elementi presenti al suo interno. Si inserisce così il dato temporale, relativo alla campagna del 12/6/2018 e del 12/3/2019.

Tab	ella						
0	• 日 • 日	S 🛛 🍕	×				
Ana	alisi_temporale						
	OBJECTID *	Shape *	Raster	Name	Shape Length	Shape Area	Data
•	1	Poligono	<raster></raster>	Inv_ort_18.tif	1176,319	85857,651836	12/06/2018
	2	Poligono	<raster></raster>	dem_18_	1176,411	85872,859237	12/06/2018
	3	Poligono	<raster></raster>	Inv_ort_19.tif	1176,335	85859,799432	12/03/2019
_	4	Policono	<raster></raster>	dem 12 03 19	1176.2558	85848 099087	12/03/2019

Figura 112 - Tabella attributi geodatabase con riferimento temporale

E', allora, possibile attivare la funzione "tempo" dalle proprietà del file appena ottenuto, indicando il campo "data" come riferimento (figura 1113). Tale funzione permette, quindi, di dare un riferimento temporale ai modelli ottenuti dai rilievi effettuati e ne permette la visualizzazione temporale facendo riferimento alla data in cui sono stati acquisiti.

Generale Ungine	e Vi	sualizza	Correzione colore	Simbologia	Selezione	Cam
Interrogazione di dei	finizione		Etichette	Join & Relat	e	Ora
Abilita ora su questo lay	yer					
Proprietà ora						
Ora layer:	Ogni <mark>f</mark> eat	ure dispone	di un solo campo dell'ora	• ×		
Campo Ora:	Data		~	Campione: 12/06/20	18	
	Il campo se	elezionato n	on è indicizzato. Per mig	iorare le prestazioni, indi	cizzare i campi.	
Formato campo:	<data or<="" td=""><td>a></td><td>~</td><td></td><td></td><td></td></data>	a>	~			
Intervallo di distribuzione tempo:	14,00	Gior	ni v			
Estensione temporale layer:			A:		Calcola	
🗹 I dati cambiano fre	equentement	e, pertanto	calcola l'estensione tem	porale automaticamente.		
Impostazioni avanzate						
Fuso orario:	nessuno					~
	🗌 I valori	vengono m	odificati in base all'ora le	gale		
Offset ora:	0,00	Ann	· ~			
Visualizza dati comp	olessivi					

Figura 113 - Proprietà tempo

Per ottenere la visualizzazione nel tempo dei marker, posizionati durante i rilievi, è necessario inserire il campo con le informazioni temporali nella tabella attributi dei marker stessi (figura 114) e attivarne la funzione tempo, come per i modelli sopra.

Tab	ella						
0	- E	a - ∎	N 10 da >	¢			
Co	ordina	te_marke	ers_12_06_2018				
	FID	Nome	Est	Nord	Altezza	Tempo	
+	0	1000	339902,507	5000613,529	1038,582	12/06/2018	
	1	3000	339976,861	5000559,956	1034,585	12/06/2018	
	2	TS	339917,36439	5000565,25198	1034,59939	12/06/2018	
	3	INV1	339929,57986	5000515,18908	1015,94185	12/06/2018	
	4	INV2	339947,80274	5000417,89519	1013,56367	12/06/2018	
	5	INV3	340005,44413	5000456,18428	1013,48912	12/06/2018	
	6	INV4	340129,54656	5000404.05836	1013.01531	12/06/2018	

Figura 114 - Tabella attributi marker (12/6/2018)

E', ora, possibile attivare la visualizzazione temporale.

Per fare ciò si attiva il comando "Cursore temporale", impostando le opzioni di visualizzazione desiderate:

- Data ed ora di inizio, 12/6/2018, 00:00:00;
- Data ed ora di fine, 12/4/2019, 00:00:00;
- Intervallo di tempo tra uno step e l'altro, un mese;
- Velocità di visualizzazione.

Attivando tale funzione di visualizzazione, compare una barra in cui sono riportate le date di inizio e fine sopraindicate, utilizzando il tasto "Play" si avvia e scorre secondo la velocità settata per un certo numero di step, scelti selezionando l'intervallo di tempo voluto, fino ad arrivare alla data di fine, visualizzando di volta in volta la data corrispondente allo step.

E' possibile esportare il video ottenuto, si riportano le immagini dei passaggi significativi, così come visualizzate nel video realizzato (figura 115, 116, 117, 118, 119, 120).



Figura 115 - Visualizzazione temporale: ortofoto 12/6/2018



Figura 116 - Visualizzazione temporale: ortofoto con marker 12/6/2018



Figura 117 - Visualizzazione temporale: DEM con marker 12/6/2018



Figura 118 - Visualizzazione temporale: ortofoto 12/3/2019



Figura 119 - Visualizzazione temporale: ortofoto con marker 12/3/2019



Figura 120 - Visualizzazione temporale: DEM con marker 12/3/2019

Come detto in precedenza, il modello temporale così creato potrà essere implementato nel futuro, in seguito alla disponibilità di nuove osservazioni che saranno effettuate.

Conclusioni

Capitolo 7

Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi si sono adoperate le più moderne tecniche della geomatica, al fine di ottenere informazioni utili all'analisi temporale del volume di residuo che si sedimenta all'interno dell'invaso sito in Val Clarea, utilizzato per alimentare l'impianto idroelettrico di Pont Ventoux-Susa.

Tale invaso, oggetto dello studio, è stato, in una prima fase, geolocalizzato attraverso una rete topografica che ha visto l'utilizzo di misure GPS/GNSS e misure con stazione totale.

Si è passati, quindi, ad una fase di rilievo aereo fotogrammetrico al fine di realizzarne modelli tridimensionali.

E, in ultima fase, si è effettuato un rilievo con laser scanner terrestre per avere un modello con cui comparare i modelli ottenuti nella fase precedente.

Attraverso il procedimento di confronto è stato possibile verificare l'attendibilità dei modelli, con riscontri molto soddisfacenti.

Accostando i dati ottenuti dal rilievo fotogrammetrico e con laser scanner con quelli del rilievo topografico, si sono realizzati, quindi, modelli tridimensionali georeferenziati dell'invaso in due epoche diverse, con precisione di circa 4 cm, adatta ad una scala di rappresentazione

di1:200. A tal proposito si è riscontrato un esito positivo rispetto agli obiettivi prefissati in partenza.

L'utilizzo della modellazione tridimensionale, effettuata dai dati aereo fotogrammetrici, ha permesso di ottenere modelli, oltre che accurati, anche completi. Inoltre, tra gli aspetti positivi, si è riscontrata la possibilità, da parte dell'utente, di elaborare i dati in modo più confortevole e sicuro rispetto alle precedenti tecniche di rilievo in situ. Presenta, però, delle note negative riguardanti i lunghi tempi, mediamente di circa 100 ore, tra le operazioni svolte dall'utente e le elaborazioni del software, la maggior parte dovute all'elaborazione delle nuvole di punti dense. Un altro elemento negativo è la necessità di avere a disposizione computer di una certa potenza, senza i quali la fase di elaborazione potrebbe risultare non effettuabile.

Si è ottenuto un buon riscontro dalla modellazione dei dati ottenuti dal rilievo con laser scanner terrestre, effettuata con il software Riscan Pro, anche se il modello risulta essere incompleto, per la presenza di zone in cui non è possibile avere a disposizione dati; tali zone sono dovute alla presenza di elementi che influiscono con il funzionamento dello strumento, quali presenza di superfici riflettenti. Si è realizzata, comunque, una sovrapposizione perfetta con il modello precedente. Tra le note negative si sottolinea la difficoltà nell'identificare i marker individuati nel rilievo topografico, ciò ha comportato un notevole dispendio di tempo dovendo ricercare elementi che fossero particolari e, quindi, facilmente individuabili.

Da tali informazioni è stato possibile avviare delle procedure di analisi con lo scopo di monitorare la quantità di materiale residuo che si deposita, con un buon riscontro dei risultati.

In particolare, l'analisi multi-temporale, effettuata con il software Gis, ha permesso di ottenere una stima ottimale del materiale residuo, verificata attraverso l'utilizzo di diverse metodologie applicate. Inoltre, introducendo le informazioni temporali, è stato possibile creare un modello che, attraverso l'implementazione di osservazioni future, possa monitorare l'evoluzione del residuo e ottenere, così, informazioni utili per l'avvenire. Ciò potrebbe concretizzarsi effettuando analisi sulla frequenza con cui il materiale si accumula, non realizzata in questa tesi per la carenza di osservazioni disponibili, dando la possibilità di operare preventivamente con interventi programmati di manutenzione o con opere idrauliche che ne ridurrebbero la sedimentazione.

Si può, quindi, sostenere che le tecniche utilizzate sono di gran lunga migliori rispetto ai metodi classici di rilievo, non solo in quanto economici e con tempistiche minori ma, anche, per il raggiungimento di maggiore precisione ed accuratezza.

Bibliografia

- [1] Manzino A., "Lezioni di topografia parte I Geodesia", Dipartimeno di Georisorse e Territorio, Politecnico di Torino, Otto editore, 2000
- [2] Cina A., "Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System). Per la geomatica", Torino, Celid, 2014
- [3] Istruzioni operative per l'uso di STARNET
- [4] Tutoria Metashape (En)

Sitografia

Inquadramento geografico

- [5] <u>http://www.cittametropolitana.torino.it/cartoview/</u> (Ultima consultazione 06/09/2019)
- [6] <u>https://it.wikipedia.org/wiki/Bacino_(idraulica)</u> (Ultima consultazione 06/09/2019)
- [7] <u>https://www.google.com/maps/place/Val+Clarea/@45.1408105,6.9644644,16830m/dat</u> <u>a=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x4789b973c710b28f:0xc8e088cae20be3ec!8m2!3d45.14768</u> <u>85!4d6.956739?hl=it-IT (</u>Ultima consultazione 06/09/2019)
- [8] <u>https://webthesis.biblio.polito.it/11125/1/tesi.pdf</u> (Ultima consultazione 30/09/2019)

Integrazione tra tecniche

- [9] <u>https://it.wikipedia.org/wiki/Geodesia</u> (Ultima consultazione 06/09/2019)
- [10] <u>https://it.wikipedia.org/wiki/Geoide</u> (Ultima consultazione 07/09/2019)
- [11] <u>https://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli_Cannarozzo_Datum_Geodetici.pdf</u> (Ultima consultazione 07/09/2019)
- [12] <u>https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_di_coordinate</u> (Ultima consultazione 07/09/2019)
- [13] <u>https://it.wikipedia.org/wiki/Datum_geodetico</u> (Ultima consultazione 08/09/2019)
- [14] <u>http://labtopo.ing.unipg.it/files_sito/compiti/georef.pdf</u> (Ultima consultazione 08/09/2019)
- [15] <u>https://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli_Cannarozzo_Principi_e_strumenti_fotogrammetria.pdf</u> (Ultima consultazione 08/09/2019)
- [16] <u>https://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli_Cannarozzo_La%20presa_dei_fotogrammi.pdf</u> (Ultima consultazione 10/09/2019)
- [17] <u>https://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli_Cannarozzo_Orientamento_e_restituzione.pdf</u> (Ultima consultazione 25/09/2019)
- [18] <u>https://it.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion</u> (Ultima consultazione 04/10/2019)

Sitografia

- [19] <u>https://mediageo.it/ojs/index.php/archeomatica/article/viewFile/893/999</u> (Ultima consultazione 04/10/2019)
- [20] <u>http://exporttocanoma.blogspot.com/2012/11/sfm-structure-from-motion-prima-parte.html</u> (Ultima consultazione 04/10/2019)
- [21] <u>https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/droni-sapr/201568-applicazioni/fotogrammetria.aspx</u> (Ultima consultazione 04/10/2019)
- [22] <u>https://3dmetrica.it/strumenti-di-rilievo-topografico/</u> (Ultima consultazione 09/09/2019)
- [23] <u>https://it.wikipedia.org/wiki/Teodolite</u> (Ultima consultazione 10/09/2019)
- [24] <u>https://www.studiogesi.it/come-funziona-la-stazione-totale/</u> (Ultima consultazione 10/09/2019)
- [25] <u>https://3dmetrica.it/target-artificiali-rilievo-aerofotogrammetrico/</u> (Ultima consultazione 10/09/2019)
- [26] <u>http://www.surveysoft.it/Starnet.html</u> (Ultima consultazione 12/09/2019)
- [27] https://www.dji.com/it/phantom-4-pro/info#specs (Ultima consultazione 12/09/2019)
- [28] <u>https://3dmetrica.it/target-artificiali-rilievo-aerofotogrammetrico/</u> (Ultima consultazione 14/09/2019)
- [29] <u>https://www.enac.gov.it/repository/ContentManagement/information/N122671512/Reg</u> olamento APR ed.1.pdf (Ultima consultazione 26/09/2019)
- [30] <u>https://webthesis.biblio.polito.it/11284/1/tesi.pdf</u> (Ultima consultazione 22/09/2019)
- [31] <u>https://www.webnews.it/speciale/droni/</u> (Ultima consultazione 28/09/2019)
- [32] <u>http://www.atic-tc.org/Approfondimenti/La%20tecnologia%20dei%20droni.pdf</u> (Ultima consultazione 28/09/2019)
- [33] <u>https://www.fotografareindigitale.com/ccd-vs-cmos-sensori-a-confronto/950</u> (Ultima consultazione 28/09/2019)
- [34] <u>https://www.fotografareindigitale.com/il-sensore-fotografico/939</u> (Ultima consultazione 28/09/2019)
- [35] <u>https://it.wikipedia.org/wiki/Lidar</u> (Ultima consultazione 15/09/2019)
- [36] <u>https://www.gaetanoesposito.org/wp-</u> content/uploads/2015/04/Cos%e2%80%99%c3%a8-un-LASER-SCANNINGimmagini-Power-Point.pdf (Ultima consultazione 16/09/2019)
- [37] <u>https://www.microgeo.it/it/laser-scanner-full3d-multipletargets/laser-scanner-riegl-vz400i.aspx</u> (Ultima consultazione 16/09/2019)
- [38] <u>https://it.wikipedia.org/wiki/Catarifrangente</u> (Ultima consultazione 16/09/2019)

Analisi e confronti

- [39] <u>https://it.wikipedia.org/wiki/Geographic_information_system</u> (Ultima consultazione 26/09/2019)
- [40] <u>https://en.wikipedia.org/wiki/ArcMap</u> (Ultima consultazione 18/09/2019)
- [41] <u>http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/geodatabases/what-is-a-geodatabase.htm</u> (Ultima consultazione 18/09/2019)
- [42] <u>http://www.centrointerregionale-</u> <u>gis.it/ortoimmagini/cisis_ortofoto_dtm_grande%20scala_finale_2.pdf</u> (Ultima consultazione 05/10/2019)

Ringraziamenti

Voglio ringraziare tutti i membri del DIATI per la disponibilità e l'assistenza ricevuta in questi mesi, in modo particolare Paolo Maschio, Nives Grasso e Stefano Angeli. Un ringraziamento anche a tutti i tesisti e tirocinanti conosciuti in questo periodo nel laboratorio di Geomatica.

Un ringraziamento a tutti i miei amici, quelli di una vita e quelli conosciuti a Torino. In particolare, voglio ringraziare Luigi, Domenico e Cristina che in questi anni mi sono stati sempre vicini, sopportandomi.

Il ringraziamento più grande va alla mia famiglia: a Michele e Caterina, i pilastri portanti della mia vita, e a Carlo, il mio "fratellone". Siete il mio punto di riferimento, mi avete sempre sostenuto con qualunque mezzo, soprattutto nei momenti difficili, incentivandomi a non arrendermi mai. Senza di voi non sarei mai arrivato alla fine di questo lungo e difficile percorso. Questa tesi la dedico a voi, la mia famiglia.

Allegato: Report 3DReshaper

Report Confronti

Report done by



Technodigit



Paul Customer

08/07/2019

Reference: Nuvola da drone (12/03/2019) Measure: Nuvola da laser (12/03/2019)



Reference: Mesh da drone (12/3/19) Measure: Nuvala da laser (12/3/19)



Reference: Nuvola da drone (12/03/2019) Measure: Nuvola da drone (12/06/2018)





