Politecnico di Torino

Corso di Laurea in INGEGNERIA CIVILE
A.A. 2021/2022
Sessione di Laurea di Marzo/Aprile

Rilievo di centri Urbani

Fotogrammetria digitale Multi-Sensore

Relatore:

Prof. ALBERTO CINA

Candidati:

Giuseppe Tommaso Ria
257623

2022

Ai miei Genitori e

A mia Sorella

Ringraziamenti

Siamo, o meglio, sono giunto al termine del percorso di studi, finalmente. A questo punto sono doverosi, ma soprattutto voluti, i ringraziamenti a chi ha partecipato, in un modo o nell'altro, a questo "viaggio".

In primo luogo devo e voglio ringraziare i miei genitori, senza il loro supporto morale (ed economico) non sarebbe stato possibile giungere al termine. Il ringraziamento va fatto soprattutto perché mi hanno permesso di dover pensare "solo" allo studio e di non dover pensare ad altro. Devo anche dire grazie per i vari: "bravo, ora il prossimo quando è?" dopo ogni esame; "datti da fare che c'è tanto da fare" davanti alle mie numerose lamentele; "quando hai detto che era il prossimo esame?"; "Come si chiamava l'esame?"; "Hai saputo niente sull'esame?"; "Mena! Mena! Mena!", tipica affermazione dialettale che va bene in ogni dove. Tutte frasi e domande apprezzate in un secondo momento, ma che lì per lì hanno fatto un po' storcere il naso. Ringrazio anche mia sorella, poiché alcune dinamiche le si possono capire solo tra fratelli… e ci siamo capiti! La ringrazio per le risate che, anche in prossimità di esami, ci siamo fatti anche solo con uno sguardo. Per non avermi mai vietato l'accesso alla sua camera nonostante io abbia fatto di tutto per meritarlo. Quando poi c'è stato bisogno, lei è stata sempre lì a disposizione.

Ringrazio il Professor Alberto Cina per l'estrema disponibilità, comprensione e reperibilità in qualsiasi momento e per qualsiasi argomento.

Ringrazio Erica, la mia ragazza, per avermi supportato e soprattutto sopportato. La ringrazio per avermi compreso quando "oggi non esco, devo studiare", "vado via prima, domani ho la sveglia presto perché… devo studiare", "settimana prossima ho un esame, ci vediamo più tardi perché… devo studiare". Insomma il "devo studiare" è stato il terzo incomodo per un po' di tempo e lei non me lo ha mai fatto pesare, chissà però cosa avrà pensato.

Ringrazio Matteo, amico e coinquilino impeccabile, con il quale ho condiviso il bello e cattivo tempo universitario e non solo. Lo ringrazio per la delicata freddezza con cui ha esposto le sue opinioni su ciò che accadeva e sulle confidenze gli facevo. Lo ringrazio per aver capito quando avevo bisogno di riservatezza e quando invece era necessaria una battuta per smorzare le pressioni. Insomma condividere l'appartamento con qualcuno non è mai facile, ma con lui è andato tutto bene e di incomprensioni non ne abbiamo mai avute.

Ringrazio Francesco perché c'è stato e ha voluto esserci in tutti i momenti, sia da lontano che da vicino. Con il suo noto "Meh, a ci stamu?" ha sia contribuito ad incitarmi che ad aumentare in maniera sana le pressioni, se per un attimo avessi abbassato la guardia.

Ringrazio Michele, Giulio, Alessio e Matteo per essermi stati vicini (anche a loro insaputa) in un momento delicato per me. Per la leggerezza e le risate interminabili di quei sabato sera dei quali era certo l'inizio ma non la fine. Per le interminabili giornate in aula studio dove ci si lamentava sempre di qualcosa e quando, quelle poche volte, l'Università non ci dava motivo di lamento, c'era sempre e comunque la mensa che si prestava bene a lagne.

Ringrazio anche Samuel, Matteo e Angelo, amici acquisiti ed ormai ben consolidati, che tra calcetto e Fantacalcio hanno alleggerito le tensioni dei vari periodi, anche se in alcuni casi me ne hanno aggiunta qualcuna, per gli stessi motivi.

Ringrazio gli amici del "Salone", sempre disponibili per serate spensierate, risate, gite e… mangiate.

Se posso, vorrei anche ringraziare me stesso, per avermi sopportato. Dico sempre che non è semplice stare con me, ed io, per ovvi motivi, ci sono stato.

Sommario

1 INTRODUZIONE 7

2 LA FOTOGRAMMETRIA 9

2.1 PRINCIPI DI FOTOGRAMMETRIA 9

2.2 FOTOGRAMMETRIA AEREA 11

2.2.1 Orientamento dei Fotogrammi 13

2.3 ORIENTAMENTO INTERNO: DISTORSIONE DELL'OBIETTIVO 16

2.4 EQUAZIONI GOVERNANTI IL PROBLEMA: EQUAZIONI DI COLLINEARITÀ 20

3 CASO STUDIO: IL RILIEVO 29

3.1 I DUE VOLI AEREI 29

3.2 RILIEVO DEI PUNTI D'APPOGGIO 34

3.2.1 Principi di posizionamento GNSS. 35

3.2.2 Organizzazione del rilievo 40

3.2.3 Il rilievo 41

3.2.4 Output del rilievo 43

4 FASE DI RESTITUZIONE: ANALISI DEI GROUND CONTROL POINTS PER LE IMMAGINI NADIRALI 47

4.1 ALLINEAMENTO E INSERIMENTO MARKER 47

4.2 COMPENSAZIONE DEL MODELLO: RISOLUZIONE DEL SISTEMA DI EQUAZIONI DI COLLINEARITÀ 54

4.3 ANALISI MODELLO NADIRALE AL VARIARE DEI GCP 56

4.3.1 La configurazione 0 59

4.3.2 La configurazione 1 60

4.3.3 La configurazione 2 62

4.3.4 La configurazione 3 63

4.3.5 La configurazione 4 64

4.3.6 La configurazione 5 66

4.3.7 La configurazione 6 67

4.3.8 La configurazione 7 68

4.4 CONCLUSIONI 69

5 FASE DI RESTITUZIONE: ANALISI SUI RICOPRIMENTI DEI FOTOGRAMMI PER LE IMMAGINI NADIRALI 73

5.1 CALCOLO DEL RICOPRIMENTO LONGITUDINALE (RL) 74

5.2 CALCOLO DEL RICOPRIMENTO TRASVERSALE (RT) 79

5.2.1 Ricoprimento trasversale: una strisciata ogni due (RT 62%) 83

5.2.2 Ricoprimento trasversale: una strisciata ogni tre (RT 44%) 83

5.2.3 Ricoprimento trasversale: una strisciata ogni quattro (RT 25%) 84

5.3 ANALISI DEL MODELLO AL VARIARE DEL RT. 85

5.3.1 RT = 62% 85

5.3.2 RT = 44% 87

5.3.3 RT = 25% 89

5.4 CONCLUSIONI 90

6 RESTITUZIONE IMMAGINI INCLINATE **97**

7 CALIBRAZIONE DELLA CAMERA **101**
7.1 METODO DELLE COMPONENTI PRINCIPALI: RICHIAMI TEORICI 102
7.2 STIMA DEI PARAMETRI DI CALIBRAZIONE 106
7.2.1 Modello Nadirale a 8 parametri 108
7.2.2 Modello Inclinate a 8 parametri 110
7.2.3 Modello Misto a 8 parametri 111
7.3 ANALISI DELLE COMPONENTI PRINCIPALI SUI PARAMETRI DI CALIBRAZIONE 116
7.3.1 Modello nadirale a 11 parametri 118
7.3.2 Modello Inclinate a 11 parametri 121
7.3.3 Modello Misto a 11 parametri 122
7.4 CONCLUSIONI 125

8 PRODOTTI FINALI **126**
8.1 ORTOFOTO 126
8.2 MODELLO DIGITALE DEL TERRENO (DTM) 128
8.3 MODELLO 3D 129
8.4 IMMAGINI TERMICHE 131

9 CONCLUSIONI **133**

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI **136**

INDICE DELLE FIGURE **137**

INDICE DELLE TABELLE **140**

ALLEGATO A: MONOGRAFIE PUNTI DI APPOGGIO **142**

1 Introduzione

Sin dai tempi più antichi, l'uomo ha cercato, attraverso diversi metodi e impiegando svariati strumenti, di calcolare le distanze, eseguire calcoli matematici complessi per rilevare misure e colmare distanze apparentemente insormontabili. Grazie all'evoluzione della tecnologia e alla nascita di nuovi e sempre migliori sistemi di misurazione, oggi siamo arrivati al punto di poter eseguire dei rilievi che prima sarebbero stati considerati semplicemente impossibili. Pensiamo infatti a dover effettuare il rilievo di un centro urbano con una stazione totale o per mezzo di ricevitore GNSS. Il numero di punti da rilevare per ottenere un buon risultato è estremamente elevato e commettere errori è molto facile. Il rilievo di un grande numero di punti è tuttavia semplificato se la tecnica di acquisizione dei dati è quella fotogrammetrica.

Con il rilievo Fotogrammetrico riusciamo ad ottenere **nuvole di punti** molto dense (si parla di migliaia o anche di milioni di punti) a partire dall'acquisizione di immagini. La Fotogrammetria infatti è una particolare tecnica di rilievo che consente di acquisire dati metrici (forma e posizione) di uno specifico oggetto o di una specifica area. I dati sono recuperati e analizzati a partire da punti presenti in almeno due fotogrammi. Questa tecnica è usata soprattutto in **Cartografia**, **Topografia** e **Fotogrammetria Architettonica** (o terrestre).

In questo lavoro di tesi ci proponiamo di analizzare in maniera approfondita il rilievo Fotogrammetrico di un centro urbano, Livorno Ferraris. Il rilievo, descritto con maggiori dettagli nel capitolo 3, è stato effettuato per mezzo di due voli Fotogrammetrici, nei quali è stata montata una camera, con due diverse inclinazioni su un velivolo pesante. Dai voli fotogrammetrici abbiamo ottenuto un certo numero di immagini che possono essere suddivise in funzione dell'inclinazione della camera di presa: Nadirali ed inclinate, ottenute dalla stessa camera ma con inclinazione dell'asse ottico diversa, termiche, ottenute con un'altra camera.

Attraverso le immagini sono state create diverse nuvole di punti (Point Cloud) che altro non sono che un insieme di punti identificati attraverso la propria posizione in un sistema di coordinate (xyz) situato in un ambiente digitale. Le nuvole di punti necessitano poi di punti di appoggio espressi nel sistema di riferimento relativo, ottenuti tramite il rilievo di un certo numero di punti a terra. Infatti ai voli Fotogrammetrici è stato affiancato un rilievo geodetico e cartografico di punti a terra (al quale ho partecipato anch'io) con tecnica RTK che approfondiremo nel capitolo 3.

Possiamo suddividere il rilievo fotogrammetrico effettuato in due fasi: una prima fase sul campo e una seconda in ufficio. La prima fase è quella dove "ci si sporca le mani" e nello specifico consiste nei voli fotogrammetrici e nel rilievo dei punti a terra, mentre la seconda fase è quella della restituzione durante la quale, tramite l'utilizzo di software, si cerca di ottenere i prodotti finali. Tra i risultati che si possono ottenere abbiamo la creazione di un'ortofoto che altro non è che un'immagine dell'oggetto geometricamente corretta e georeferenziata, sulla quale possono essere misurate distanze e calcolate superfici. Un altro prodotto ottenibile da un rilievo fotogrammetrico è quello di ricavare un modello tridimensionale del terreno, navigabile. Questi due prodotti possono risultare molto utili in ambito urbanistico per il comune o anche per la Regione, sia in fase di progettazione di opere ma anche per la verifica di eventuali abusivismi (di un edificio possiamo identificare il numero dei piani o la presenza di coperture attraverso il modello tridimensionale). Possiamo anche ottenere un modello digitale del terreno (DEM) del sito rilevato che mostra l'andamento altimetrico e, attraverso la camera termica possiamo ottenere un'immagine complessiva che quantifichi la temperatura delle superfici visibili.

Avendo a disposizione un elevato numero di fotogrammi ed un elevato numero di punti a terra rilevati, l'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di studiare cosa succede allo stesso rilievo se utilizzassimo un numero inferiore di fotogrammi, un numero inferiore di punti a terra o avere un numero inferiori di entrambe le cose. Il fine di ottimizzare la soluzione può anche essere quello di far risparmiare, ad un futuro operatore, qualora dovesse incappare a leggere questo elaborato, tempo nelle fasi di rilievo e nella fase di progettazione del volo. Nell'elaborato vedremo anche dei consigli sulla scelta dei punti a terra in funzione delle difficoltà affrontate. In altre parole si cercherà di ottimizzare le operazioni svolte.

Un breve accenno alla struttura del presente elaborato di tesi. Nel capitolo 2 tratteremo i principi cardine su cui si basa la Fotogrammetria, nel quale ad una prima parte concettuale vedremo affiancata una seconda parte più analitica. Nel capitolo 3 invece verrà descritto il rilievo effettuato nella sua interezza, descrivendo brevemente gli strumenti utilizzati e focalizzandoci principalmente sul rilievo dei punti a terra. Il punto centrale della tesi lo troviamo nei capitoli 4 e 5, dove vedremo l'analisi sulla variazione della precisione del modello facendo diminuire il numero dei punti a terra (cap. 4) ed il numero dei fotogrammi (cap.5). Infine si affronterà il quesito della stima dei parametri di calibrazione della camera.

2 La Fotogrammetria

La fotogrammetria è l'arte e la scienza atta alla determinazione di posizione e forma di oggetti a partire da immagini fotografiche. Partendo da diverse immagini dello stesso oggetto, ripreso da punti differenti, è possibile ricavare la sua posizione e la sua forma, processo che prende il nome di **restituzione**.

Nata per il rilievo architettonico (**Fotogrammetria terrestre**), la Fotogrammetria trova al giorno d'oggi largo impiego nel rilievo Topografico del territorio, montando camere su velivoli: **Fotogrammetria aerea**. Le due tipologie differiscono per la distanza di presa. La Fotogrammetria Aerea prevede distanze tra l'oggetto e la camera comprese tra i 60-100 metri (rilievi con droni) fino ad arrivare a distanza di circa 20.000 metri. La Fotogrammetria Terrestre, invece, si sviluppa su distanze dell'ordine di qualche decina di metri.

Attualmente la Fotogrammetria rappresenta una delle tecniche di acquisizione di dati del territorio tra le più affidabili, economiche e precise grazie anche allo sviluppo di calcolatori e grafiche computerizzate in grado di gestire ingenti quantitativi di dati.

2.1 Principi di Fotogrammetria

Quando si scatta una fotografia quello che succede è che, attraverso un sistema ottico, viene registrata permanentemente l'interazione tra luce e materia su una superficie fotosensibile, il sensore. Il sensore della camera, venendo a contatto con la luce, cattura l'immagine.

Per poter definire forma e posizione degli oggetti presenti nell'ambiente reale, ripresi dalle camere fotografiche, è necessario definire le relazioni geometriche fra le posizioni tridimensionali dei punti dell'oggetto e quelle delle loro immagini sul piano della fotografia.

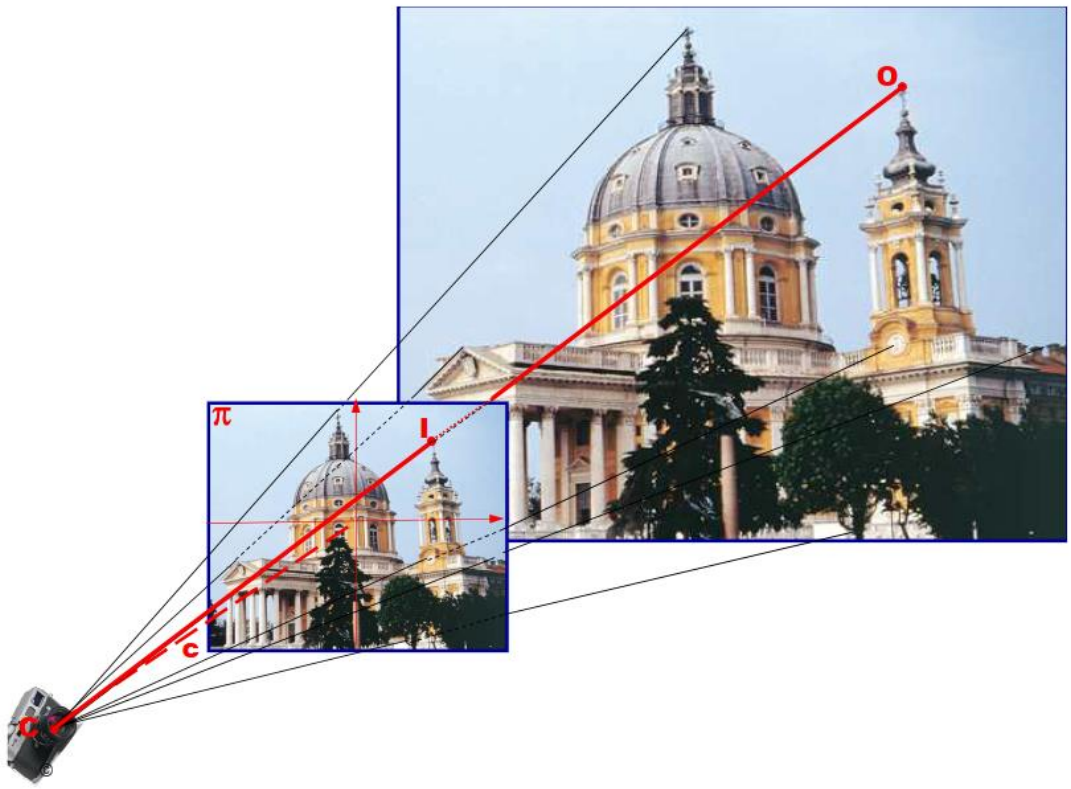


Figura 1: Allineamento dei punti

Definiamo **π** il piano dell'immagine, **c** (distanza principale) la distanza tra il piano dell'immagine ed il centro di presa della camera **C**, che è un punto teorico. Questa distanza è fissa ed è caratteristica della camera da presa. A questo, preso un punto O sull'oggetto presente nell'ambiente reale, può essere definito il suo punto omologo **I** nel piano dell'immagine **π**. Di conseguenza i punti O, I, C risultano allineati e la linea congiungente prende il nome di **raggio proiettivo**.

La proiezione sul piano dell'immagine non fa variare la geometria dell'oggetto, per cui tutti gli infiniti punti reali formano delle direzioni che passando per il piano π convergono nel punto C. In questo modo un oggetto 3D viene rappresentato in due dimensioni sul piano dell'immagine.

A questo punto, conoscendo la posizione del centro di presa, la distanza principale e ponendo un sistema di riferimento sul piano immagine è possibile ottenere delle misure direttamente su π. Infatti introducendo delle coordinate ξ ed η nel piano immagine, è possibile avere le coordinate di I relative al piano π. Tuttavia questo non è sufficiente per ricavare la posizione dell'oggetto nell'ambiente reale, in quanto tridimensionale. Per risolvere ciò è necessario introdurre

un secondo fotogramma, preso da posizione differente e che inquadri lo stesso oggetto, come nella figura successiva.

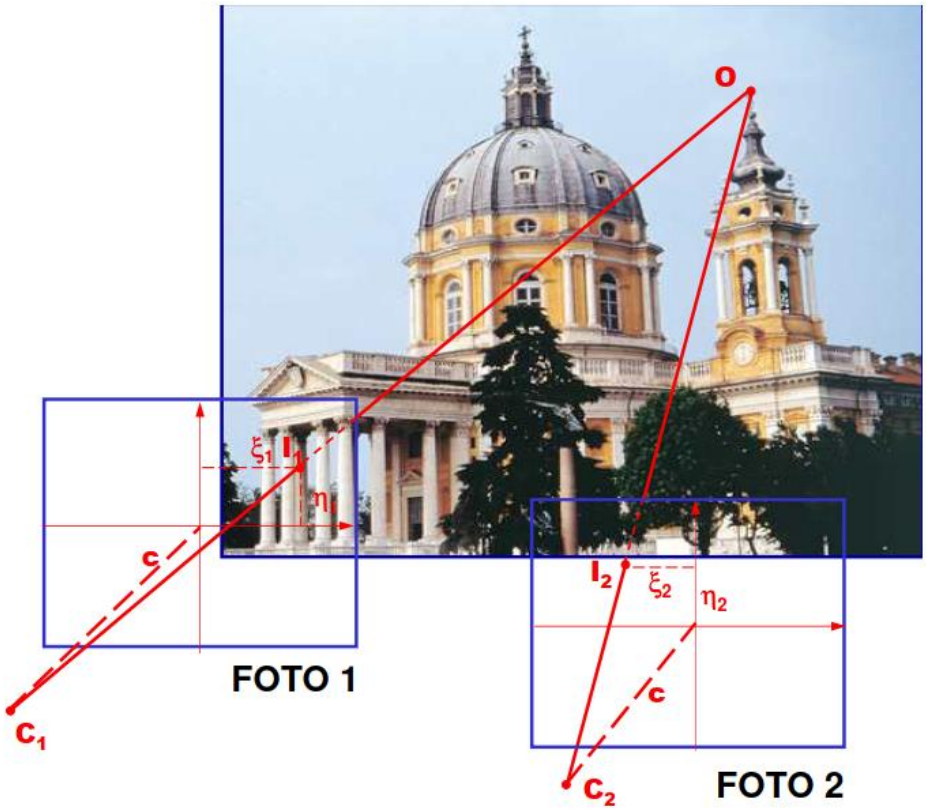


Figura 2: Necessità di un secondo fotogramma

In questo modo vengono misurate delle seconde coordinate ξ ed η, relative al secondo fotogramma, l'intersezione delle due proiezioni allora stabilisce univocamente la posizione del punto O. Quello visto in precedenza è un esempio di **Fotogrammetria Terrestre**.

2.2 Fotogrammetria Aerea

Come abbiamo accennato in precedenza, la Fotogrammetria può essere aerea, ovvero possono essere utilizzati dei velivoli, aerei o droni, sui quali vengono montate le camere di presa. Il principio di funzionamento è lo stesso ed anche in questo caso sono necessari almeno due fotogrammi che inquadrino lo stesso punto per poter definire la sua posizione e la sua forma.

Si consideri la figura sottostante[1]. Si può facilmente intuire come il punto omologo A' di A possa essere il punto omologo dei vari A_1, A_2, A_3 presenti sull'allineamento A'-O_1-A.

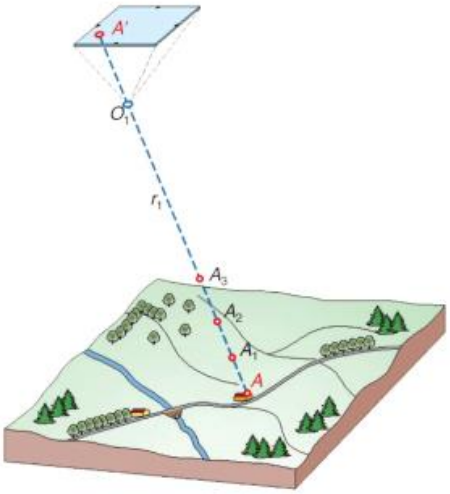


Figura 3: Problema fotogramma singolo

Nel secondo fotogramma si avrà un secondo punto omologo di A, A", tramite il quale, conoscendo la distanza tra i centri di presa (definita **base di presa**) delle due camere è possibile risalire, in maniera univoca alla posizione di A.

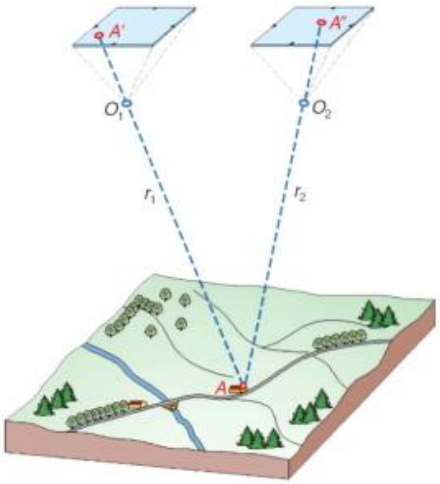


Figura 4: Univocità della posizione di A

[1] Si noti come il sensore sia posto dietro al centro di presa O_1 rispetto al terreno. Le relazioni di collinearità sono ugualmente valide e questa disposizione del sensore prende il nome di Negativo.

Durante un volo fotogrammetrico, dunque, è fondamentale una buona progettazione del volo in quanto tutti i punti devono essere presenti in almeno due fotogrammi per poter risalire alla loro posizione. Il criterio di progettazione di un volo è, dunque, la sovrapposizione dei fotogrammi il che si traduce, durante il moto del velivolo, nello stabilire degli intervalli temporali di scatto delle immagini.

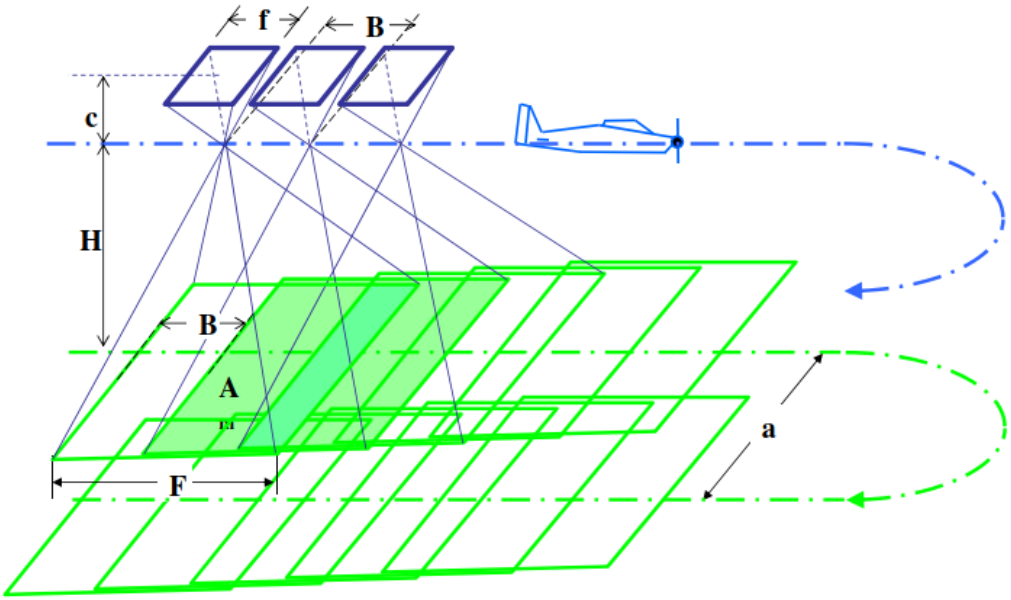


Figura 5: Ricoprimenti longitudinali e trasversali nel volo Fotogrammetrico

Si può affermare di essere in presenza di una buona progettazione quando il ricoprimento longitudinale (tra due fotogrammi successivi) corrisponde almeno il 60% ed il 20% per il ricoprimento trasversale. È buona norma avere anche un margine di ricoprimento tra il fotogramma i-esimo ed il fotogramma i+2-esimo.

2.2.1 Orientamento dei Fotogrammi

Oltre allo scatto dei fotogrammi, sul campo, è necessario rilevare alcuni punti di appoggio a terra, punti dei quali serve conoscere le coordinate per poter poi risalire alle posizioni dei centri di presa delle camere e assetti angolari. Questo processo prende il nome di **triangolazione aerea**. Descriveremo il processo di triangolazione aerea una volta introdotte le equazioni di collinearità.

Una volta acquisite le immagini tramite i voli fotogrammetrici, si procede alla restituzione che avviene in ufficio. La prima fase della restituzione è quella dell'**orientamento** durante la quale si

orientano i fotogrammi in maniera tale da ricostruire le posizioni che questi avevano nel momento dell'acquisizione. L'orientamento si divide in orientamento interno ed esterno.

Con l'orientamento interno si vanno ad individuare quei parametri che permettono di restituire la proiezione centrale della camera ed è un'operazione svolta una sola volta in quanto funzione dal tipo di camera utilizzata. Si definisce la posizione del **centro di proiezione O** (che è il centro di presa) rispetto al sistema di riferimento fiduciale **FC** definito sul piano del fotogramma. Nelle immagini digitali il FC è posizionato nel pixel in alto a sinistra.

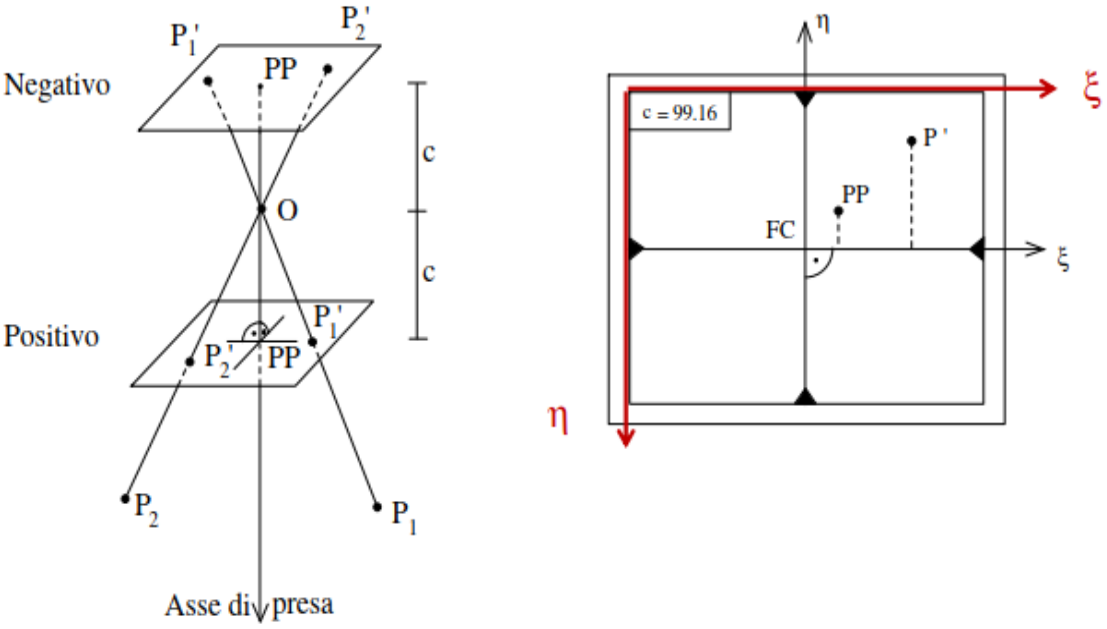


Figura 6: Parametri interni della camera

Con riferimento all'immagine soprastante, si definisce **distanza principale c** la distanza tra il centro di presa ed il piano oggetto. Questo parametro è oggetto di calibrazione e deve essere noto con estrema precisione, come vedremo più avanti nell'elaborato. Proiettando il centro di presa O (che è comunque un punto teorico) ortogonalmente sul piano dell'immagine otteniamo il **Punto principale PP**. Questo punto solitamente non è centrato nel sistema fiduciale (punto individuato dall'intersezione delle marche fiduciali poste a metà dei lati del fotogramma, nelle foto analogiche). PP avrà allora 3 coordinate: ξ_0 ed η_0 e c.

Con l'orientamento esterno possiamo ristabilire digitalmente l'assetto spaziale della camera (fotogramma più punto principale internamente orientati) rispetto ad un sistema di coordinate tridimensionale. Essenzialmente, con l'orientamento esterno definiamo la posizione spaziale di un corpo rigido, quale la camera, nello spazio. Si definiscono dunque 6 parametri 3 traslazioni X Y Z e tre rotazioni ω ϕ κ per ogni fotogramma.

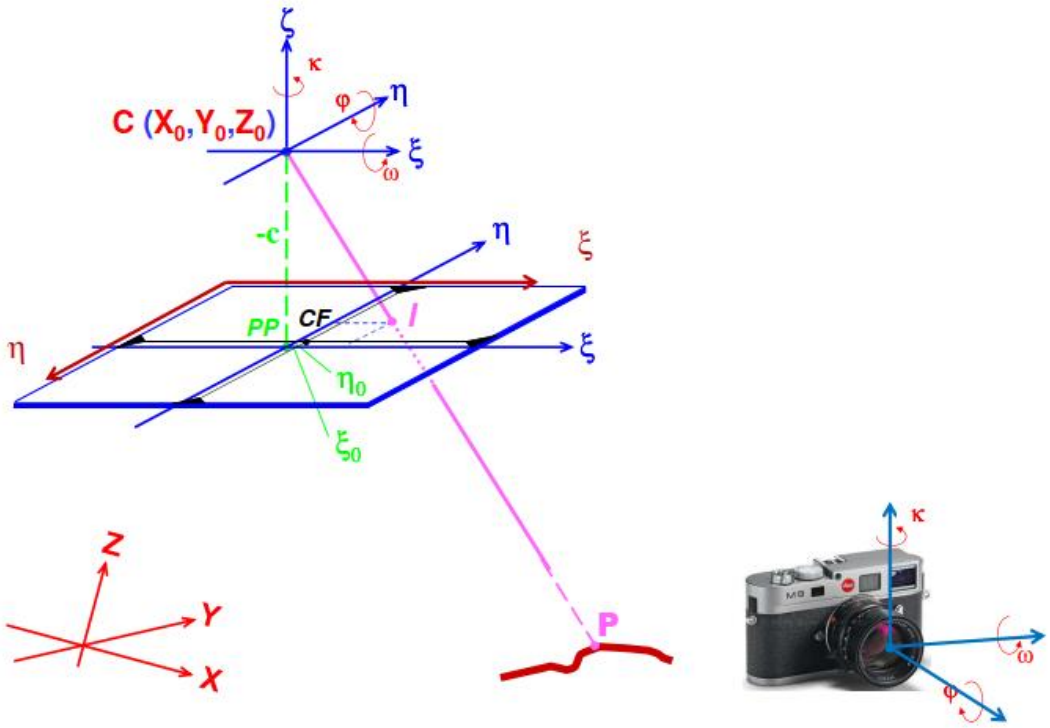


Figura 7: Parametri orientamento esterno

L'orientamento esterno, un tempo, era diviso in relativo ed assoluto. Lo scopo dell'orientamento relativo era quello di costruire il modello in modo tale che i fotogrammi vengano messi nella posizione di acquisizione, attraverso sotto-modelli formati da due fotogrammi. In altre parole con l'orientamento relativo vengono intersecati i vari raggi omologhi. Questo orientamento non necessità di punti noti a terra. Il modello ricavato dell'orientamento relativo viene roto-traslato e scalato ed i punti ottenuti sono riferiti ad un sistema di riferimento assoluto e questo orientamento è definito orientamento assoluto. Per questo orientamento è necessario conoscere punti a terra, rilevati sul campo con le classiche tecniche Topografiche. Tuttavia, grazie all'utilizzo dei software, oggi queste due fasi non sono più distinte ma vengono realizzate in blocco utilizzando la tecnica che prende il nome di triangolazione aerea, che vedremo più avanti.

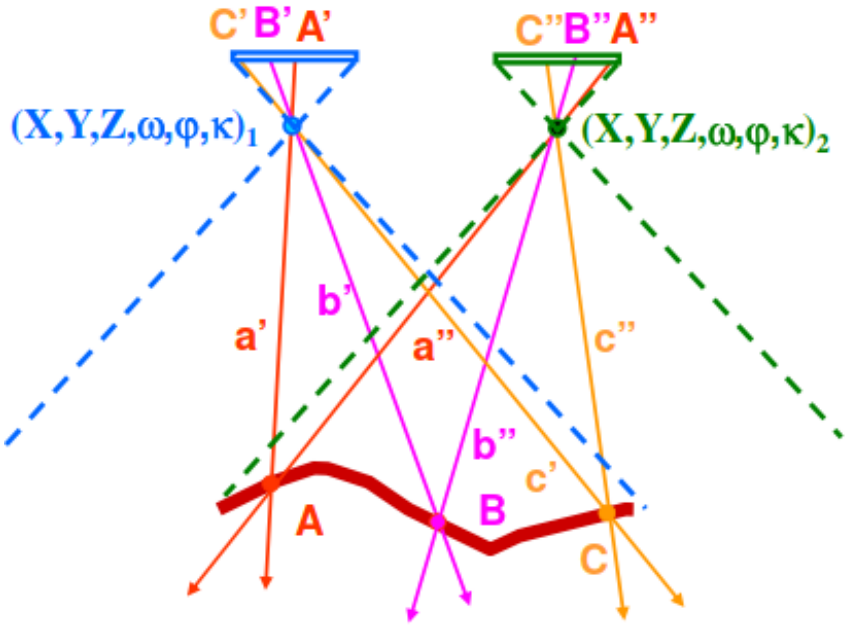


Figura 8: Orientamento Relativo, intersezione raggi omologhi

2.3 Orientamento interno: distorsione dell'obiettivo

In questo paragrafo analizzeremo la distorsione dell'obiettivo della camera con particolare riferimento alla curva caratteristica della distorsione radiale.

In precedenza abbiamo visto che nell'orientamento interno è presente la distanza principale e le coordinate del punto principale. A tal proposito è utile andare a studiare cosa succede, dal punto di vista ottico, al percorso di un punto immagine prima di imprimersi sul sensore della camera. Infatti il tragitto compiuto da un punto immagine è spezzato dallo spessore della lente che influisce anche sull'angolo di rifrazione.

Si può notare, nell'immagine che segue, come il punto oggetto incontri il punto esterno della lente sul **piano nodale esterno** nel punto N=O. Questo punto è trasmesso al punto N'=O' e si va poi ad imprimere sul sensore. Nel caso ideale, l'angolo di incidenza del raggio è uguale sia in ingresso che in uscita. Tuttavia nel caso reale, per l'imperfezione dell'ottica della lente, entra con un angolo di incidenza t ed esce con un angolo t' diverso da t, portando ad avere un punto immagine I' piuttosto che I, con coordinate ξ' η'.

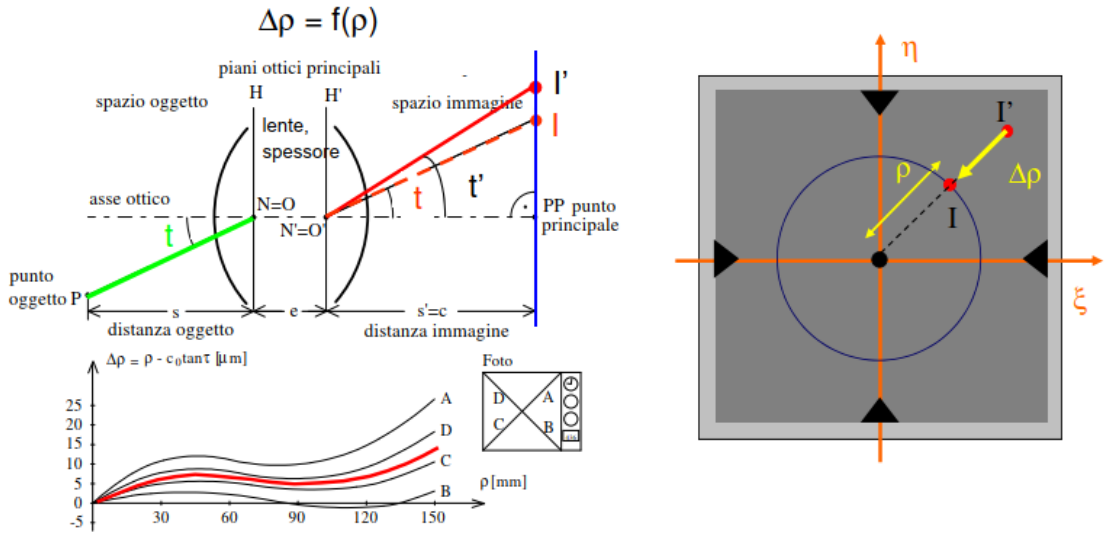


Figura 9: Distorsione dell'obiettivo

Le lenti componenti l'obiettivo sono a simmetria cilindrica molto raffinata per cui si può supporre che la distorsione sia quasi esclusivamente radiale.

Per risolvere il problema della distorsione è necessario conoscere le curve di distorsione che sono caratteristiche della camera. Ogni camera, infatti, deve avere il certificato di calibrazione il quale deve essere messo a disposizione all'utente da parte del costruttore. Il certificato si ottiene costruendo delle curve di distorsione come in figura e facendo la media delle varie soluzioni. Vediamo adesso due possibili tipologie di distorsione: a barilotto e a cuscinetto.

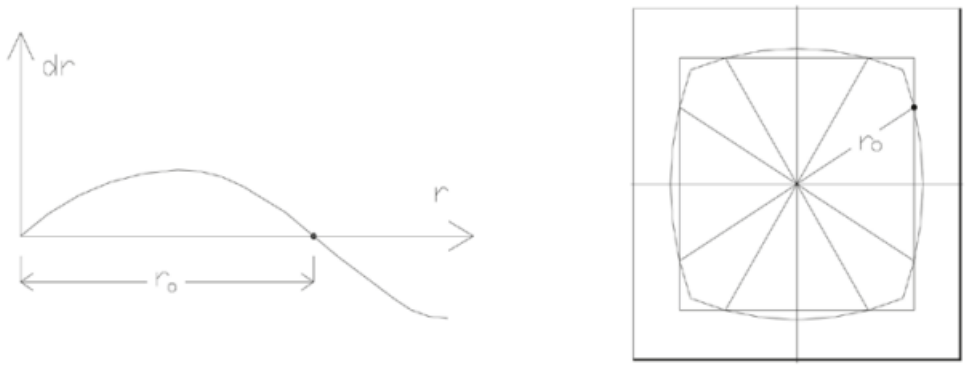


Figura 10: Curva di distorsione a barilotto

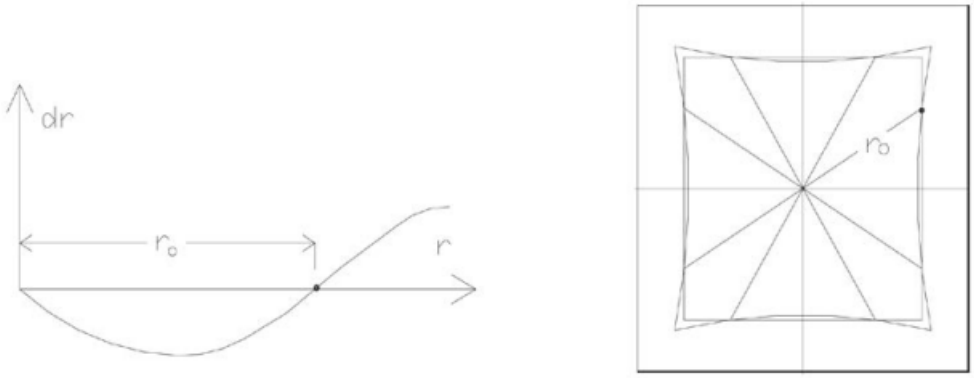


Figura 11: Curva di distorsione a cuscinetto

Nelle immagini precedenti possiamo vedere cosa si intende per distorsione radiale. Infatti la distorsione dipende unicamente dalla distanza del punto dal centro dell'obiettivo. Vediamo infatti che per il comportamento a barilotto, i punti che si trovano compresi tra l'origine e la distanza r0, hanno una variazione di raggio dr positiva questo vuol dire che il punto si trova più distante rispetto a dove dovrebbe essere, viceversa i punti che si trovano ad una distanza superiore di r0 sono più vicini. Il comportamento a cuscinetto è il comportamento duale rispetto a quello appena descritto. Nelle immagini successive chiariamo questo concetto.



Figura 12: Immagine corretta, distorsione a barilotto, distorsione a cuscinetto

Possiamo avere distorsioni con andamento diverso, per esempio l'andamento della distorsione potrebbe essere crescente o decrescente in maniera monotona, comportando una dilatazione dell'immagine o compressione.

Per costruire le curve di distorsione che vedremo più avanti possiamo utilizzare il modello analitico che ci fornisce METASHAPE PROFESSIONAL, il software utilizzato nei capitoli successivi per

l'analisi del rilievo. Metashape, tramite il seguente modello analitico ricostruisce le curve di distorsione e in più ci permette di calcolare le coordinate immagine corrette, dalle quali poi possiamo risalire alle coordinate dei punti oggetto.

$$x = \frac{X}{Z}$$

$$y = \frac{Y}{Z}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$x' = x(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8) + (P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy)$$

$$y' = y(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8) + (P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy)$$

$$u = w \cdot 0.5 + c_x + x' f + x'^{B_1} + y' B_2$$

$$v = h \cdot 0.5 + c_y + y' f$$

Dove:

- X, Y, Z sono i punti di coordinate del punto oggetto nel sistema locale della camera;
- u, v sono i punti proiettati sul piano della camera;
- w, h sono la larghezza e l'altezza del fotogramma.
- f Lunghezza focale;
- c_x e c_y Coordinate del punto principale;
- k_1, k_2, k_3, k_4 Coefficienti di distorsione radiale;
- b_1 e b_2 Coefficienti di skew;
- Coefficienti di distorsione tangenziale p_1 e p_2.

Le coordinate u e v sono i paremetri esenti da distorsione. Corrispondono a ξ η descritti nei paragrafi precedenti. Il parametro f, lunghezza focale è quello che avevamo chiamato ζ e c_x e c_y sono ξ_0 η_0. I coefficienti k sono quelli che interessano la distorsione radiale mentre i coefficienti p quelli relativi alla distorsione radiale. I parametri b invece tengono in conto della non ortogonalità dei lati del pixel. Infatti i lati del pixel, allontanandosi dal punto centrale del sensore.

I parametri che abbiamo appena elencato possono essere forniti dal produttore della camera tramite il certificato di calibrazione. Diversamente, qualora non fossero forniti, il software può stimare gli 11 parametri, tramite i quali può correggere le distorsioni.

Vedremo più avanti l'applicazione dei concetti visti fino a questo momento, sia dal punto di vista del software per quanto riguarda l'orientamento e la risoluzione delle equazioni di collinearità, che dal punto di vista del calcolo analitico della distorsione. Tratteremo il calcolo della distorsione in due modi: nel primo, trascureremo tutti i termini che non riguardino le componenti radiali (ove le componenti radiali sono i termini k) e nella seconda condizione invece utilizzeremo tutti i parametri. La prima ipotesi possiamo farla grazie alla simmetria radiale della lente.

2.4 Equazioni governanti il problema: Equazioni di collinearità

Fino a questo momento abbiamo visto in cosa consiste un problema fotogrammetrico dal punto di vista qualitativo. Vediamo ora analiticamente come si presenta il problema e quali sono le equazioni che permettono di risolverlo. Le equazioni che regolano il problema sono le Equazioni di collinearità.

Supponiamo di conoscere i parametri di orientamento interno ed esterno della camera (X_0, Y_0, Z_0, κ, ω, ϕ, c, ξ_0 ed η_0). Facendo riferimento all'immagine successiva, si definiscono 3 sistemi di riferimento:

1) Solidale alla camera centrato nel centro di presa ξ η ζ;
2) Sistema esterno parallelo al sistema della camera, X' Y' Z';
3) Sistema esterno generale, centrato nel sistema precedente ma ruotato genericamente rispetto a quello della camera (centrato con il sistema del punto 2 per semplicità).

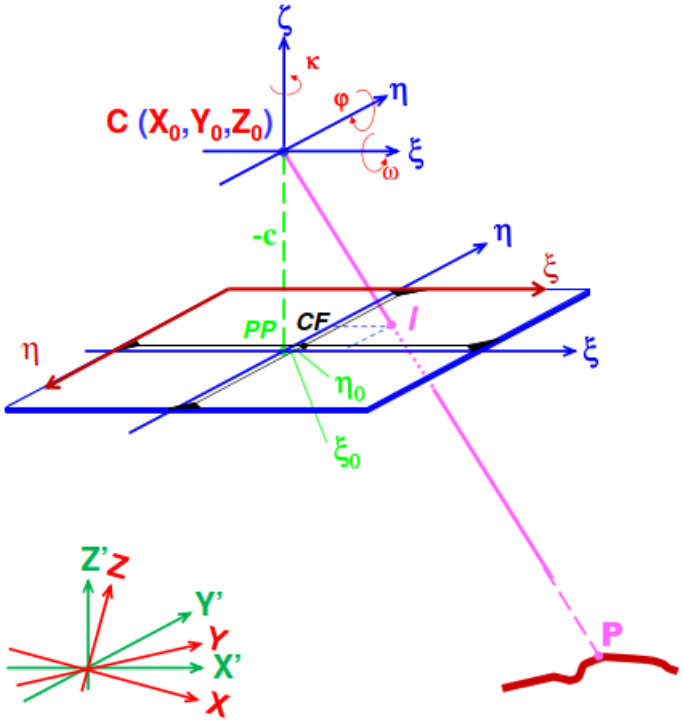


Figura 13: Equazione di Collinearità: allineamento punto generico

Nel sistema 1 si prendiamo le coordinate del punto immagine I e si definiamo delle nuove coordinate del tipo:

$$t_\xi = \frac{\xi - \xi_0}{-c}$$

$$t_\eta = \frac{\eta - \eta_0}{-c}$$

Equazione 1: Tangenti di direzione interne

Dove ξ η sono le coordinate del punto I mentre ξ_0 η_0 sono le coordinate del punto principale. Queste coordinate possono essere definite **tangenti di direzioni**.

Analogamente possiamo scrivere le equazioni delle tangenti di direzione nel sistema 2, nel quale con X'0 Y'0 Z'0 si indicano le coordinate del centro di presa ipotizzato noto e con X' Y' Z' le coordinate del punto P.

$$T_x = \frac{X' - X'_0}{Z' - Z'_0}$$

$$T_y = \frac{Y' - Y'_0}{Z' - Z'_0}$$

Equazione 2: Tangenti di direzione esterne

Il principio su cui si basa la Fotogrammetria è quindi che, se il punto O (centro di presa della camera) il punto I ed il punto P sono allineati, allora:

$$\mathrm{T_x} = \mathrm{t_\xi} \text{ e } \mathrm{T_y} = \mathrm{t_\eta}$$

Equazione 3: Collinearità

Effettuando le opportune sostituzioni ed elaborando le equazioni si può ottenere:

$$\xi = \xi_o - c\frac{X' - X'_0}{Z' - Z'_0} = \xi_o - cT_x$$

$$\eta = \eta_o - c\frac{Y' - Y'_0}{Z' - Z'_0} = \eta_o - cT_y$$

A questo punto è utile vedere come è possibile passare dal sistema di riferimento 2 al sistema di riferimento 3, generico.

Per semplicità si ipotizzi che il sistema 2 (o 1) sia ruotato rispetto al sistema 3 di angoli di assetto ω ϕ κ. Occorrerà dunque considerare le rotazioni:

$$\begin{pmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z - Z'_0 \end{pmatrix} = [R(\omega\ \varphi\ \kappa)]^T \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}$$

Equazione 4: Rotazione di sistemi di riferimento

La matrice R è la matrice di rotazione intorno ai tre assi, motivo per quale è il prodotto di tre matrici, ognuna delle quali rappresenta la rotazione intorno al proprio asse. La matrice relativa all'asse X' è una matrice che comporta una rotazione di ω in senso orario, come anche la matrice relativa all'asse Z' (angolo κ). Infine la matrice relativa all'asse Y' con rotazione di ϕ è in senso antiorario. Quindi si ha che:

$$R(\omega\ \varphi\ \kappa) = R_\omega * R_\varphi * R_\kappa$$

Equazione 5: Matrice di Rotazione

Si può allora rappresentare la matrice R con i coseni direttori:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Concludendo, una volta effettuate le sostituzioni, possiamo scrivere le equazioni che legano le coordinate del punto immagine (alle quali si può risalire interrogando il fotogramma) con un generico sistema di riferimento (in questo caso, per semplicità, ruotato degli angoli di assetto della camera):

$$\xi = \xi_o - c\frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$\eta = \eta_o - c\frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Equazione 6: Relazione tra coordinate immagine e sistema di riferimento esterno generico

Partendo dalla matrice di rotazione che lega i sistemi 2 e 3 è possibile ricavare anche le relazioni inverse:

$$\frac{(X - X_0)}{(Z - Z_0)} = \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{21}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

$$\frac{(Y - Y_0)}{(Z - Z_0)} = \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

Equazione 7: Relazione tra sistema di riferimento esterno generico e coordinate immagine

È facile notare che per ogni punto oggetto (nell'ambiente reale), se si conoscono le coordinate X Y Z, è possibile risalire alle sue coordinate immagine ξ ed η, mentre non è possibile fare il contrario avendo a disposizione un solo fotogramma. Infatti effettuando il computo tra equazioni ed incognite possiamo vedere che se ξ ed η sono note, le incognite sono 3 (X Y Z), superiori alle 2 equazioni. Se invece sono le coordinate del punto oggetto ad essere note, le incognite sono 2 (ξ ed η) ed il sistema è risolubile.

Si può dunque vedere che ogni fotogramma aggiunge 2 equazioni per ogni punto, portando così, nel caso di ξ ed η note, ad avere più equazioni (4 per ogni punto in comune tra due fotogrammi) di incognite (3 per ogni punto, in quanto non cambiano restando fisso il sistema di riferimento esterno). Avere almeno 4 equazioni con 3 incognite per ogni punto porta ad avere un certo grado di ridondanza e il sistema può essere risolto sfruttando il metodo dei minimi quadrati, come segue.

$$X = X_0 + (Z - Z_0)\frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{21}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0)\frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ 0 & 1 & -\frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ 1 & 0 & -\frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ 0 & 1 & -\frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 - Z_0\frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ Y_0 - Z_0\frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ X_0 - Z_0\frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{21}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ Y_0 - Z_0\frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix}$$

Ora che abbiamo introdotto le equazioni di collinearità possiamo vedere in che modo il problema sia risolubile. Abbiamo, al giorno d'oggi, due principali metodi di soluzione che richiedono la conoscenza di alcuni parametri: Fotogrammetria diretta e Triangolazione aerea (o tecnica delle stelle proiettive). Accenniamo brevemente alla fotogrammetria diretta, in quanto la tecnica più utilizzata è quella delle stelle proiettive e la spiegheremo dopo. Nella Fotogrammetria diretta sono noti i parametri che riguardano l'assetto del fotogramma, i parametri di orientamento interno della camera e la posizione del centro di presa. A partire da questi dati viene ricostruito il modello dei fotogrammi in blocco attraverso dei punti di legame. Questa tecnica non richiede di conoscere le coordinate di punti a terra.

Tuttavia, la tecnica più utilizzata oggi e quella più rigorosa è quella a stelle proiettive (il software che utilizzeremo in questo elaborato basa il calcolo proprio su questa tecnica). Essa è una triangolazione in cui si parte sempre da un blocco fotogrammetrico del quale vogliamo stimare l'orientamento e la posizione dei centri di presa tramite l'utilizzo di pochi punti a terra.

Facciamo riferimento alla prossima immagine. Il concetto su cui si basa questa tecnica è quello di scrivere le equazioni di collinearità sia sui punti di legame che sui punti di appoggio che vengono rilevati e che quindi hanno coordinate note.

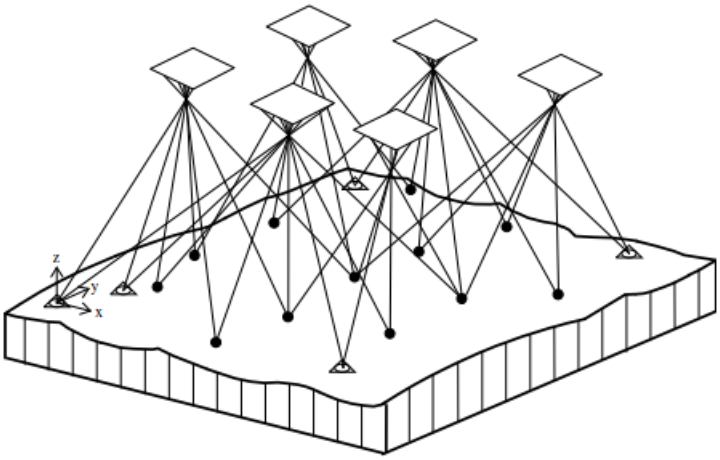


Figura 14: Tecnica delle Stelle Proiettive: Punti di legame

I punti neri sull'immagine rappresentano dei punti di legame, mentre i triangoli sono i punti di appoggio di cui si conoscono le coordinate. Il programma di restituzione scrive un certo numero di equazioni di collinearità in cui sono incogniti i parametri di assetto (rij) e i centri di presa delle camere (X_0 Y_0 Z_0), mentre sono noti alcuni punti di appoggio. In blocco, con un processo di BUNDLE ADJUSTMENT vengono stimati i parametri di orientamento e i centri di presa delle camere. In questo modo si crea il modello fotogrammetrico. Questo è possibile in quanto i forti ricoprimenti tra fotogrammi (vedremo che nel caso oggetto di studio di questo elaborato di tesi superano abbondantemente il 60%) consentono di vedere un punto di legame su più fotogrammi e quindi per lo stesso punto possono essere scritte più equazioni di collinearità. Questo processo consente di utilizzare pochi punti di appoggio nonostante le aree siano molto estese ed i fotogrammi numerosi (migliaia).

Entriamo più nello specifico del processo. Possiamo dire che i punti immagine e il centro di presa definiscono una stella di raggi proiettivi nello spazio. Vogliamo calcolare in blocco i parametri ω ϕ κ di tutti i punti di presa in un'unica compensazione. I dati di partenza sono le coordinate immagine dei punti di legame (punti presenti in più di un fotogramma) e le coordinate immagine e oggetto dei punti di appoggio. Le stelle proiettive vengono traslate e ruotate in modo che i

raggi si intersechino al meglio in corrispondenza dei punti di legame e passino il più possibile per i punti di appoggio.

Descriviamo il problema dal punto di vista delle equazioni e delle incognite che vengono introdotte per ogni punto di legame e ogni fotogramma:

- Ogni punto immagine permette di scrivere due equazioni per ogni fotogramma;
- Ogni fotogramma introduce 6 incognite (i sei gradi di libertà: 3 rotazioni e 3 traslazioni);
- Ogni punto di legame introduce 3 incognite, le coordinate del suo punto a terra (X Y Z) non sono note.

Ad un primo impatto sembrerebbe quasi irrisolvibile un sistema posto in questo modo in quanto il numero di incognite sembrano in numero maggiore rispetto alle equazioni che abbiamo a disposizione (solo 2 per ogni punto omologo). A tal proposito ci viene incontro il forte grado di ricoprimento che in questo caso vuol dire proprio un grande numero di punti di legame. Vediamo, nelle immagini successive, in che modo entrano in gioco i punti di appoggio a terra.

$$X = X_0 + (Z - Z_0)\frac{r_{11}(\xi-\xi_0)+r_{12}(\eta-\eta_0)-r_{13}c}{r_{31}(\xi-\xi_0)+r_{32}(\eta-\eta_0)-r_{33}c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0)\frac{r_{21}(\xi-\xi_0)+r_{22}(\eta-\eta_0)-r_{23}c}{r_{31}(\xi-\xi_0)+r_{32}(\eta-\eta_0)-r_{33}c}$$

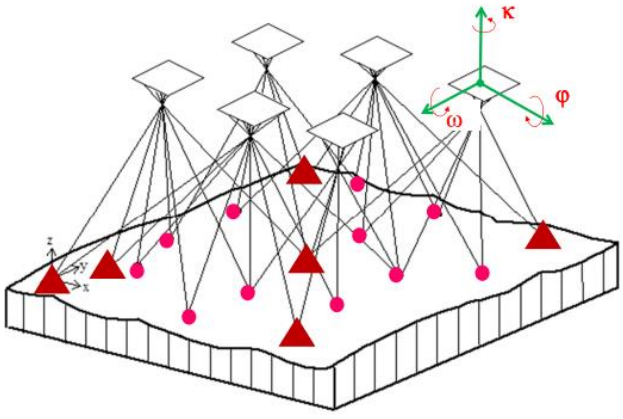


Figura 15: Equazioni di Collinearità e Stelle Proiettive

Nella triangolazione aerea di tipo fotogrammetrico conosciamo la posizione di alcuni punti di appoggio a terra (triangoli rossi sull'immagine). Questi punti, chiamati Ground Control Point

(GCP), possono essere inseriti nelle equazioni di collinearità (cerchiate in rosso nelle equazioni). Nelle equazioni sono noti anche c, ξ_0 η_0 che dipendono dalla calibrazione della camera e sono comuni a tutti i fotogrammi. I punti di legame, punti rossi nell'immagine, prendono il nome di Tie Points (TP). Scriviamo allora le equazioni di collinearità perché di ogni TP noi conosciamp le ξ e le η di ogni punto in quanto sono misurabili sul fotogramma. Riuscendo a scrivere un elevato numero di equazioni, possiamo, tramite i minimi quadrati stimare i parametri X_0 Y_0 Z_0 e gli elementi della matrice di rotazione. Il vantaggio della fotogrammetria digitale è che, attraverso algoritmi di correlazione, che sfruttano la radiometria per associare i vari punti, si riescono a cercare in maniera automatica i punti di legame.

Analizziamo un semplice esempio per computare il numero di equazioni ed il numero incognite che scaturiscono da tre fotogrammi. Sia Fi il fotogramma i-esimo e TPj il punto di legame j-esimo, tale che, scrivendo Fi-TPj intendiamo rappresentare il Tie Points j-esimo sul fotogramma i-esimo. Supponiamo di avere a disposizione 1 GCP e che sia visibile in tutti e 3 i fotogrammi. Vogliamo vedere quanti TP sono necessari per poter stimare in blocco i parametri di questi 3 fotogrammi supponendo che i TP siano presenti in tutti i fotogrammi.

	Incognite Assetto (X0 Y0 Z0 ω ϕ κ)	**Incognite Punto oggetto (X Y Z)**	**Equazioni TP**	**Inc. totali**	**Eq. totali**	**Computo**
F1-TP1	6	3	2	9	2	7
F2-TP1	6	0	2	15	4	11
F1-TP2	0	3	2	18	6	12
F2-TP2	0	0	2	18	8	10
F1-GCP1	0	0	2	18	10	8
F2-GCP1	0	0	2	18	12	6
F3-TP1	6	0	2	24	14	10
F3-GCP1	0	0	2	24	16	8
F3-TP2	0	0	2	24	18	6
F1-TP3	0	3	2	27	20	7
F2-TP3	0	0	2	27	22	5
F3-TP3	0	0	2	27	24	3
F1-TP4	0	3	2	30	26	4
F2-TP4	0	0	2	30	28	2
F3-TP4	0	0	2	30	30	0

Tabella 1: Computo tra equazioni ed incognite per risolvere un blocco composto da 3 fotogrammi

Come abbiamo visto precedentemente, un fotogramma porta con sé 6 incognite. Prendendo allora un TP (il numero 1) sul primo fotogramma abbiamo 9 incognite totali, date dalla somma

delle 6 incognite del fotogramma più X_1, Y_1, Z_1 dovute al primo punto di legame. Il punto di legame però permette di scrivere 2 equazioni. Per cui il computo tra incognite ed equazioni è di 7 incognite in più rispetto alle equazioni disponibili (prima riga della tabella, caso F1-TP1). Inseriamo adesso un secondo fotogramma che contenga lo stesso Tie Points del primo. Siamo nel caso F2-TP1. In questo caso vengono aggiunte solo 6 incognite, quelle relative alla rototraslazione del fotogramma. Non si aggiungono le 3 incognite del punto oggetto in quanto sono sempre quelle del TP1. Per TP1 è possibile scrivere altre due equazioni. Le incognite totali sono le 9 del caso F1-TP1 più le 6 del caso F2-TP2 per un totale di 15 incognite (5° colonna della tabella precedente). Le equazioni in totale sono 4. Le incognite al netto delle equazioni sono 11 (lo possiamo vedere nell'ultima colonna della tabella). A questo punto aggiungiamo un punto di legame, TP2 che sia visibile su entrambi i fotogrammi. Esso aggiunge 4 equazioni, 2 per ogni fotogramma, e 3 incognite, ovvero le sue coordinate oggetto. Non porta altre incognite in quanto i parametri relativi all'assetto spaziale dei due fotogrammi sono già stati contati. Siamo arrivati ad un punto in cui, su due fotogrammi per ogni punto di legame aggiuntivo, si possono scrivere più equazioni (4) di quante incognite si introducono (3). Per cui è intuibile come si possa arrivare ad ottenere la risoluzione del sistema, ovvero aggiungendo un certo numero di punti di legame tale per cui le equazioni superino le incognite. Abbiamo detto però che con la tecnica delle stelle proiettive vengono compensati in blocco anche i GCP. Vediamo infatti che se consideriamo un GCP (5° e 6° riga) le incognite si riducono. Infatti i casi di F1-GCP1 e F2-GCP non comportano nuove incognite in quanto i 6 parametri incogniti di ciascun fotogramma sono già stati conteggiati e le 3 coordinate della posizione del punto sono note per definizione di GCP. In questi due casi però possono essere aggiunte 4 equazioni. Rimangono ancora 6 incognite, per cui aggiungendo altri 6 punti di legame il sistema sarebbe risolubile. Nell'esempio, invece, aggiungiamo un terzo fotogramma e altri due punti di legame. Il computo delle incognite ed equazioni segue la stessa logica vista fino a questo momento. Il software di calcolo che utilizzeremo scrive le equazioni e risolve il sistema in blocco utilizzando tutti i fotogrammi.

Risulta evidente quanto siano fondamentali elevati ricoprimenti poiché significa avere più punti di legame che vuol dire scrivere di altre equazioni. Vedremo in questo lavoro di tesi che siamo in presenza di forti ricoprimenti soprattutto in direzione trasversale.

3 Caso studio: Il Rilievo

Come abbiamo accennato nell'introduzione, le operazioni che portano al compimento di un rilievo possono essere suddivise in due fasi: la fase che si svolge sul campo e la fase d'ufficio. In questo capitolo vedremo come è stato svolto il rilievo sul campo, con particolare attenzione al rilievo dei punti di appoggio tenutosi il giorno 11 Giugno 2021 (ed al quale ho partecipato personalmente. Accenneremo anche ai due voli fotogrammetrici per poter descrivere i fotogrammi ottenuti. Affronteremo la parte d'ufficio, anche detta fase di restituzione, nei capitoli successivi. Procediamo con la descrizione degli eventi in ordine cronologico.

3.1 I due voli Aerei

Il 17 Marzo 2021 si è svolto il primo volo fotogrammetrico grazie al quale abbiamo ottenuto 563 fotogrammi a presa nadirale. Il volo è composto da 21 strisciate longitudinali, per ognuna delle quali sono stati acquisiti 24 fotogrammi a formare, nel complesso una maglia di fotogrammi molto regolare, lo vedremo anche nel capitolo 5 analizzando le distanze tra i fotogrammi. Moltiplicando il numero delle strisciate per il numero dei fotogrammi si ottengono 504 fotogrammi. A questi, per poter arrivare a 563, vanno aggiunti i fotogrammi acquisiti durante le fasi di manovra del velivolo per correggere la traiettoria. Infatti in un volo fotogrammetrico siamo in grado di ottenere le immagini in quanto viene settato nella camera un intervallo temporale di acquisizione, per cui ad intervalli temporali costanti la camera scatta e ottiene l'immagine. Il giorno 23 Marzo, con il secondo volo fotogrammetrico, sono stati acquisiti 278 fotogrammi a presa inclinata.

Con la terminologia "presa nadirale" e "presa inclinata" intendiamo l'orientamento della fotocamera nel momento in cui acquisisce il fotogramma. Per poter capire cosa si intende con immagini nadirali dobbiamo passare dal concetto di verticale del luogo. Per verticale del luogo intendiamo la direzione della forza di gravità nel punto di osservazione, perpendicolare al piano orizzontale tangente nello stesso punto. Possiamo materializzare la verticale seguendo la direzione del filo a piombo. Definiamo **Zenit** l'intersezione con la sfera celeste della verticale passante per il punto di osservazione. La sfera celeste è una sfera immaginaria, di raggio arbitrario, sulla quale sono proiettati tutti gli astri. In questo caso utilizziamo una sfera celeste locale centrata sotto i piedi dell'osservatore (lo possiamo vedere nella figura successiva). **Nadir** è il punto diametralmente opposto allo Zenit. Possiamo chiamare le immagini "nadirali" in quanto il loro

asse ottico è diretto lungo la verticale ed è orientato verso il Nadir. Le immagini inclinate differiscono dalle nadirali in quanto, nel momento dell'acquisizione, la camera era disposta in modo da avere un angolo di 30° tra l'asse ottico e la direzione verticale.

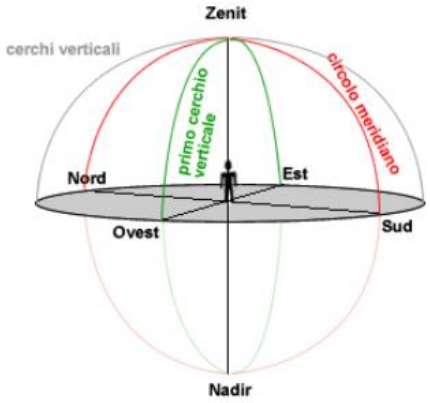


Figura 16: Definizione di Zenit e Nadir

Anticipiamo il risultato della prima fase del capitolo successivo. Questo può servire per avere ben in mente come si sono svolti i voli fotogrammetrici. Vediamo nelle due immagini successive come, durante l'allineamento dei fotogrammi vengano stimate anche le posizioni e l'orientamento delle camere. Nella prima immagine vediamo il volo nadirale. La maglia delle camere è la parte in blu, molto fitta e molto regolare. Nella seconda immagine notiamo subito l'inclinazione delle camere, infatti guardando le linee nere (direzione degli assi ottici della camera) possiamo vedere che non sono disposti verticalmente. Inoltre possiamo anche notare come il volo risulta meno regolare del primo.

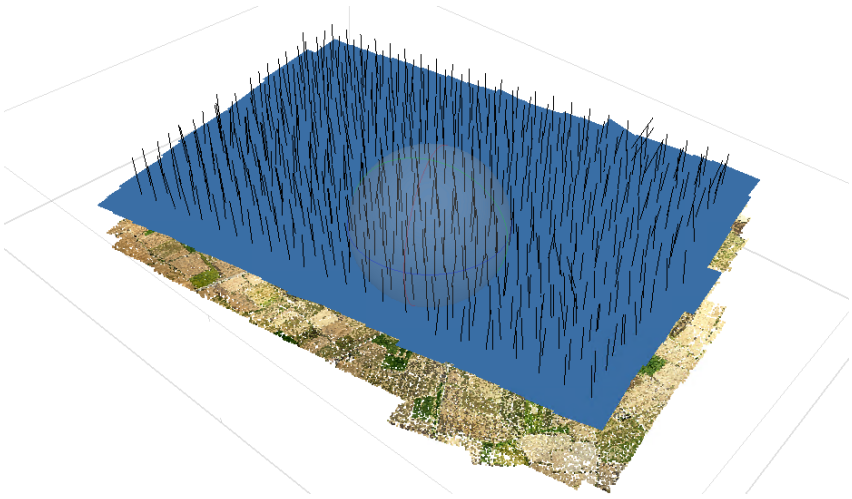


Figura 17: Disposizione dei fotogrammi nadirali su Livorno Ferraris

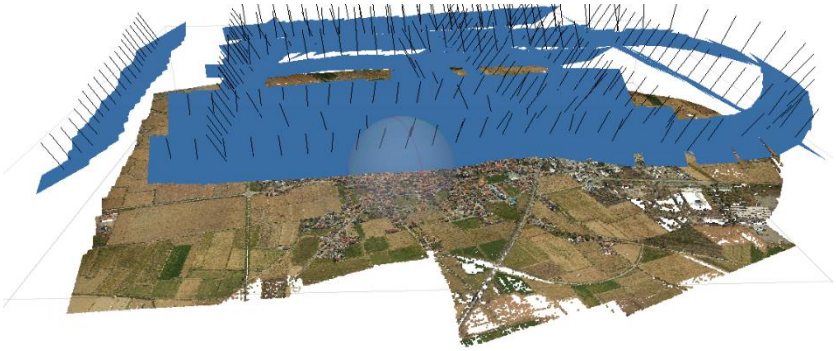


Figura 18: Disposizione dei fotogrammi a presa inclinata su Livorno Ferraris

Il velivolo utilizzato per i voli fotogrammetrici è il Tecnam P92 JS, sul quale sono montate le camere (sia la Phase One che la camera che ci permette di avere le immagini termiche), le piattaforme inerziali ed il ricevitore GNSS. Di queste ultime due non abbiamo i dati a disposizione.

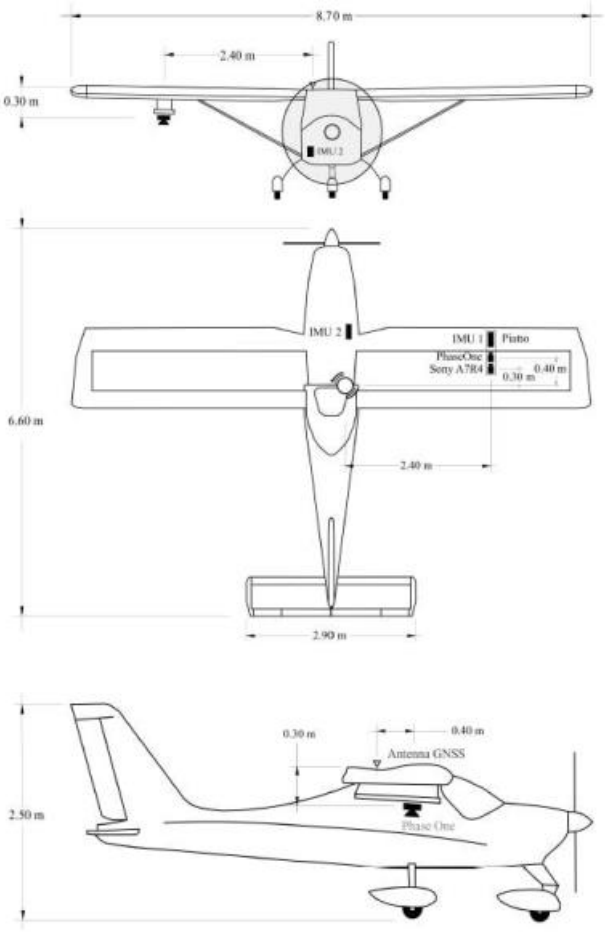


Figura 19: Schema del velivolo TECNAM P92 JS

La camera montata sul velivolo per l'acquisizione dei fotogrammi nadirali ed inclinati è la Phase one iXM-RS150F.



Figura 20: Phase one iXM-RS150F

Riportiamo di seguito la scheda tecnica della camera.

TECHNICAL SPECIFICATIONS ^	IXM-RS150F	IXM-RS100F
RESOLUTION	150MP	100MP
	14204 x 10652	11608 x 8708
DYNAMIC RANGE (DB)	83	84
ASPECT RATIO	4:3	4:3
PIXEL SIZE (MICRONS)	3.76	4.6
EFFECTIVE SENSOR SIZE (MM)	53.4 x 40	53.4 x 40
LIGHT SENSITIVITY (ISO)	50-6400	50-6400
CAPTURE RATE (FPS)	2	1.6

CAPTURE TYPE	Medium format for aerial imaging	Medium format for aerial imaging
LENS MOUNT	Phase One RS	Phase One RS
DATA INTERFACES	USB3, Ethernet 10G	USB3, Ethernet 10G
I/O INTERFACES	Trigger, Mid exposure, Ready, Serial	Trigger, Mid exposure, Ready, Serial
HDMI	1920 x 1080 60p	1920 x 1080 60p
DATA STORAGE	XQD card	XQD card
SYNCHRONIZATION SPEED (MICROSECONDS)	50 - in array of cameras	50 - in array of cameras
RAW FILE COMPRESSION 14BIT	IIQ large: 150MB	IIQ large: 100MB
	IIQ small: 100MB	IIQ small: 65MB
IR CUT-OFF FILTER	Yes	Yes
CONNECTION TO POD	4 x M4 bolts	4 x M4 bolts
POWER INPUT (VDC)	12 - 30	12 - 30
MAX. POWER CONSUMPTION (W)	16	16
WEIGHT (EXCLUDING LENS) (G)	1000	1000
DIMENSIONS (EXCL. LENS) (MM)	90 x 90 x 91	90 x 90 x 91
APPROVALS	FCC Class A, CE, RoHS	FCC Class A, CE, RoHS
TEMPERATURE (°C)	-10 to 40	-10 to 40
HUMIDITY (%)	15 - 80 (non-condensing)	15 - 80 (non-condensing)

Figura 21: Specifiche Tecniche Camera

Facciamo alcune considerazioni che torneranno utili nei capitoli successivi. Vediamo che la nostra camera ha una risoluzione 14204 x 10652 Pixel con la dimensione del Pixel pari a 3.76 micron. Anticipando i valori che troveremo più avanti, possiamo dire che avendo come altezza relativo del rilievo 530 m e come distanza focale di 51 mm, un Pixel copre una superficie a terra di 4 cm x 4 cm. Di conseguenza ogni fotogramma ricopre un'area di circa 2400 m^2 (56 m x 43 m).

Nel capitolo 5 vedremo quanto, la superficie acquisita da un singolo fotogramma, in relazione alla distanza dai fotogrammi adiacenti nelle due direzioni, porti ad avere un ricoprimento della stessa porzione di terreno. Quantificheremo dunque il livello di sovrapposizione che hanno due fotogrammi successivi (ricoprimento longitudinale) e due fotogrammi adiacenti (ricoprimento trasversale).

3.2 Rilievo dei punti d'appoggio

Nel paragrafo 2.4 abbiamo parlato della tecnica delle stelle proiettive per eseguire in blocco la stima dei parametri di assetto della camera e più in generale per l'allineamento dei fotogrammi e la creazione dunque del modello. Abbiamo quindi visto che vengono usati simultaneamente sia i punti legame che i punti di appoggio. Se i punti di legame vengono trovati in maniera automatica tramite processo di auto correlazione da parte del software (Metashape Professional), i punti d'appoggio devono essere rilevati in situ.

Come troviamo i punti di appoggio? Non esiste una regola con cui si stabiliscano i punti di appoggio. Solitamente, quando rilievo fotogrammetrico e rilievo a terra sono eseguiti in contemporanea, vengono utilizzati degli appositi marker. I marker sono dei "bersagli" (come quello che possiamo vedere nell'immagine successiva) che devono essere ben visibili sui fotogrammi. Vengono quindi posizionati in maniera più uniforme possibile sulla superficie oggetto del rilievo e, tramite tecniche Topografiche viene rilevata la loro posizione, in modo tale da poter associare, al punto immagine del fotogramma, delle coordinate rispetto ad un sistema di riferimento esterno (X Y Z del capitolo 2) e, terminato il loro rilievo, venire rimossi. I Marker dunque altro non sono che i GCP.



Figura 22: Marker

Tuttavia, nel caso in esame, il rilievo fotogrammetrico e rilievo dei GCP sono avvenuti in tempi diversi per cui non è stato possibile usare questa tipologia di marker. Sono stati, invece, utilizzati dei punti a terra che fossero visibili sui fotogrammi, come spigoli di chiusini, punti angolosi della segnaletica orizzontale o anche vertici di marciapiede.

Prima di procedere con la descrizione del rilievo, richiamiamo alcuni concetti riguardanti il funzionamento della tecnica del posizionamento in tempo reale.

3.2.1 Principi di posizionamento GNSS.

In questo elaborato non si vuole entrare nello specifico delle tecniche di acquisizione dati per cui si rimandano a testi appositi per approfondire gli argomenti che tratteremo in maniera sintetica al fine di chiarificare i concetti che ci sono dietro il rilievo effettuato l'11 giugno.

Il posizionamento GNSS avviene secondo una tecnica di "intersezione spaziale di tipo distanziometrica". Il sistema di riferimento è un sistema di tipo Geocentrico. Si suppongono note le posizioni del satellite j, mentre sono incognite le coordinate del vertice i. Esse sono legate alle coordinate del satellite tramite la misura di un numero sufficiente di range, ovvero di distanze tra satelliti e centro di fase dell'antenna del ricevitore posto in stazione sul vertice i. La distanza ρ è espressa dalla formula successiva.

$$\rho_i^j = \sqrt{(X^j(t) - X_i)^2 + (Y^j(t) - Y_i)^2 + (Z^j(t) - Z_i)^2}$$

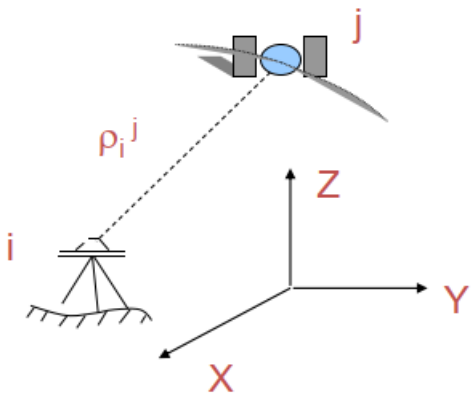


Figura 23: Distanza tra satellite e ricevitore

Il posizionamento GNSS può essere eseguito con un processo in post-elaborazione (in cui i dati vengono elaborati dopo l'acquisizione nelle varie stazioni) o in tempo reale (in cui la posizione è direttamente disponibile in campagna). In entrambe le tipologie, il problema è la determinazione del range (distanza) tra satellite e ricevitore. Le modalità di misura possono essere: di codice (sulla componente impulsiva del segnale) o di fase (sulla portante del segnale). Infine le

misure GNSS possono essere statiche (si permane sui punti per un certo lasso di tempo) o cinematiche (in cui il ricevitore è in continuo movimento). Quello che interessa al nostro rilievo è la modalità di rilievo cinematico utilizzando un posizionamento differenziale su misure di fase.

Per eseguire misure GPS cinematiche in tempo reale (RTK sta per Real Time Kinematic) è necessario ricevere, nel ricevitore mobile, correzioni differenziali calcolate da una stazione base, una stazione che sia fissa e che acquisisca dati in modo continuo. Il ricevitore deve essere in grado di leggere le correzioni e di applicarle, in più deve aver installato un firmware OTF (On The Fly) che permetta l'inizializzazione rapida ed in movimento dell'ambiguità di fase (per le correzioni sulle misure di fase). Le stazioni base che sono state appena nominate prendono il nome di Stazioni Permanenti GNSS ed hanno un ruolo fondamentale poiché forniscono al rover (il ricevitore mobile) le correzioni da apportare alle misure per effettuare rilievi in tempo reale senza sostare sui punti per numerose epoche (decine di minuti per ogni punto) ottenendo precisioni centimetriche.

In questi ultimi anni, molte organizzazioni hanno avuto la necessità di raggiungere, nel posizionamento, la precisione elevata delle tecniche differenziali GNSS (precisioni sub millimetriche) e nello stesso tempo quella di misurare con continuità ed in un unico sistema di riferimento, la posizione di una serie di vertici. Ciò ha suggerito l'impianto di stazioni GNSS che permanentemente (da cui stazioni permanenti) acquisissero dati di codice e di fase. Alcune organizzazioni hanno messo liberamente a disposizione questi dati e si sono consorziate in nuovi organismi o, semplicemente, hanno aderito a comuni progetti di ricerca. È bene che le stazioni permanenti facciano parte di una rete globale, controllata e compensata periodicamente. La realizzazione dei sistemi di riferimento e le reti nazionali ed internazionali per il monitoraggio della geodinamica si basano proprio su queste. In italia l'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) coordina molte di queste stazioni, di cui alcune sono proprie. L'IGM (Istituto Geografico Militare) ha creato una rete di stazioni permanenti detta RDN (Rete Dinamica Nazionale) a partire da una selezione di quelle già operative nel territorio italiano, per la materializzazione del nuovo sistema di riferimento nazionale.

3.2.1.1 Bias comuni

Il posizionamento a due ricevitori in tempo reale permette di eliminare i bias comuni a due ricevitori GNSS ed arrivare alla precisione centimetrica con misure di fase ad ambiguità fissata. Il posizionamento è definito differenziale in quanto sfrutta la combinazione di dati osservati contemporaneamente da due o più ricevitori GNSS con una stazione permanente, per ottenere l'eliminazione o la significativa riduzione dei principali errori nel posizionamento.

Apriamo una breve parentesi per trattare i bias comuni che si possono incontrare in un rilievo GNSS. Tutto ciò che non può essere interpretato come "distanza terra-satellite" viene impropriamente definito come "errore" (o Bias). Possiamo classificare i bias in base alle loro caratteristiche di correlazione oppure allo loro dipendenza dalla frequenza del segnale. I bias appartengono a 3 categorie:

- Orologio del ricevitore e del satellite;
- Multipath e variazione dei centri di fase delle antenne;
- Spazialmente correlati: Ionosfera, troposfera ed effemeridi tra satellite e ricevitore.

Spendiamo alcune parole su questi errori. L'errore di orologio è diviso in due componenti: l'asincronismo tra l'orologio del satellite e quello del ricevitore, correggibile tramite una traslazione temporale, e la deriva dipendente dal tempo che, per essere corretta, sfrutta un modello basato su polinomi di diverso grado. L'effemeride rappresenta l'elenco delle coordinate spaziali dei satelliti e di altri elementi variabili nel tempo relative alle posizioni assunte in istanti determinati ad intervalli di tempo costanti. Essendo utilizzate per il calcolo della posizione istantanea dei satelliti, non sono prive di errori in quanto sono figlie di una stima. La natura di questo bias è geometrica. La Troposfera, a causa della presenza d'umidità al suo interno, provoca una rifrazione sul segnale GNSS che la attraversa. Questa tipologia di bias non varia al variare della portante del segnale per cui è comune a tutte le frequenze. La Ionosfera invece, per la presenza di gas ionizzati, influisce sulle frequenze del segnale ed in alcuni casi può anche rifletterlo completamente. Questo errore può essere eliminato eseguendo opportune combinazioni sulle portanti del segnale. Infine abbiamo il multipath che è un errore di percorso, ovvero il segnale arriva in maniera indiretta all'antenna a causa di superfici che lo riflettono, come è possibile vedere in nella figura successiva.

Gli errori possono essere eliminati utilizzando un approccio di tipo differenziale o relativo, ovvero vengono utilizzati più ricevitori, posti ad una certa distanza, che non superi una certa soglia (10-15 km) in cui si effettua una differenziazione tra le misure dei due ricevitori in epoche temporali distinte.

3.2.1.2 Posizionamento in tempo reale: Stazione Virtuale

Terminato il breve richiamo teorico sul funzionamento di un rilievo GNSS possiamo tornare alla descrizione delle stazioni permanenti. La correzione calcolata da una singola stazione permanente è un dato puntuale e perde la sua validità con l'aumentare della distanza con il rover (il rover è il ricevitore mobile del quale si vogliono conoscere le coordinate). Addirittura, superate certe distanze, dell'ordine di 20/30 km risulta difficoltoso anche fissare l'ambiguità di fase. Considerando che ogni stazione permanente ha un suo raggio d'azione, per coprire un intero territorio con un servizio di posizionamento in tempo reale occorrerebbe avere tra le basi una distanza limitata in modo tale da avere bias simili da poter essere eliminati o ridotti per mezzo di processo differenziale. La rete di stazioni permanente dovrebbe essere raffittita in modo tale da avere anche sovrapposizione tra i raggi d'azione di ogni base, per non creare dei vuoti qualora una dovesse improvvisamente spegnersi.

Per ovviare al raffittimento della rete, che comporterebbe un elevato costo, si sfrutta la presenza della rete di stazioni permanenti per costruire un modello sulla variazione dei bias spazialmente correlati, a partire dai valori calcolati in corrispondenza di esse. Il modello ricopre l'intera area ed i bias nella posizione del rover possono essere ricavati per mezzo di un'interpolazione del modello stesso. Questo equivale alla creazione di una **stazione base virtuale** che ha gli stessi bias del rover in quanto le correzioni sono calcolate in prossimità della sua posizione. La baseline dunque tra stazione base (virtuale) e rover è pressoché nulla e i bias spazialmente correlati possono essere eliminati. Con questo approccio è possibile raggiungere una precisione centimetrica con distanza base (reale) – Rover anche di 40 – 80 km. In questo modo l'interdistanza tra le stazioni permanenti può essere ridotta, infatti nelle soluzioni RTK il raggio di azione era nell'intorno di 10 km dalla stazione, ora con questo approccio si possono raggiungere distanze anche di 80 km. Queste reti, finalizzate al posizionamento in tempo reale prendono il nome di **Network RTK** o **NRTK**.

Il posizionamento cinematico da rete NRTK è sempre più diffuso e per renderlo operativo e utilizzabile dall'utenza professionale sono state sviluppate varie architetture di rete, tra le quali:

- Virtual Reference Station (VRS);
- Multi Reference Station (MRS);
- Master Auxiliary Station (MAC o MAX).

Nel nostro rilievo, l'architettura utilizzata è stata quella della VRS. Seguendo l'approccio VRS, le osservazioni di codice e di fase di almeno tre stazioni che osservano non meno di cinque satelliti vengono raccolte ed elaborate con continuità da un **centro di controllo**. Una volta raggiunta e mantenuta nel tempo una soluzione della rete ad ambiguità di fase fissata, inizia la fase in cui si genera il modello dei bias.

Fissata l'ambiguità di fase, il centro di controllo è in grado di interpolare i valori dei bias in una specifica posizione e può generare un set di osservazioni e correzioni GNSS calcolate come se fossero state acquisite da un ipotetico ricevitore posto in stazione in quella posizione. In altri termini il centro di controllo genera nei pressi del rover una stazione virtuale. La baseline che si forma tra VRS e rover ha una distanza trascurabile per cui gli errori spazialmente correlati vengono eliminati.

Per stabilire dove collocare la stazione virtuale, la comunicazione deve avvenire in maniera bidirezionale in quanto il rover deve comunicare al centro di controllo la sua posizione, che effettua il calcolo e manda le prime correzioni tramite le quali il rover corregge la sua posizione e la re-invia al centro di controllo. Una volta definita la posizione finale della stazione virtuale ha inizio l'invio dei dati in continuo tra centro di controllo e rover. Dal rover ora è possibile l'inizio del rilievo RTK con la ricerca dell'ambiguità, operazione facilitata da una baseline iniziale pressoché nulla. Dal lato del centro di controllo viene fatta la continua verifica della distanza tra rover e stazione virtuale in quanto, superata una certa soglia (ordine del chilometro), la stazione virtuale viene re-inizializzata in prossimità della nuova posizione del rover.

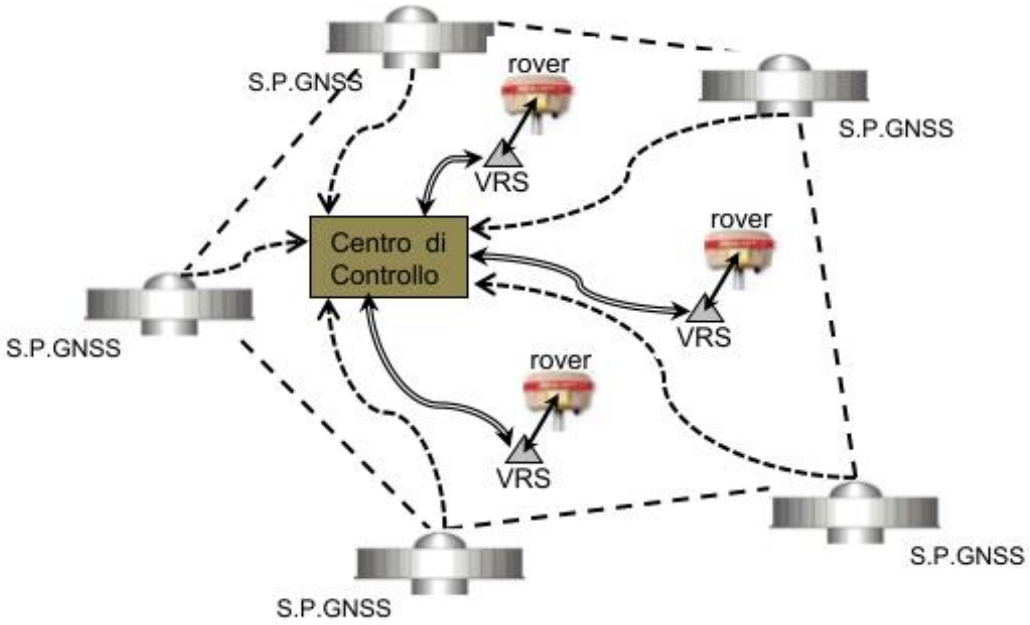


Figura 24: Funzionamento Virtual Reference Station

Le stazioni permanenti a cui ci siamo appoggiati per eseguire il rilevo sono state quelle di Crescentino, Biella e Cougnè.

3.2.2 Organizzazione del rilievo

Il giorno del rilievo è stato preceduto da una mattinata in cui si è tenuta una riunione tra i partecipanti della missione. Durante la riunione sono stati mostrati i punti da rilevare, precedentemente scelti e posizionati, su Google Earth, in maniera approssimativa come nella figura successiva.

Una volta mostrata la distribuzione dei punti da rilevare, si è deciso, causa l'elevato numero di punti, di suddividere gli operatori in due squadre:

- Squadra 1, zona interna del centro Urbano;
- Squadra 2, zona perimetrale.

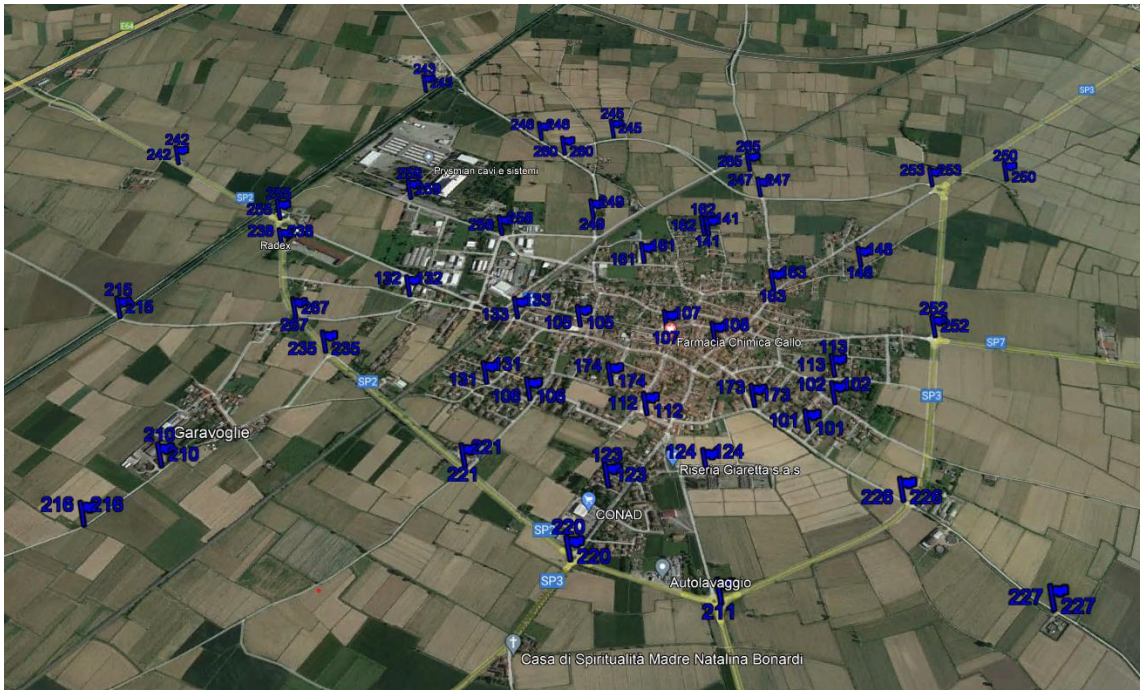


Figura 25: Pianificazione punti da rilevare su Google Earth

Tutti i punti sono stati caricati in un file di Google Maps in modo da poter raggiungere la prossimità del punto da rilevare in maniera speditiva. Per quanto riguarda la squadra 2, un grosso aiuto è stato fornito dal tecnico del comune di Livorno Ferraris che si è messo a disposizione per guidare la squadra nella periferia.

Formalizzate il tutto, l'appuntamento è stato fissato per le ore 8:30 del giorno successivo, 11 Giugno 2021, all'ingresso dell'Università per prendere l'attrezzatura necessaria e raggiungere Livorno Ferraris.

3.2.3 Il rilievo

Il rilievo dei punti d'appoggio (o Ground Control Point) è stato eseguito il giorno 11 Giugno 2021. Arrivati a Livorno Ferraris per le ore 9:30 circa, le due squadre divise hanno iniziato l'attività di rilievo. Squadra 1 e squadra 2 sono state dotate della stessa strumentazione, con la differenza che la squadra 2, dovendo rilevare punti posti a distanze maggiori (situati nelle zone perimetrali) si è mossa in auto, diversamente dalla squadra 1 che si è spostata tra un punto e l'altro a piedi.

Ogni squadra era composta da 5 elementi, i quali hanno svolto, in modo alternato le mansioni. Le operazioni da eseguire, per ogni punto sono state:

- Individuazione del punto reale;
- Posizionamento e stazionamento dell'antenna sul punto;
- Posizionamento del numero del punto nelle sue vicinanze;
- Annotazione delle coordinate sulle monografie;
- Salvataggio dei dati sul ricevitore;
- Foto generale e di dettaglio del punto da inserire sulle monografie.

Una volta giunti nelle vicinanze e trovato il punto si deve valutare la fattibilità di rilevare ancora quel punto. Può succedere infatti che, avendo svolto il rilievo fotogrammetrico in tempi diversi, quel punto non sia più visibile. Questo accade per esempio quando la vegetazione, cresciuta nel tempo trascorso tra i due rilievi, abbia nascosto il punto. Può anche succedere, per esempio, che ci siano dei lavori in corso e quindi non sia possibile stazionare su uno spigolo del chiusino. In quel caso il punto da rilevare viene spostato. La modifica viene riportata in modo chiaro sulle monografie. Accertati della fattibilità del punto si posiziona l'antenna, montata in cima ad una palina che deve essere mantenuta "in bolla", ovvero deve rispettare la verticale. A questo punto, per non far confusione con i punti successivi, si posiziona il numero del punto e si scatta una foto di dettaglio, in modo tale da rendere riconoscibili il punto e, allo stesso tempo, che sia visibile il numero (vedere figura successiva). La numerazione dei punti segue una regola ben precisa: la prima cifra indica la squadra, mentre le altre due indicano il punto. Questo è possibile in quanto i punti da rilevare sono in numero minore di 100. Il numero 247, mostrato in figura, è da leggere come "punto n°47 rilevato dalla squadra 2".

Avendo effettuato un rilievo con posizionamento in tempo reale, sul ricevitore è possibile leggere le coordinate del centro di fase dell'antenna, che vengono riportate per poi essere confrontate con i dati ricavati dal processamento in post-elaborazione. Infatti il ricevitore salva i dati che verranno elaborati in un secondo momento attraverso l'ausilio delle stazioni permanenti.

La mattina non è stata sufficiente per raccogliere il numero di punti d'appoggio che si era prefissato il giorno prima durante la riunione. È stata fatta una pausa per poter pranzare. Il pranzo

è stato offerto dal comune ed è stato svolto all'interno dell'edificio della protezione civile. Nel primo pomeriggio si è proseguito con il rilievo dei punti. Il tecnico responsabile dell'Ufficio Tecnico del comune non ha partecipato e per il ritrovamento dei punti è stato sfruttato Google Maps, sul quale, come abbiamo già accennato erano stati caricati i punti con precisione metrica.



Figura 26: Rilievo del Punto 247 (in figuro ci sono io)

3.2.4 Output del rilievo

I vari punti rilevati sono stati salvati nei ricevitori e sono stato sottoposti anche a post-processamento. L'elaborazione dei dati non è a disponibile poiché eseguita da terze parti, tuttavia gli output forniti sono le coordinate Marker e le Monografie.

3.2.4.1 Marker

In tutto sono stati rilevati 45 GCP le coordinate dei quali le vediamo riportate di seguito ed espresse nel sistema di riferimento UTM 32N. La precisione ottenuta in queste misure è centimetrica.

n° Marker	***Est [m]***	***Nord [m]***	***h [m]***
101	*428279.316*	*5014240.127*	*183.017*
102	*428379.321*	*5014360.258*	*182.838*
105	*427558.079*	*5014723.185*	*188.193*

106	427400.732	5014383.659	188.925
107	427854.429	5014694.564	187.073
108	428013.726	5014636.873	186.119
112	427774.645	5014317.383	185.617
113	428395.068	5014482.591	183.813
123	427651.359	5014027.317	185.997
124	427949.082	5014083.349	184.854
131	427256.811	5014456.953	189.797
132	426958.423	5014878.092	192.28
133	427341.669	5014764.546	190.291
141	428028.502	5015205.904	187.936
148	428566.629	5015026.997	183.887
161	427784.722	5015051.98	188.43
162	428011.471	5015207.553	187.834
163	428239.369	5014904.524	184.514
173	428120.373	5014351.515	183.163
174	427662.47	5014447.982	187.208
210	426292.286	5014117.416	193.119
211	427960.645	5013617.545	183.807
215	425978.715	5014773.144	201.188
216	426127.063	5013896.737	193.431
220	427542.193	5013763.684	185.94
221	427215.148	5014106.754	189.089
226	428527.93	5013967.362	182.318
227	428874.786	5013589.341	179.867
235	426710.751	5014601.595	194.338
238	426462.658	5015139.875	197.891
242	425955.103	5015655.603	202.793
243	426877.84	5016173.052	198.713
245	427679.638	5015836.073	192.072
246	427385.891	5015817.51	193.781
247	428243.069	5015442.158	186.553
249	427599.922	5015308.494	189.913
250	429220.431	5015539.65	182.914
252	428762.467	5014663.621	183.003
253	428919.115	5015500.949	184.566
255	426423.585	5015305.458	199.963
258	427261.251	5015212.667	192.218
259	426898.221	5015432.255	194.814
260	427482.964	5015716.494	191.909
265	428215.934	5015605.051	187.881
267	426581.237	5014766.396	194.882

Tabella 2: Marker Caricati all'interno del Software

3.2.4.2 Monografie

Più volte abbiamo nominato le monografie, ma cosa sono? Le monografie sono degli "appunti" utili al ritrovamento ed al riconoscimento del punto rilevato. Sulle monografie possiamo trovare il numero del punto e una breve descrizione. Alla voce "ubicazione" della monografia viene indicato sinteticamente come possiamo ritrovare il punto in questione ed eventualmente vengono riportati anche dei dettagli come "tombino adiacente il civico 7" per evitare fraintendimenti qualora dovessero esserci più punti compatibili con la descrizione. Di seguito abbiamo la scrittura delle coordinate nel sistema di riferimento di acquisizione, in questo caso il WGS 84/UTM 32N.

Per concludere, nelle monografie sono presenti anche delle foto utili al riconoscimento del punto sia in loco che in fase di restituzione. Infatti possiamo vedere delle immagini di inquadramento generale prese dall'alto che permettono di avere un'idea del posizionamento del punto nel paese in questione. A queste due immagini segue un immagine presa da terra che permetta di riconoscere il punto "passandoci vicino" ed infine una foto di dettaglio che permetta di sapere in che punto è stata posizionata la palina con l'antenna. Di seguito è riportata la monografia di un punto come esempio e in allegato A il file completo delle monografie.

Località: **Livorno Ferraris**		Data: 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 106	**Foto particolare:**
Descrizione: Griglia		
Ubicazione: Spigolo Nord-Est della griglia ubicata tra Via Saragat e via del Molino		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 427400.732	**H ellissoidica:** 235.039	
Nord: 5014383.659	**h ellissoidica(corretta):** 188.925	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	
Inquadramento generale:		**Foto generale:**

Figura 27: Esempio monografia del punto 106

4 Fase di Restituzione: Analisi dei Ground Control Points per le immagini Nadirali

Abbiamo detto che il rilievo fotogrammetrico può essere, in modo generale, essere suddiviso in due macro fasi. Nel capitolo 3 abbiamo visto la fase del rilievo in campagna, con le due tipologie di rilievo effettuate. In questo capitolo invece affronteremo la fase di restituzione, ovvero la fase che si svolge in ufficio una volta raccolti tutti i dati necessari. A questa fase ci accediamo avendo in input i diversi fotogrammi ed i punti d'appoggio a terra. I fotogrammi che analizzeremo sono quelli a presa Nadirale, ottenute dal primo dei 2 rilievi aerei.

Partiremo con la compensazione del blocco dei fotogrammi con la tecnica delle stelle proiettive (vista nel capitolo 2) utilizzando inizialmente tutti i fotogrammi a nostra disposizione e soprattutto tutti i GCP. Questo ci permetterà di avere una configurazione 0 da poter confrontare con altre soluzioni. In questo capitolo, infatti, sfrutteremo i punti rilevati in diversi modi. Vedremo configurazioni che prevedono l'utilizzo di una metà dei punti d'appoggio come GCP e la restante metà come Check Points (CP). Altre configurazioni con 9 GCP e i restanti punti come CP ed infine anche configurazioni con appena 4 GCP e i restanti punti utilizzati come CP.

Lo scopo di quest'analisi è quella di cercare una soluzione ottimale che faccia risparmiare tempo e personale ma che non comporti una significativa perdita di accuratezza. Infatti, come abbiamo visto nel capitolo 3, per effettuare il rilievo di 45 punti è stato necessario utilizzare 10 operatori suddivisi in due squadre ed è stata impiegata una giornata lavorativa. Riducendo i punti da rilevare a metà, una squadra potrebbe essere risparmiata. Riducendo ancora di più i punti gli operatori potrebbero anche essere ridotti a 2 ed il rilievo essere effettuato in mezza giornata.

Partiamo allora con l'allineamento delle immagini e la creazione del modello.

4.1 Allineamento e Inserimento Marker

Una volta aperto il software Metashape Professional, nell'ambiente di lavoro selezioniamo "workflow" e clicchiamo su "Add Photos". In questo modo carichiamo nel software le immagini che abbiamo ottenuto dal rilievo. In questo capitolo ci occuperemo delle immagini Nadirali per cui una volta finito il caricamento delle immagini avremo a disposizione 563 fotogrammi. Il passo successivo è quello di allineare le immagini. Sempre dal Workflow si seleziona "Align Photos". Il

software esegue quindi l'autocorrelazione che abbiamo visto nel capitolo 2. Avendo un così alto numero di fotogrammi, le cui dimensioni medie sono di 130 Mb ciascuno, la macchina impiegherà qualche minuto per terminare questo processo. Terminato il processo è possibile andare a vedere fotogramma per fotogramma i Tie points (o punti di legame) che sono stati trovati. Per fare questo, nella schermata in basso, dove compaiono tutti i fotogrammi, si clicca con il tasto destro su di un fotogramma e dal menu a tendina si sceglie "view matches".

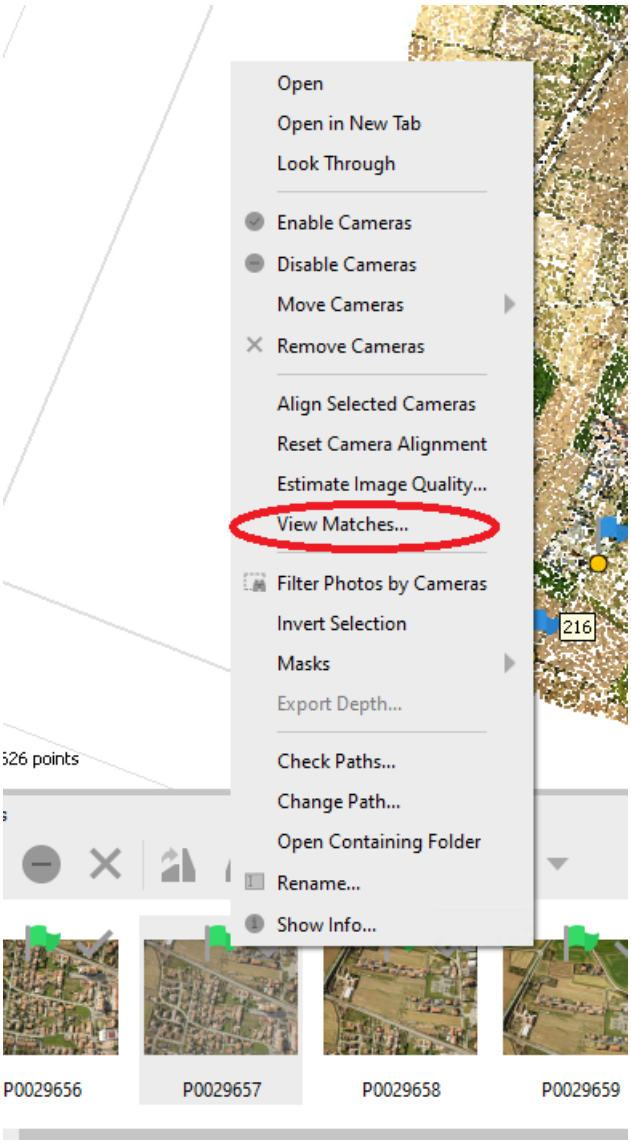


Figura 28: Metashape Professional "View Matches"

Una volta selezionato, si apre l'interfaccia seguente, dalla quale è possibile vedere quanti e quali punti di legame sono stati trovati. Nell'esempio riportato, tra l'immagine P0029657 e l'immagine

P0029947 sono stati trovati 374 punti di legame, 328 dei quali risultano validi, ovvero che hanno trovato una corrispondenza esatta (quelli in blu), e 46 non validi (quelli in rosso).

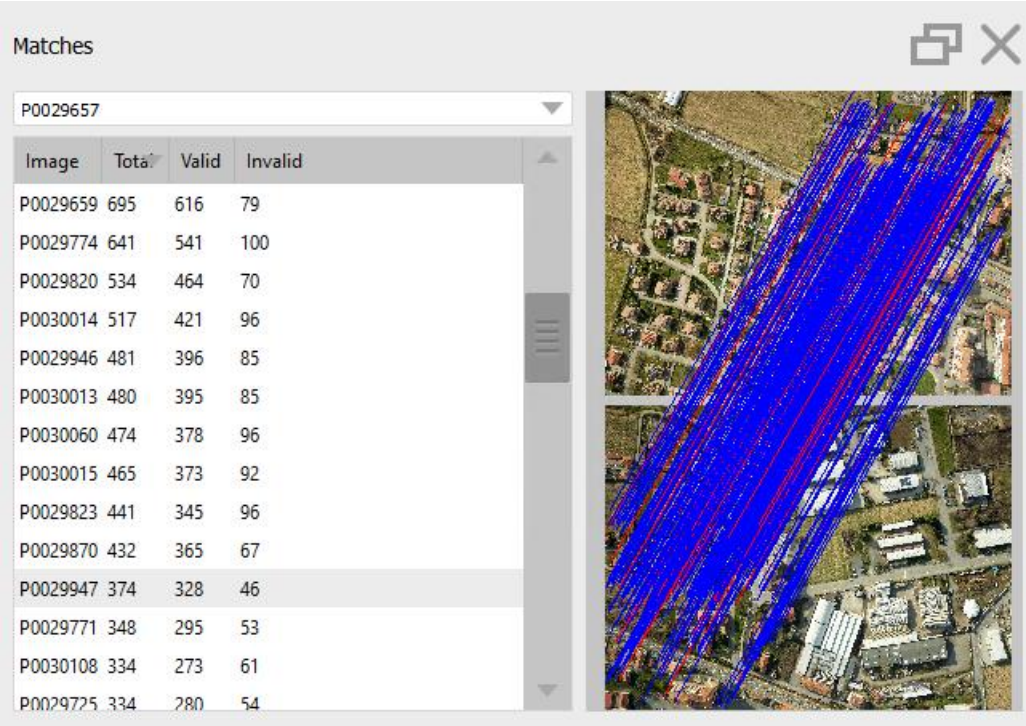


Figura 29: Punti di legame tra due fotogrammi

Al termine della procedura di allineamento, i fotogrammi sono posizionati, tra di loro, come al momento dello scatto. A questo punto inseriamo all'interno del programma i marker, ovvero i GCP ottenuti a seguito del rilievo. Per l'inserimento dei marker, bisogna andare nell'icona alto a sinistra nell'ambiente di lavoro "Reference" di Metashape e cliccare su "Import Reference" e si va a scegliere il file di testo contenente i marker con le relative coordinate.

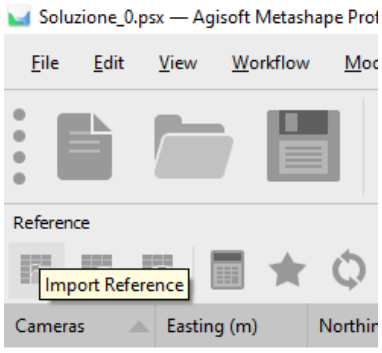


Figura 30: Metashape Professional: "Import Reference"

Selezionato il file di testo e confermato, il software si interfaccia con l'utente come segue:

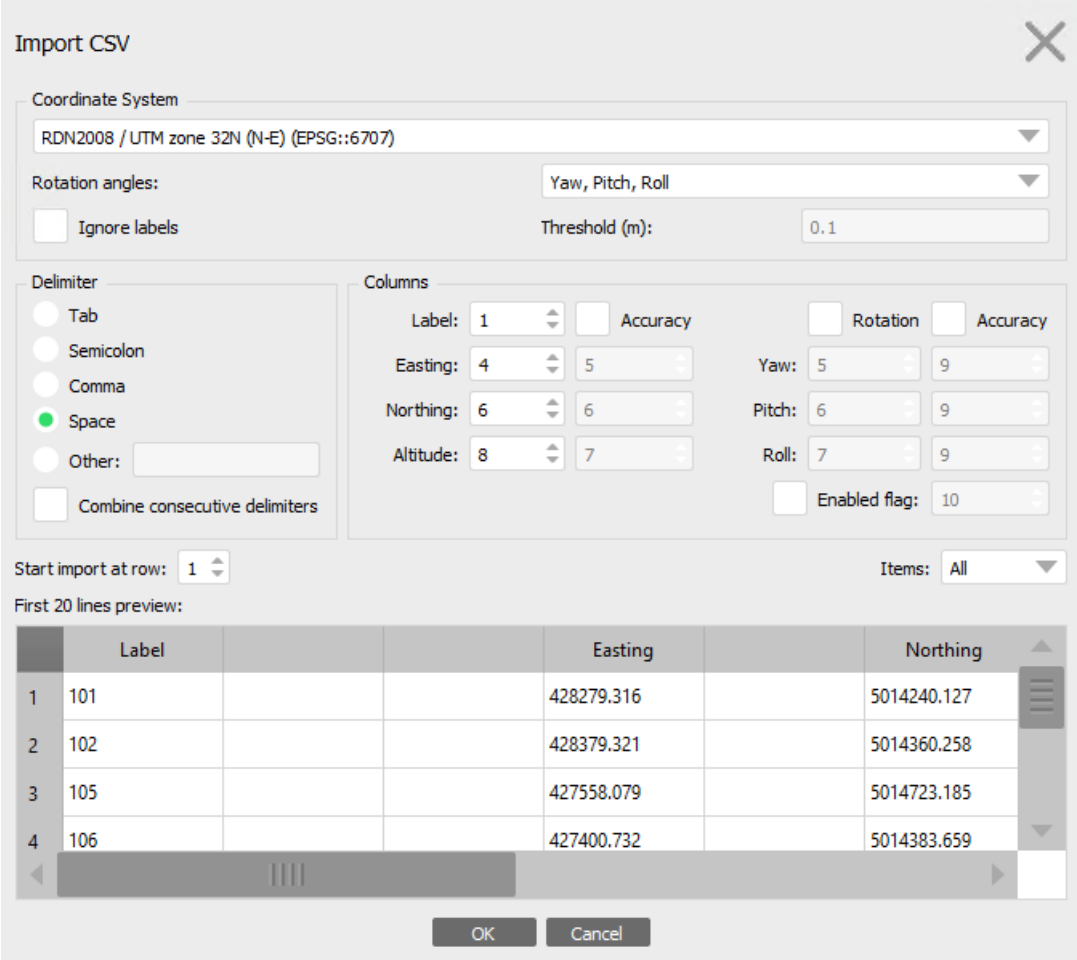


Figura 31: Interfaccia inserimento Marker

Attraverso questa finestra è possibile settare le impostazione di importazione. Bisogna fare particolare attenzione al comando "delimiter". Il software permette di scegliere quale sia la sintassi affinché possa riconoscere le diverse coordinate. Nel nostro caso, impostando su "space" abbiamo impostato che, il carattere che faccia distinguere al software una coordinata da un'altra dello stesso marker sia il semplice spazio.

Una volta inseriti i marker, il software li riconosce come punti di appoggio e li posiziona all'interno del sistema di riferimento dello spazio modello. Tuttavia è impossibile che il modello creato utilizzando i soli fotogrammi risulti nello stesso sistema di riferimento dei marker e che quindi faccia combaciare ogni punto d'appoggio al corrispettivo punto immagine. Solitamente accade che i marker si trovino molto distanti dal modello.

Il problema può essere risolto trascinando 3 o 4 marker sui corrispettivi punti immagine. In questo modo stiamo utilizzando la tecnica delle stelle proiettive per cui i GCP scelti vengono legati al modello e viceversa. Si trova una prima soluzione approssimata ed il modello viene ruotato e scalato nel sistema di riferimento dei marker. A questo punto Marker e modello riescono a comunicare tra di loro poiché si trovano nello stesso sistema di riferimento. In questo modo risulta più semplice posizionare i marker. I restanti marker non posizionati si troveranno in corrispondenza o in prossimità dei rispettivi punti oggetto. Per ciascun marker e ciascun fotogramma contenente quello specifico marker, l'utente dovrà trascinare il marker sul suo punto immagine. Nell'immagine seguente vediamo come venga posizionato il marker 131 sullo spigolo di un chiusino.



Figura 32: Trascinamento del Marker sul punto immagine

Possiamo anche vedere l'interfaccia utente nel momento in cui deve, scrupolosamente, trascinare i marker. Per avere una visuale migliore e meno confusionaria, si può cliccare con il tasto destro sul marker oggetto di posizionamento e si sceglie "Filter Photos by Marker" nel riquadro in basso. Così facendo vengono proposti i soli fotogrammi contenenti quello specifico Marker. In questo modo non è necessario scorrere tutti i fotogrammi e fermarsi solo su quelli che contengono il marker da posizionare. Inoltre, posizionato il marker come nella figura precedente, una short-cut da tastiera utile è "PAG-SU" (o "PAG-GIÙ") che consente di passare al fotogramma successivo (o precedente) mantenendo la stessa percentuale di zoom.

Nel riquadro in basso, possiamo notare delle bandierine di diverso colore, in corrispondenza dei vari fotogrammi. Le bandierine verdi indicano che il marker è stato trascinato e posizionato sul

punto da parte dell'utente, di conseguenza non subirà modifiche automatiche e farà parte nella risoluzione della compensazione.

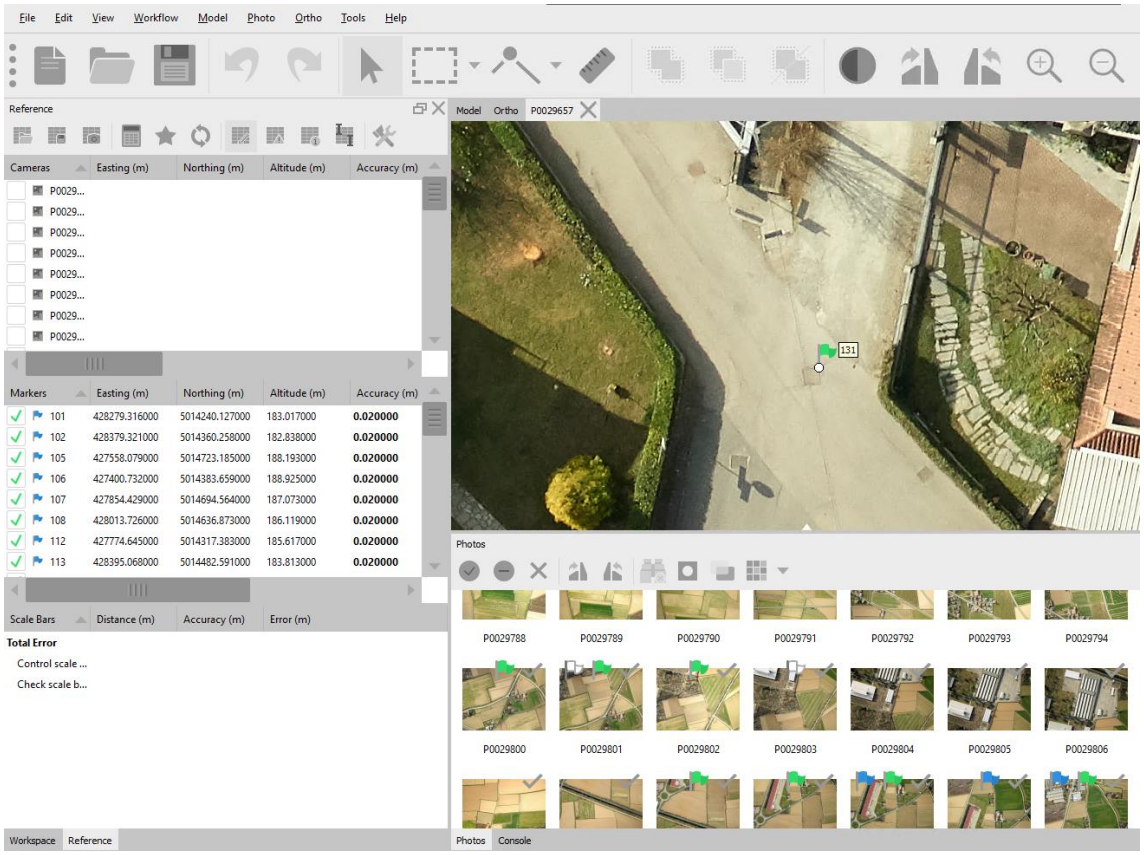


Figura 33: Interfaccia posizionamento Marker

Le bandierine di colore blu sono i marker le cui posizioni vengono suggerite dal software, e non ancora posizionate dall'utente, sulla base dei precedenti marker. L'utente a questo punto deve correggere o confermare la posizione (per correggerla deve spostare il marker nel punto preciso, per confermare può cliccare con il tasto destro sulla bandierina e scegliere "Pin Marker" poiché cliccando con il tasto sinistro senza voler muovere niente, può succedere che venga spostato), facendo passare la bandierina da blu a verde. Il suggerimento della posizione avviene una volta posizionato il primo Marker (bandiera verde). Se l'utente non dovesse confermare la posizione dei marker blu, il software considera nel calcolo questi punti (la bandierina blu dunque è una sorta di silenzio assenso). Infine le bandierine bianche suggeriscono che il marker si trova nei pressi di quella posizione, che l'utente non ha ancora dato conferma e che se non dovesse farlo, quel punto non verrebbe considerato nel calcolo. Infine i fotogrammi senza bandiere indicano che in quel fotogramma non sono presenti Marker.

A questo punto il passaggio successivo è quello della compensazione, ovvero si "chiede" al software di risolvere il sistema di equazioni attraverso i minimi quadrati. Prima di vedere questa parte facciamo alcune considerazioni sui Marker utilizzati.

Nel capitolo precedente abbiamo visto che i marker ottenuti dal rilievo erano 45. Non è stato possibile utilizzarli tutti. Infatti, i marker 162, 211, 216 e 253 sono stati scartati in quanto il loro allineamento sui rispettivi punti immagine è risultato di difficile individuazione. La risoluzione dell'immagine in quel punto non ha permesso di individuarne la posizione. Possiamo dire che spigoli o vertici di segnaletica orizzontale sono ben visibili grazie al forte contrasto con l'asfalto, diversamente da quanto accade per i chiusini, il cui colore scuro è difficilmente distinguibile dal manto stradale.

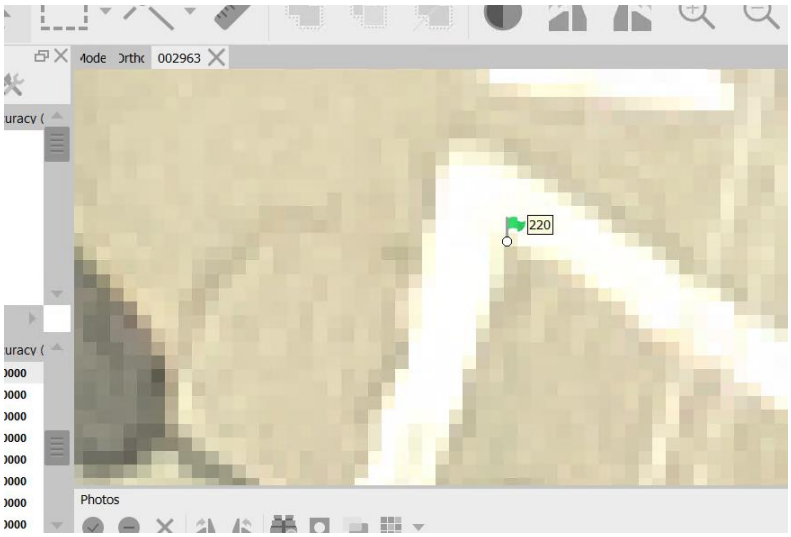


Figura 34: Posizionamento Marker su segnaletica orizzontale

Il suggerimento dunque non è tanto quello di non considerare in generale i chiusini (essi infatti risultano degli ottimi target per un rilievo in quando non sono soggetti a spostamenti o a frequenti lavori di manutenzione come invece può essere la segnaletica orizzontale), ma quello di accertarsi che il contrasto tra il punto oggetto di rilievo e ambiente circostante sia elevato. Nel caso di segnaletica orizzontale, possiamo vederlo nell'immagine precedente, è un ottimo contrasto. Nei casi dubbi è bene, qualora fossero a disposizione, controllare che il punto sia visibile sui fotogrammi. Diversamente quello che può succedere è quanto illustrato nell'immagine successiva.

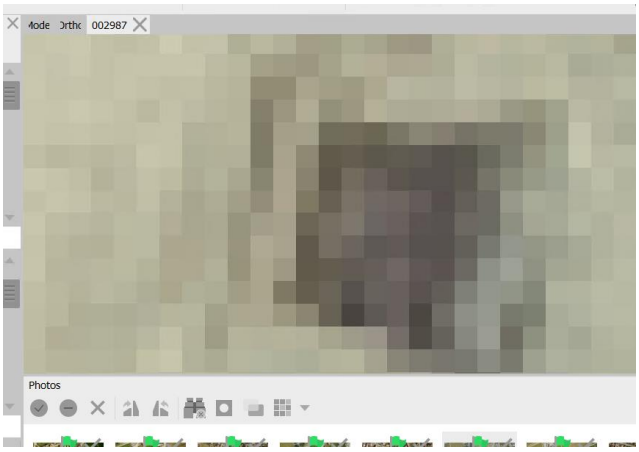


Figura 35: Difficoltà nel riconoscere spigolo del chiusino

4.2 Compensazione del modello: Risoluzione del sistema di equazioni di collinearità

Una volta che ogni marker è stato trascinato al suo posto, possiamo lanciare la compensazione. Per lanciare la compensazione si deve cliccare sull'icona a forma di stella. Una volta cliccata il programma chiederà, qualora non fosse presente il certificato di calibrazione della camera, di selezionare quali parametri della camera verranno stimati.

Cliccando su ok parte la risoluzione del sistema di equazioni provenienti dalle equazioni di collinearità. Il problema generale dei minimi quadrati è un problema del tipo:

$$\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l_0} = \hat{\mathbf{v}}$$

Dove il segno soprassegnato indica che x e v sono quantità stimate. Questa formulazione è scritta in forma matriciale dove A è la matrice dei coefficienti, x è il vettore delle incognite, l_0 è il vettore contenente le osservazioni e v è il vettore degli scarti. Queste quantità sono visibili all'interno di Metashape una volta terminata la compensazione.

Gli scarti sono quel parametro che ci consente di valutare l'affidabilità del modello e possono essere valutati sia sui Ground Control Points, ma anche (e soprattutto) sui **Check Points**. La differenza tra queste due tipologie di punti sta nel fatto che i primi, a differenza dei secondi, vengono considerati in fase di compensazione, ovvero sono i punti di appoggio che vengono utilizzati nella tecnica della triangolazione aerea che abbiamo visto nel capitolo 2. Specifichiamo che i Check Points non sono quei punti contrassegnati dalle bandiere blu. I Check Points sono Marker

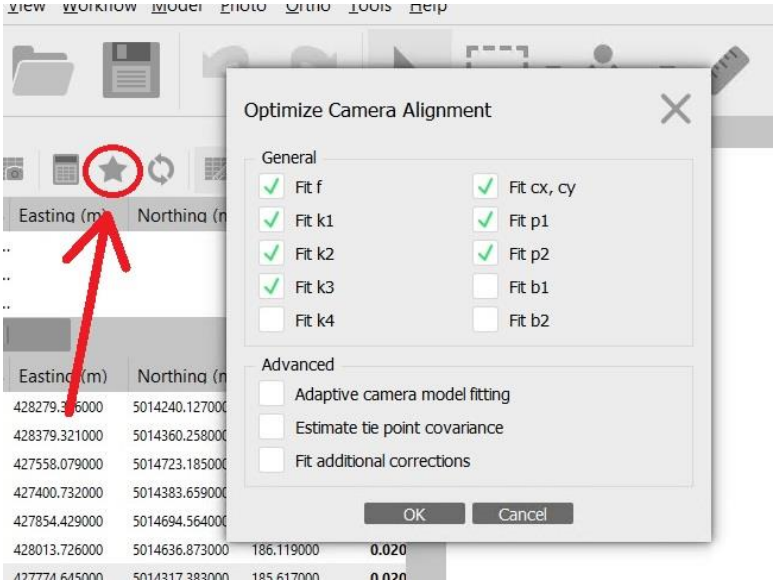


Figura 36: Metashape Professional risoluzione sistema di equazioni di collinearità

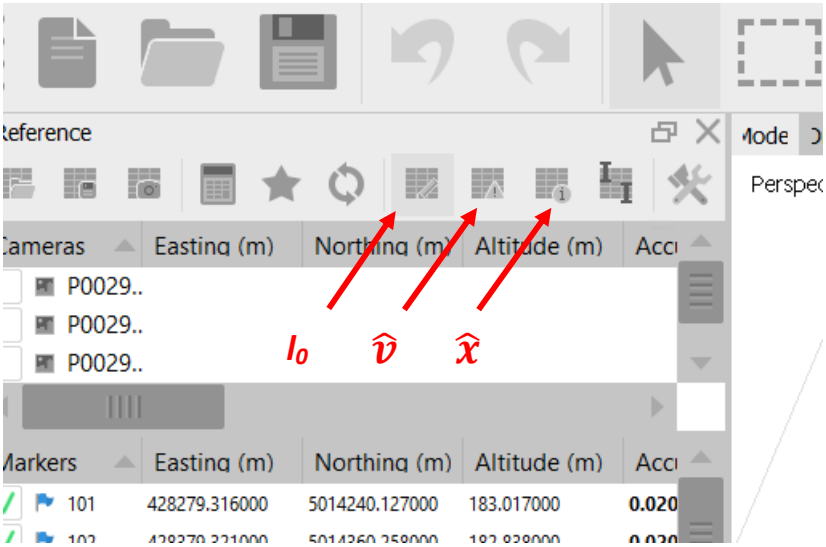


Figura 37: Metashape Professional: Minimi Quadrati

posizionati che però non sono stati considerati nel calcolo. I relativi scarti sono dovuti alle differenze tra la posizione stimata dal software di quel punto e la posizione passata al programma in input tramite marker. Volendo guardare GCP e CP dal punto di vista dei minimi quadrati, i GCP fanno parte del vettore l_0, i CP no.

Possiamo dedurre che il riscontro sulla correttezza dei passaggi svolti e sulla validità del modello passi dai Check Points piuttosto che dai Control Points. Possiamo infatti affermare che il modello è costruito a partire dai Control Points e verificato tramite i Check Points. Per impostare quale

marker deve essere Control Point e quale Check Point è sufficiente mettere o togliere la spunta al marker in questione nel riquadro sulla sinistra dell'immagine successiva. Nello specifico possiamo vedere nella figura successiva come i Marker numero 258 e 259 siano dei Check Points e i Marker 260, 265 e 267 invece dei Control Points. Infine in basso si possono vedere gli scarti complessivi sulle rispettive coordinate.

Markers	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)	Accuracy (m)
258	-0.029073	0.036161	-0.008178	**0.020000**
259	0.044668	0.047981	0.027155	**0.020000**
260	-0.003092	0.010918	0.015257	**0.020000**
265	-0.059405	0.021878	0.018717	**0.020000**
267	0.054493	0.025876	0.058926	**0.020000**
Total Error				
Control points	0.026637	0.024965	0.024844	
Check points	0.037686	0.042484	0.020053	

Figura 38: Control Points e Check Points

La risoluzione del fotogramma è fornita dal concetto di **GSD** (Ground Sample Distance) ovvero la porzione di suolo che viene coperta da un singolo pixel. Il calcolo del GSD dipende dall'altezza di volo H, dalla dimensione del pixel p e dalla distanza principale f.

$$\mathrm{GSD} = \mathrm{H} \cdot \frac{\mathrm{p}}{\mathrm{f}}$$

La quota media di volo è di circa 530 m, la dimensione del pixel è pari a 0.00376 mm e la distanza focale è pari a 51.7 mm. Il valore di GSD è di circa 4 cm.

Possiamo concludere dunque che tutto ciò che è all'interno di un quadrato di dimensioni pari a 4 cm x 4 cm è contenuta in un pixel, che è l'unità più piccola sul fotogramma. Scarti minori di 4 cm sono indice di un buon modello.

4.3 Analisi modello Nadirale al variare dei GCP

Fino a questo momento abbiamo visto che i passaggi necessari per poter creare una nuvola sparsa di punti, che sia roto-traslata e scalata nel sistema di riferimento dei marker, sono delle operazioni semplici e ripetibili a prescindere dal numero di marker o fotogrammi. Infatti se aves-

simo avuto il doppio di marker o dei fotogrammi, i passaggi da seguire sarebbero stati i medesimi. Questi passaggi sono propedeutici all'ottenimento dei prodotti finali elencati nell'introduzione. In questo paragrafo vogliamo analizzare cosa succede diminuendo il numero di GCP e di conseguenza aumentando i CP. Il numero di marker totale sarà sempre 41 ma li useremo in maniera diversa rispetto alla configurazione base, della quale vedremo a breve il risultato.

L'intento di questo capitolo è quello di ottenere un giusto compromesso tra il numero di GCP e i valori degli scarti del modello, per poter ottimizzare il rilievo dei punti d'appoggio. L'ottimizzazione prevede la riduzione di GCP, in modo da poter ridurre le squadre da due ad una sola ed avere un risparmio a livello di personale anche all'interno della squadra stessa. A tal proposito analizzeremo le soluzioni di varie configurazioni di modelli con numero di GCP ridotto e disposti in maniera differente. Ridurre il numero di GCP, ripetiamo, renderebbe possibile anche lo svolgimento del rilievo in solitaria, ovvero con un operatore unico.

L'analisi riguarderà 8 configurazioni su fotogrammi a presa **NADIRALE**, numerate in ordine crescente a partire dalla soluzione 0, nella quale tutti e 41 i marker sono utilizzati come GCP. Seguono 4 configurazioni con il 50% dei marker come GCP e 50% come CP (Configurazione 1, 2, 3 e 4). Un'altra configurazione rappresentate il 25% circa dei marker (9) utilizzati come GCP (configurazione 5) ed infine vedremo 2 configurazioni che sfruttano solo 4 marker come GCP (configurazione 6 e 7). Di seguito possiamo vedere le varie configurazioni con i Marker utilizzati come GCP. Va da sé che i restanti marker avranno il delicato ruolo di CP.

Marker/Configurazione	0	1	2	3	4	5	6	7
101	v	v		v				
102	v	v		v		v		
105	v	v		v	v			
106	v	v		v	v			
107	v	v		v	v			
108	v	v			v			
112	v	v			v			
113	v	v		v				
123	v	v						
124	v	v		v		v	v	
131	v	v			v			
132	v	v			v			
133	v	v		v		v		
141	v	v						
148	v	v		v		v		v
161	v	v		v	v			
163	v	v			v		v	
173	v	v			v			

174	v	v			v			
210	v		v		v	v		v
215	v		v		v			
220	v		v	v	v			
221	v		v	v		v		
226	v		v	v				v
227	v		v					
235	v		v	v			v	
238	v		v			v		
242	v		v					
243	v		v			v		
245	v		v	v				
246	v		v	v				v
247	v		v					
249	v		v			v		
250	v		v					
252	v		v	v	v			
255	v		v	v	v			
258	v		v		v			
259	v		v	v			v	
260	v		v	v				
265	v		v		v			
267	v							

Tabella 3: Configurazioni dei marker utilizzati come GCP

Vedremo che, in base ai risultati, la soluzione può essere ottimizzata pagando tuttavia qualcosa in termini di precisione altimetrica.

4.3.1 La configurazione 0

La configurazione 0 vede l'utilizzo di tutti i marker come Ground Control Points, di conseguenza in questa configurazione non avremo Check Points. Questo vuol dire che il modello è interamente basato sui punti rilevati. Abbiamo infatti più volte detto che i GCP sono i punti dai quali, come visto nella spiegazione della tecnica delle stelle proiettive, i raggi proiettivi cercano di passare il più vicino possibile.

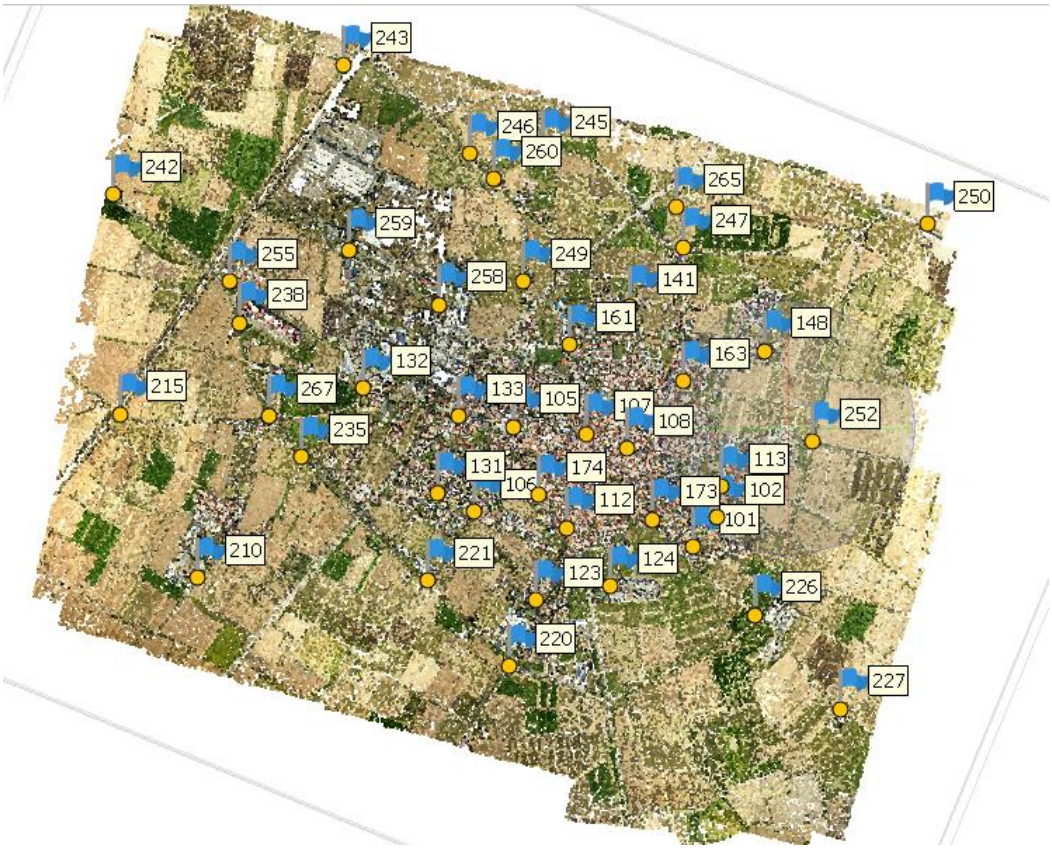


Figura 39: Soluzione 0

Control Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
2.74	2.55	2.46	4.48
Check Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
0.00	0.00	0.00	0.00

Tabella 4: Scarti Configurazione 0

Nell'immagine precedente possiamo vedere la disposizione dei GCP sulla nuvola di punti sparsa. Nella tabella sono riportati i valori degli scarti per le varie coordinate. Il modello sembra ottimo in quanto le coordinate stimate da quelle rilevate di discostano mediamente di 2.74 cm, nel peggiore dei casi, e di 2.46 cm nel migliore. Tornando indietro al calco del GSD possiamo vedere come questo modello sembri molto affidabile poiché avevamo ottenuto che il pixel, unità di misura più piccola ottenibile sulle coordinate immagine, copriva 4 cm per lato. Di conseguenza uno scarto del genere è contenuto interamente in un pixel, o al più a cavallo tra due pixel. Non potendo scendere al di sotto del pixel il modello è da ritenersi ottimo.

4.3.2 La configurazione 1

Nel paragrafo 3.2.2 abbiamo visto come il gruppo di operatori sia stato diviso in due squadre, le quali avrebbero coperto una zone differenti di territorio. Ogni squadra ha rilevato circa metà dei punti totali. Le configurazioni 1 e 2 sono dunque facilmente intuibili. La distinzione tra le due configurazioni non è solamente dovuta al numero di squadra, ma anche alle loro zone di pertinenza. Seguendo questa distinzione vedremo infatti 2 modelli: uno centrale e uno perimetrale.

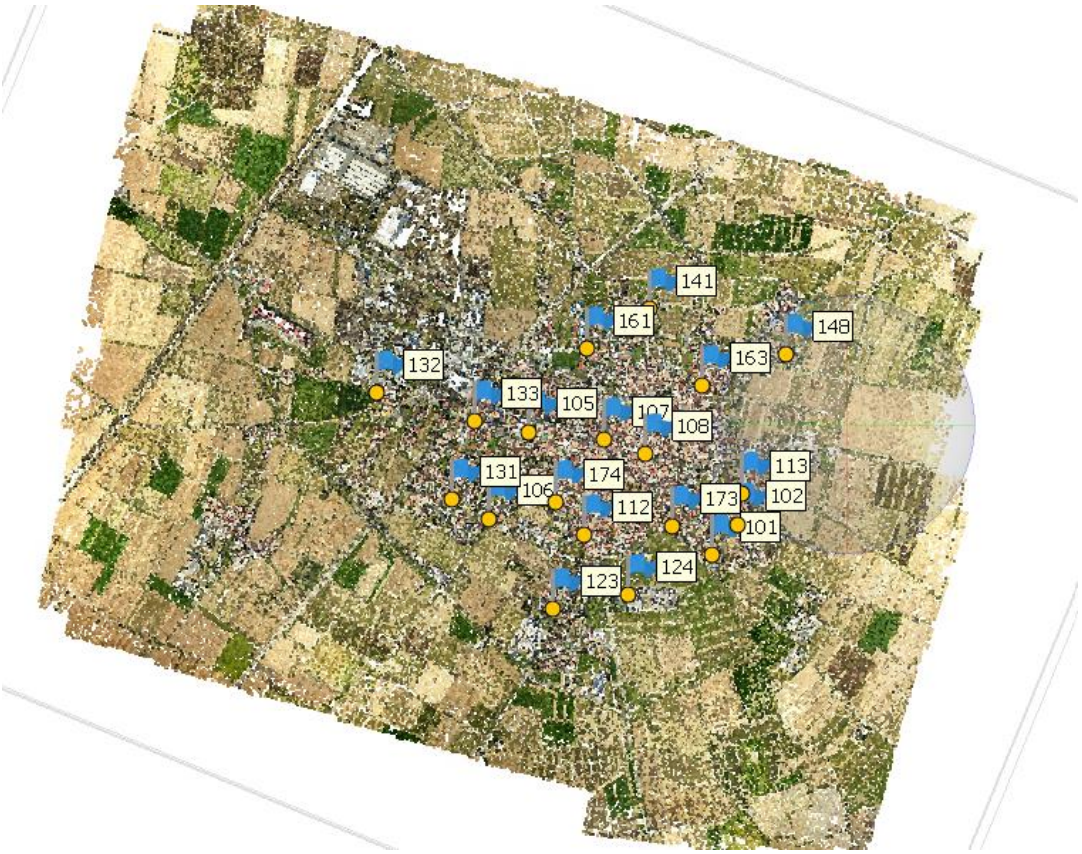


Figura 40: Configurazione 1

Nella configurazione 1, infatti, abbiamo come GCP solo i punti rilevati dalla Squadra 1 mentre i marker relativi alla squadra 2 sono utilizzati come CP. Questo vuol dire che la nuvola densa passerà quanto più vicino possibile ai punti la cui prima cifra è 1, ignorando nel calcolo i punti della squadra 2, utilizzati solo per confronto tra posizione teorica (quella calcolata dal programma) e posizione reale (quella delle monografie). Di seguito possiamo vedere i risultati.

Control Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
2.20	2.43	2.47	4.10
Check Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
4.11	3.70	16.91	17.79

Tabella 5: Scarti configurazione 1

Come potevamo prevedere gli scarti sui Control Point rimangono bassi poiché fanno parte della creazione del modello. Di contro i Check Points aumentano e la coordinata Est supera i 4 cm che avevamo di GSD. In altimetria lo scarto risulta molto elevato raggiungendo un valore circa 4 volte superiore ai valori planimetrici. L'elevato scarto altimetrico può essere dovuto al fatto che i punti siano concentrati in una zona, ma soprattutto che i punti rilevati si trovano alla medesima quota, come vedremo più avanti. In seguito in fatti vedremo che il rilievo oggetto d'esame presenta un andamento pianeggiante.

4.3.3 La configurazione 2

Possiamo definire la configurazione 2 la complementare della 1. Infatti in questa configurazioni come GCP sono usati i marker rilevati dalla squadra 2 e come CP quelli della squadra 1. Vediamo nell'immagine sottostante come i punti siano disposti nella parte periferica del centro abitato.

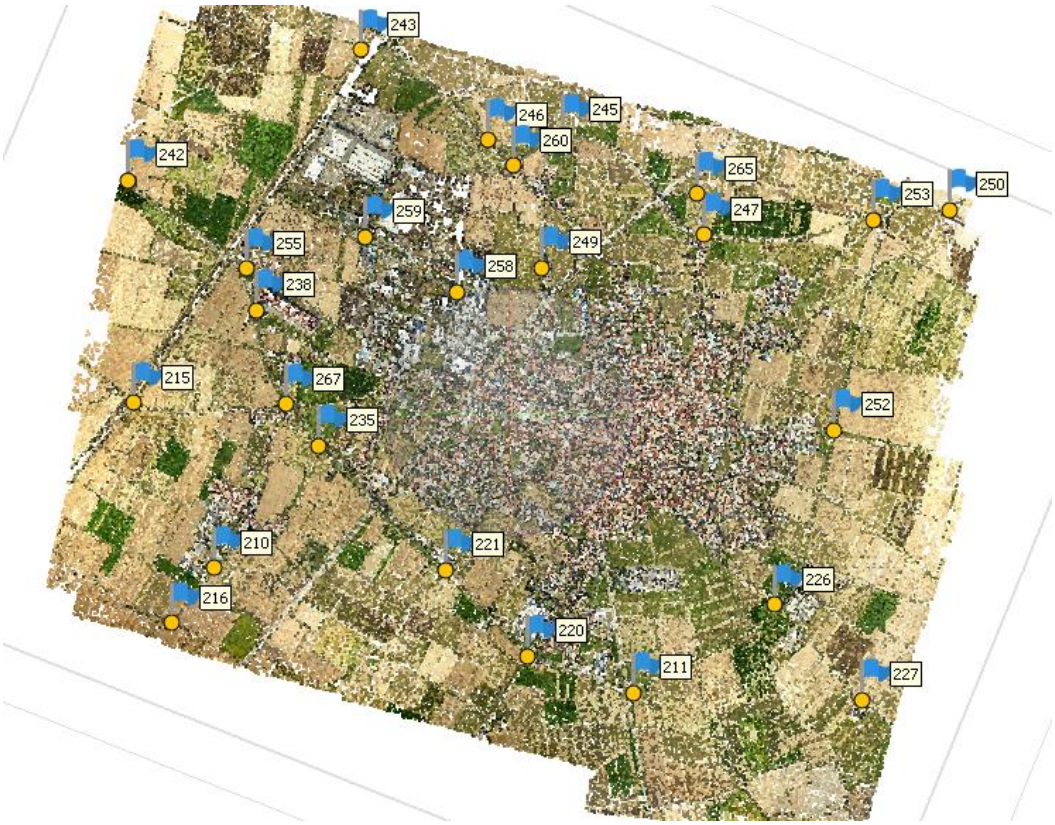


Figura 41: Configurazione 2

Control Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
3.40	2.62	2.62	5.03
Check Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
2.45	3.11	5.44	6.73

Tabella 6: Scarti Configurazione 2

Anche in questo caso, ma vedremo che per tutte le configurazioni sarà così, gli scarti sui Ground Control Points sono contenuti, per i motivi che fino a questo momento abbiamo più volte ripetuto. Vediamo che lo scarto planimetrico (sulle coordinate Est e Nord) risulta inferiore a 4 cm. In altimetria lo scarto è decisamente più basso rispetto a quello della configurazione 1. Dispo-

nendo in questo modo i GCP il modello sembra adattarsi meglio all'andamento altimetrico. Infatti i punti su cui si appoggia il modello sono ben distribuiti. Avere una soluzione di questo tipo comporterebbe già ridurre il numero di squadre da due ad una non avendo una significativa perdita in termini di scarti.

4.3.4 La configurazione 3

Abbiamo visto le prime due configurazioni suddivise in "punti interni" e "punti esterni". L'idea a questo punto è di vedere cosa succede qualora un modello influenzasse l'altro. Nella configurazione 3 si parte dal modello aventi solo punti periferici ai quali si aggiungono pochi punti centrali. Ci troviamo ancora nel caso in cui stiamo utilizzando la metà dei marker come GCP e la restante metà come CP. Va da sé che dovendo rimanere circa 20 i punti di appoggio, è stato rimosso qualche punto perimetrale. La configurazione la possiamo vedere di seguito.

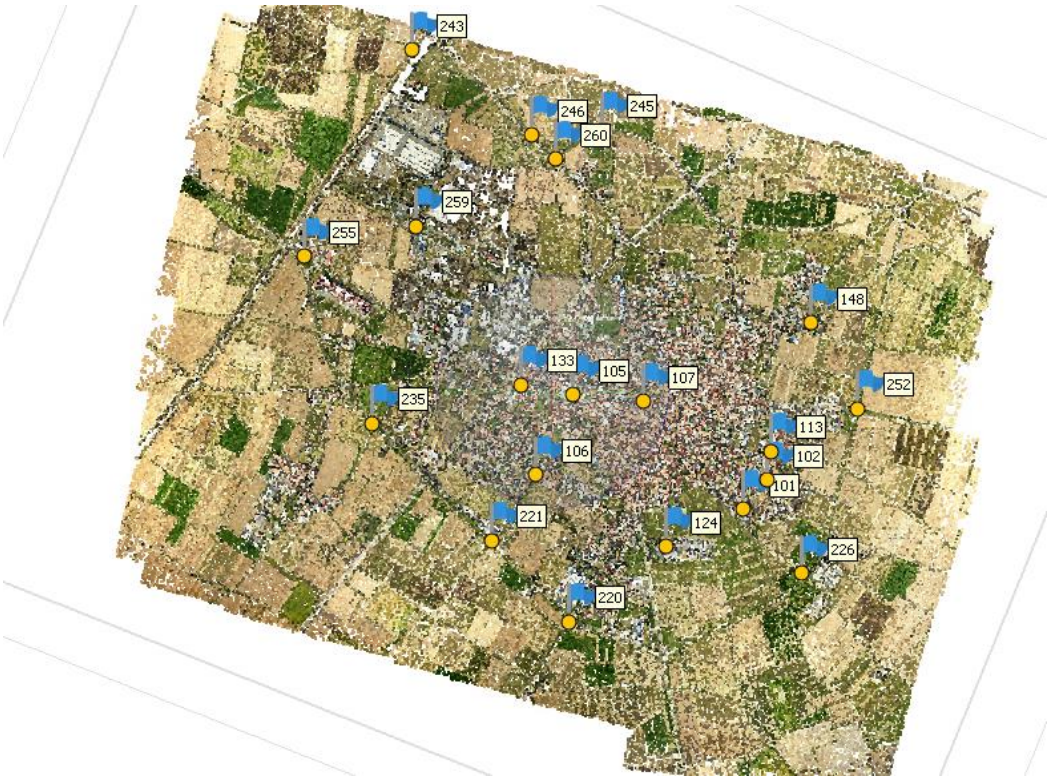


Figura 42: Configurazione 3

Con questa configurazione vogliamo vedere se, aggiungendo punti centrali, si riesce ad affinare la soluzione data nella configurazione 2. Nella tabella seguente possiamo vedere gli scarti ottenuti.

Control Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
2.41	2.51	2.70	4.40
Check Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
4.11	4.06	10.33	11.84

Tabella 7: Scarti Configurazione 3

A livello planimetrico la soluzione resta buona (e lo sarà per tutte le configurazioni). Vediamo che in questo modo non riusciamo ad ottenere una miglioria in termini di scarti altimetrici sulla configurazione 2, tuttavia otteniamo un risultato migliore rispetto alla soluzione 1 che in altimetria aveva uno scarto di 16.91 cm. Possiamo dunque pensare che un rilievo avente punti di appoggio distribuiti perimetralmente o comunque su tutta la superficie approssimi meglio l'andamento altimetrico.

4.3.5 La configurazione 4

Nella configurazione 4 allora vengono aumentati i GCP presenti all'interno e diminuiti quelli esterni (la somma deve essere comunque pari a circa la metà dei marker). Ci aspettiamo dunque, dall'andamento degli scarti, che il valore degli scarti planimetrici sia contenuto e che lo scarto altimetrico sia peggiore delle configurazioni 2 e 3 ma migliore della configurazione 1. Questo ce lo aspettiamo perché l'idea di fondo di questa configurazione è quella di avere un buon numero di GCP centrali e solo alcuni punti periferici (caso duale del precedente). Infatti in questa configurazione abbiamo 7 GCP esterni e 12 interni (nella configurazione 3 avevamo 14 punti esterni e 5 interni).

Control Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
2.33	2.45	1.75	3.80
Check Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
3.53	5.31	13.50	14.93

Tabella 8: Scarti Configurazione 4

L'andamento degli scarti conferma le aspettative. Vediamo che in planimetria il modello resta buono, in altimetria lo scarto è 13.50 cm, minore di 16.91 della configurazione con soli punti centrali ma maggiore delle altre due configurazioni.

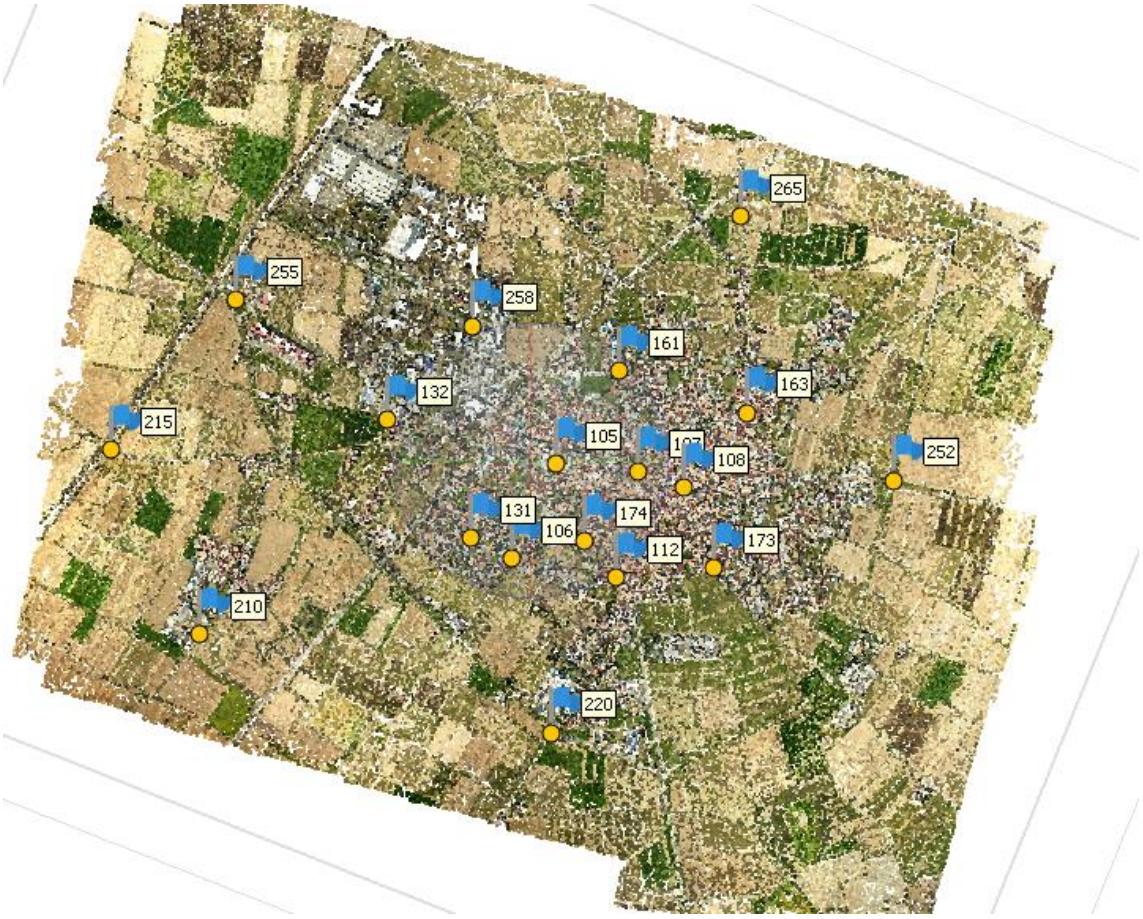


Figura 43: Configurazione 4

Una prima considerazione che possiamo fare è che sicuramente avere una distribuzione di GCP estesa a tutta la superficie, nel dettaglio che sia ben distribuita lungo zone perimetrali, riesca a "stretchare" in maniera più efficace la nuvola di punti in modo da avere coordinate dei punti più vicine a quelle rilevate. Una seconda considerazione che si allaccia alla prima è che avere una discreta densità di punti in una zona tendenzialmente pianeggiante porta a non definire adeguatamente l'andamento altimetrico. Vedremo nelle prossime configurazioni che diminuire ancora i punti appoggio non porterà ad avere migliorie significative.

4.3.6 La configurazione 5

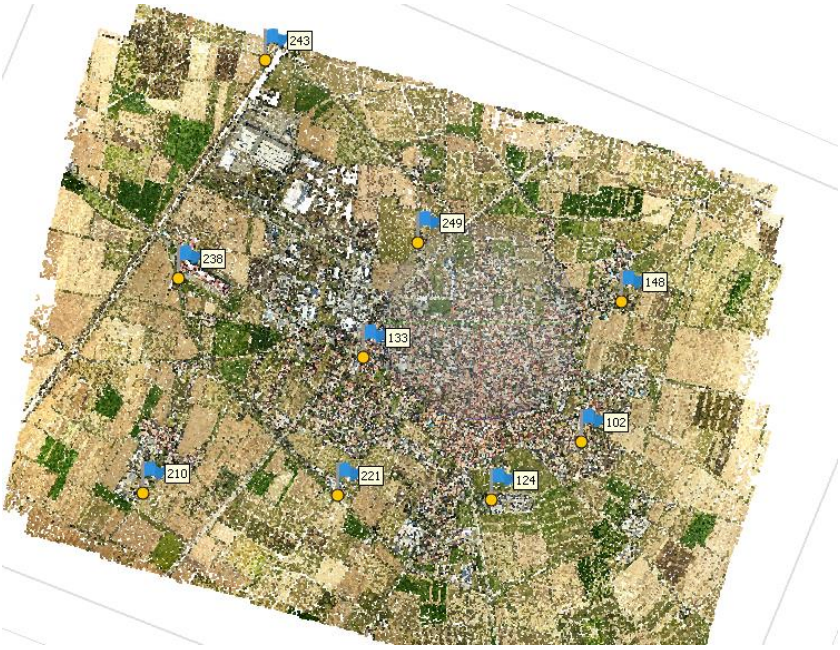


Figura 44: Configurazione 5

Nella configurazione 5 portiamo il numero di Ground Control Points al 25% circa dei marker. in questa configurazione vengono usati 9 GCP distribuiti su tutta la superficie, lo vediamo nella figura precedente. Abbiamo 8 punti che possono essere definiti perimetrali al centro urbano e uno centrale. Nella tabella successiva vediamo gli scarti.

Control Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
2.56	2.63	2.53	4.46
Check Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
4.07	2.66	10.15	11.26

Tabella 9: Scarti Configurazione 5

Ancora una volta in planimetria gli scarti sono bassi. In altimetria lo scarto è paragonabile (è addirittura minore) dello scarto della configurazione 3. Questo è spiegabile in quanto la disposizione dei marker è perlopiù perimetrale. Infatti 8 marker su 9 sono esterni e solo uno è centrale. C'è coerenza con la configurazione 3. Nonostante questo la soluzione è ancora peggiore rispetto

alla numero 2 dove lo scarto altimetrico era di 5.44 cm. Dover rilevare solo 9 punti comporterebbe sicuramente l'utilizzo di una sola squadra, inoltre basterebbe solo mezza giornata lavorativa per portar a termine il rilievo. Dunque, pagando un prezzo in termini di precisione altimetrica, portando ad un quarto i GCP si riducono le risorse in termini di tempo e di manodopera ad un quarto rispetto al punto di partenza.

4.3.7 La configurazione 6

Nelle prossime due configurazione portiamo i marker utilizzati come punti di appoggio per la nuvola di punti a 4.

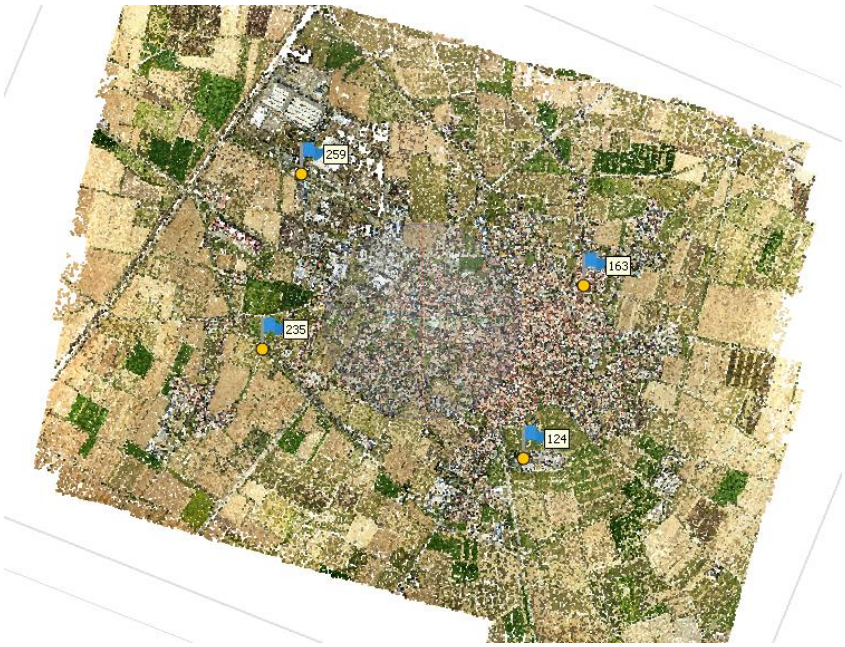


Figura 45: Configurazione 6

Control Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
2.45	1.45	2.57	3.84
Check Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
3.92	3.99	21.78	22.48

Tabella 10: Scarti Configurazione 6

Possiamo vedere che facendo diminuire fino a 4 i GCP lo scarto altimetrico aumenta particolarmente fino al valore di 21.78 cm. Questa soluzione, che ancora una volta in planimetria è abbastanza robusta, ha un'incertezza elevata per quanto riguarda l'altimetria.

4.3.8 La configurazione 7

Anche questa configurazione si basa su 4 GCP. Notiamo però che in questa configurazione i punti di appoggio sono posizionati in punti più esterni rispetto alla precedente.

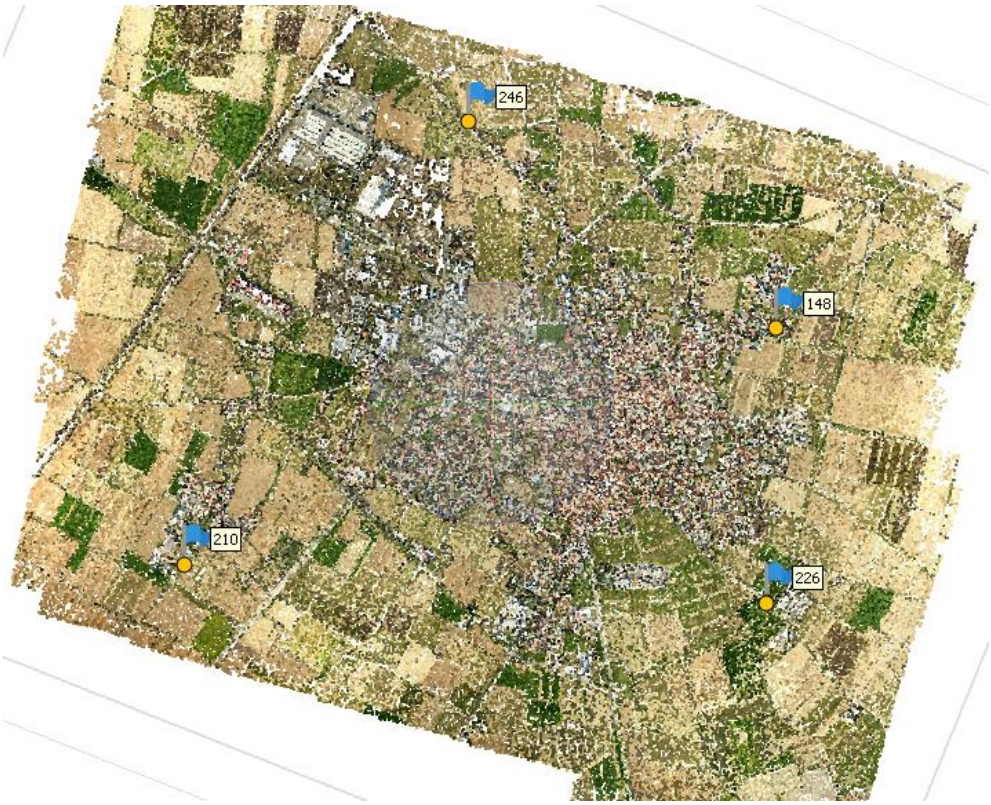


Figura 46: Configurazione 7

Control Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
0.87	2.71	1.74	3.34
Check Points			
Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
5.50	3.33	19.18	20.23

Tabella 11: Scarti Configurazione 7

Gli scarti planimetrici sono ancora una volta paragonabili a tutte le configurazioni. In quest'ultima configurazione l'altimetria diminuisce di 2.6 cm. Anche in questo caso, allargando il raggio d'azione dei GCP, disponendoli quindi in maniera più larga, rispetto al centro del rilievo, si ottiene una riduzione degli scarti. Tuttavia l'incertezza della soluzione è ancora elevata.

4.4 Conclusioni

Nei precedenti paragrafi abbiamo visto come variano gli scarti facendo variare il numero e la disposizione dei GCP. Riportiamo di seguito in una tabella tutte le configurazioni con i relativi scarti sui Check Points (riportare anche gli scarti sui Control Points è poco utile in quanto come abbiamo visto sono poco interessanti ai fini conclusivi).

	Check Points			
	Est (x) [cm]	**Nord (y) [cm]**	**Altitudine (z) [cm]**	**Tot Error [cm]**
Configurazione 0	0.00	0.00	0.00	0.00
Configurazione 1	4.11	3.70	16.91	17.79
Configurazione 2	2.45	3.11	5.44	6.73
Configurazione 3	4.11	4.06	10.33	11.84
Configurazione 4	3.53	5.31	13.50	14.93
Configurazione 5	4.07	2.66	10.15	11.26
Configurazione 6	3.92	3.99	21.78	22.48
Configurazione 7	5.50	3.33	19.18	20.23

Tabella 12: Riepilogo Scarti su Check Points

Lo studio dei Check Points ci ha permesso di valutare l'affidabilità dei modelli ottenuti. Possiamo affermare che in planimetria, quindi guardando le coordinate Est-Nord, il modello risulta decisamente accurato e gli scarti sono quasi interamente contenuti nei 4 cm del GSD. Discorso più complicato per quanto riguarda gli scarti sull'altimetria.

Se per quanto concerne la planimetria confrontare i risultati con il valore del GSD aveva un senso fisico, essendo il GSD il grado di campionamento del pixel, per l'altimetria il valore degli scarti va confrontato con le precisioni ottenibili in funzione del rilievo. Lo squarto quadratico medio sulla quota è calcolato come segue:

$$\sigma_z = \frac{H \cdot H}{c \cdot B} \sigma_{px}$$

Dove i termini indicano:

- H: altezza relativa di volo;
- C: distanza principale della camera
- B: distanza di presa tra due fotogrammi;
- σ_{px}: precisione del pixel che per processi di autocorrelazione vale 0.2 volte la dimensione del pixel.

Anticipando i valori che verranno calcolati nel capitolo successivo possiamo dire che la quota media di volo H è circa pari a 530 m, che la distanza di presa tra due fotogrammi B successivi è circa di 130 m, la distanza principale c è pari a 51.7 mm ed infine la dimensione del pixel è di 0.00376 mm. Eseguendo il calcolo allora, la precisione ottenibile per misure di quota σ_z è pari a 3.14 cm, valore più restringente del GSD. Le considerazioni fatte configurazione per configurazione restano dunque le stesse.

La configurazione 2 sembra la migliore configurazione possibile tra quelle che utilizzano metà dei marker come Check Points e metà come Control Points, con 5.44 cm di scarto altimetrico. Si può affermare che l'utilizzo di punti perimetrali, per la generazione del modello, porta ad avere un livello di accuratezza quasi accettabile. Le altre configurazioni con 21 Control Points presentano scarti altimetrici che superano 10 cm. Analizzando nello specifico queste configurazioni risulta evidente quanto la variabilità della disposizione dei marker influisca sullo scarto altimetrico, in quanto, utilizzando lo stesso numero di marker disposti in maniera differente, gli scarti differiscono tra di loro diversi centimetri (10.33, 13.50, 16.91). Non possiamo affermare con certezza che utilizzare il 50% dei marker, nei confronti della configurazione 0, sia una soluzione migliore, ma possiamo certamente dire che se volessimo ottimizzare le operazioni diminuendo i punti d'appoggio da rilevare, è preferibile avere punti distribuiti sulle zone periferiche. Possiamo infatti vedere anche dal grafico successivo che al diminuire dei GCP presenti nella parte periferica della superficie, aumenta lo scarto altimetrico.

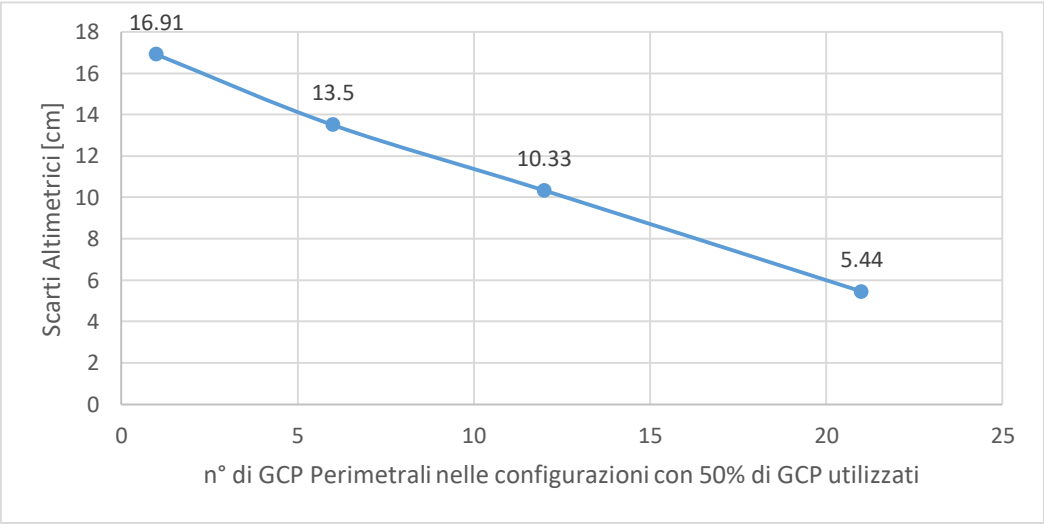


Figura 47: Andamento degli scarti altimetrici al variare del numero di GCP perimetrali presenti nelle configurazioni che sfruttano il 50% dei marker come Ground Control Point

Il grafico precedente mostra come, mantenendo costante il numero di GCP utilizzati (metà circa dei marker utilizzati come GCP e metà come CP), lo scarto altimetrico aumenti al diminuire dei punti di appoggio presenti nelle zone periferiche. Questo, come abbiamo già accennato nei paragrafi precedenti, potrebbe essere dovuto al fatto che concentrando in una zona numerosi punti si tenda a non fissare bene l'intero modello, anche a causa della poca variazione di quota del sito. Infatti se analizzassimo le quote relative ai marker otterremmo che:

Media [m]	Max [m]	Min [m]	Sqm [m]
189.08	202.79	179.87	5.50

Tabella 13: Valori statistici quote Marker

Questi dati indicano che, l'andamento altimetrico medio del comune di Livorno Ferraris è contenuto in 20 m. Per ovviare a questa situazione avremmo dovuto rilevare punti con quote significativamente diverse, come per esempio la cima un edificio come la Chiesa Parrocchiale di San Lorenzo in piazza Pietro Micca con quota superiore alla media di circa 45 m. Andare alla ricerca e stazionare su punti così scomodi comporta un elevato impiego di tempo (e noi stiamo cercando di ridurlo). Un soluzione più fattibile sarebbe quella di effettuare un volo fotogrammetrico ad una quota differente, in modo da avere un set di fotogrammi presi da un'altezza maggiore che portano ad intersezioni diverse di raggi omologhi, rispetto alle intersezioni di due fotogrammi complanari.

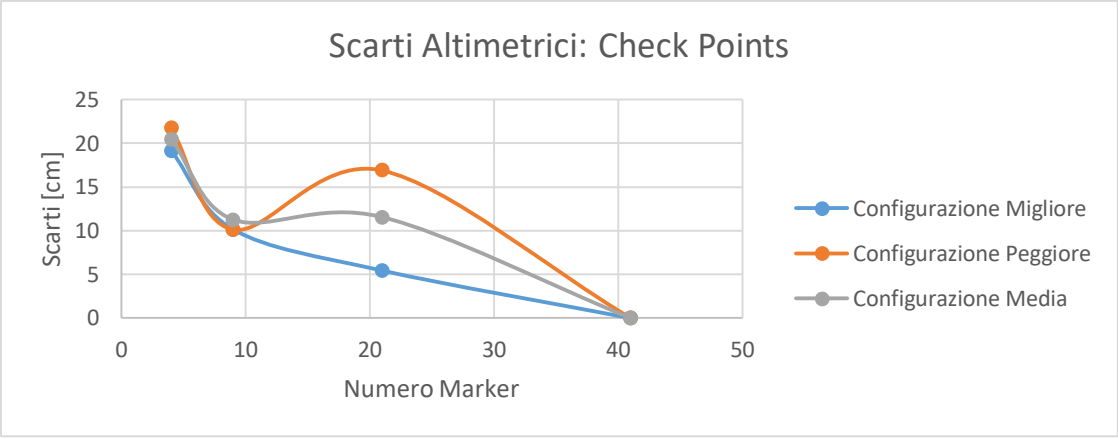


Figura 48: Andamento scarti Altimetrici: Check Points

Possiamo vedere che al diminuire dei Control Points, aumenta il livello di incertezza altimetrico del modello e di conseguenza gli scarti sui Check Points. Anche in questo caso l'incertezza può essere attribuita alla planarità del sito. Riducendo i GCP stiamo dando meno punti di riferimento al modello. Nel grafico sono presenti 3 curve. La migliore, che tiene conto del minimo scarto presente tra le configurazioni a pari numero di Control Points, la peggiore, con il massimo degli scarti, ed infine la media.

Per completezza si riporta il grafico sugli andamenti degli scarti planimetrici. Sebbene gli andamenti siano qualitativamente simili a quelli altimetrici, quantitativamente non sono paragonabili. Infatti mediamente gli scarti non arrivano a toccare i 7 centimetri nella condizione peggiore, mentre negli scarti altimetrici la condizione peggiore prevede un scarto dal valore triplo.

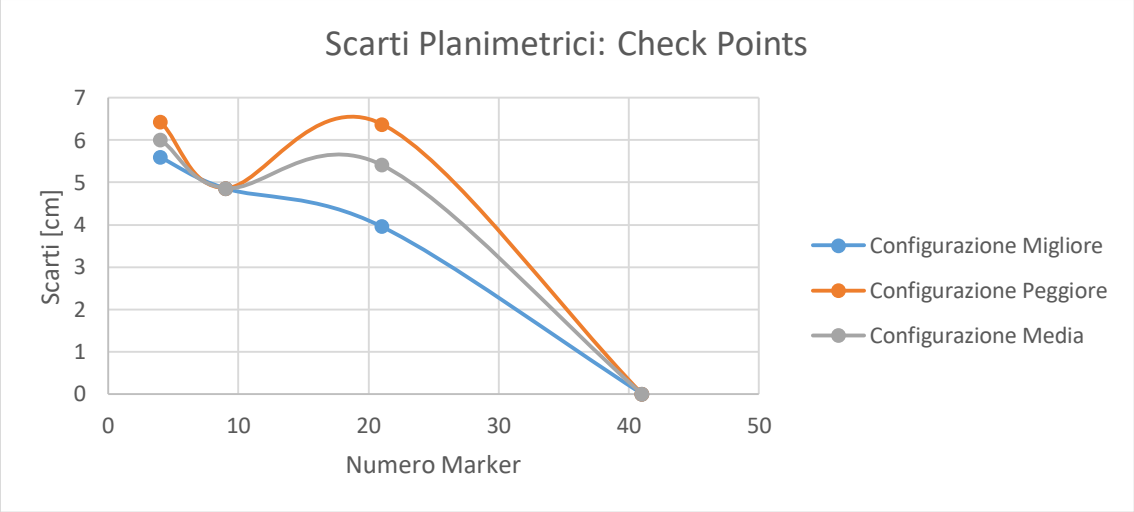


Figura 49: Andamento scarti Planimetrici: Check Points

Il grafico precedente comprende sia gli scarti lungo la coordinata Est che la Coordinata Nord, uniti in un unico valore (radiale) per ogni combinazione secondo la formula:

$$\text{Scarto} = \sqrt{(\text{Coordinata Est})^2 + (\text{Coordinata Nord})^2}$$

5 Fase di Restituzione: Analisi sui ricoprimenti dei fotogrammi per le immagini Nadirali

Come abbiamo precedentemente accennato, stiamo cercando di ottimizzare il rilievo effettuato in termini di operazioni, tempo e personale. Nel capitolo precedente abbiamo analizzato la variabile Ground Control Points, in questo capitolo, in virtù di quanto ottenuto nel precedente proviamo a studiare come si comporta il modello se, sulla base delle configurazioni studiate, diminuissimo il numero di fotogrammi. Ottimizzare il problema da questo punto di vista comporta avere un risparmio in termini di tempistiche di volo, che ha come conseguenza un minor uso di carburante. Questo si traduce anche in un risparmio economico. Non è possibile ottenere un risparmio sul personale in quanto il velivolo deve essere comunque pilotato, che si tratti di un drone o di un velivolo più grande, come quello in questione. Ridurre i fotogrammi in maniera significativa vuol dire anche ridurre il tempo macchina impiegato in fase di restituzione da parte del computer, per alcune operazioni infatti sono state necessarie ore di processamento. Proveremo dunque a rispondere al quesito che ci siamo posti: è meglio ridurre il numero di punti rilevati o ridurre il numero dei fotogrammi? Possiamo anticipare dicendo che una soluzione troverà posto nella via di mezzo.

In questo capitolo analizzeremo il livello di ricoprimento dei fotogrammi si in direzione della strisciata (direzione di percorrenza del velivolo) che in direzione trasversale (tra strisciate adiacenti percorse dal velivolo). Il ricoprimento altro non è che il grado di sovrapposizione di un fotogramma con il successivo, nel caso di ricoprimento longitudinale, adiacente, nel caso di ricoprimento trasversale. Avere un buon grado di ricoprimento è indispensabile, in quanto, come visto nel secondo capitolo, un punto oggetto deve essere contenuto in almeno due fotogrammi.

La fotogrammetria classica prevede ricoprimenti trasversali compresi tra il 20% ed il 60% ed un ricoprimento minimo, per quanto riguarda la direzione longitudinale, del 60%. L'obiettivo di questo capitolo è quello di valutare il grado di ricoprimento del rilievo in un primo momento, e, noto che sia, ridurre, ove possibile, il numero di fotogrammi utilizzati. Alla luce di ciò che vedremo, possiamo dire che in direzione longitudinale abbiamo poco margine di manovra e non sarà possibile diminuire il numero di fotogrammi per la singola strisciata. Questo è dovuto al fatto che l'acquisizione delle immagini è avvenuta tenendo il lato lungo del fotogramma ortogonalmente alla direzione della strisciata. Una maggiore casistica invece la avremo in direzione trasversale.

Analizzeremo prima cosa accade su 5 strisciate adiacenti. Verrà poi fatta l'ipotesi di poter estendere il risultato all'intero modello in quanto siamo in presenza di una maglia regolare formata da, come abbiamo visto nel capitolo 3, 21 strisciate composte da 24 fotogrammi ciascuna.

Concludiamo la presentazione del capitolo dicendo che, per il calcolo dei ricoprimenti è necessario avere le distanze tra i centri di presa dei fotogrammi, ricavabile dalla posizione stimata di ciascuno nella configurazione 0 del capitolo precedente.

5.1 Calcolo del Ricoprimento Longitudinale (RL)

Per il calcolo del ricoprimento trasversale abbiamo bisogno dell'altezza relativa di volo H e della distanza tra i centri di presa dei fotogrammi. I centri di presa delle camere sono stati stimati nel momento della generazione della nuvola di punti del paragrafo precedente. Avevamo visto che con la tecnica delle stelle proiettive tutto il sistema di equazioni è stimato in blocco. Avendo oltre 560 fotogrammi non riportiamo le varianze della posizione di ogni singolo fotogramma. Per dare un'idea sulla precisione della stima delle coordinate riportiamo in tabella la media delle varianze ottenute e gli scarti quadratici medi sulle relative coordinate per avere un'idea di quanto si discostino dal valore medio.

	Media	**Sqm**
East Sigma	0.00636	0.000766
North Sigma	0.005505	0.000603
Alt. Sigma	0.008911	0.000215

Tabella 14: Media e scarti quadratici medi sulle varianze delle coordinate stimate dei centri di presa della configurazione 0, immagini Nadirali

In realtà la distanza precisa tra due centri di presa non è di fondamentale importanza, basta conoscere anche le coordinate approssimate per avere un ordine di grandezza.

Il primo ricoprimento analizzato è stato quello in direzione longitudinale. Per il calcolo dell'altezza relativa H (distanza tra centro di presa della camera e terreno) è stata utilizzata la differenza tra la media delle Z_{0i} dei centri di presa stimati e la media dell'altitudine dei marker.

Alt. media [m] Centri di Presa	**Alt. media [m] Marker**	**H [m]**
718.87	189.11	**529.76**

Tabella 15: Calcolo Altezza di Volo relativa al terreno

Riportiamo adesso di seguito i valori di partenza per poter calcolare poi i livelli di ricoprimenti.

RICOPRIMENTO LONGITUDINALE	
Alt relativa H [m]	529.76
Dimensione Pixel [mm]	0.00376
c [pixel]	13748
C [mm]	51.69
Fattore di scala n	10248.39
Risoluzione lato (long) f [Pixel]	10646
Risoluzione lato (long) f [mm]	40.03
Lato area foto F [m]	410.23

Tabella 16: Valori per il calcolo del ricoprimento longitudinale

Per quanto concerne la dimensione del pixel, essa è caratteristica della camera (Par 3.1), come anche la risoluzione in pixel del lato del fotogramma. La camera ha una risoluzione 14212 x 10646 Pixel ed in questo caso il lato del fotogramma considerato è quello parallelo alla direzione di ricoprimento (10646 Pixel). C è la distanza focale espressa in mm e viene calcolata a partire dal medesimo valore c espresso in Pixel. Per effettuare il passaggio da una grandezza (in Pixel) all'altra (in mm) è sufficiente moltiplicare per la dimensione del pixel.

Il **fattore di scala n** del modello è stato calcolato come segue:

$$n = \frac{H}{c}$$

A questo punto è possibile trovare il lato di terreno ripreso da un fotogramma. Per trovarlo è sufficiente moltiplicare il lato dell'immagine in mm per il fattore di scala:

$$F = f \cdot n$$

Abbiamo accennato nell'introduzione al fatto che il rilievo avesse dei fotogrammi disposti in maniera regolare, lo vedremo nelle immagini che seguono. Alla luce di questa regolarità possiamo eseguire uno studio locale (nel caso del ricoprimento longitudinale riguarda una strisciata e quindi fotogrammi successivi, mentre per il ricoprimento trasversale utilizzeremo 5 strisciate) per poi estenderlo all'intero modello senza perdere di significatività.

La strisciata oggetto di studio del ricoprimento longitudinale comprende i fotogrammi dal P0029813 al P0029836. Riportiamo di seguito, all'interno di una tabella, le coordinate dei ciascun fotogramma della strisciata. Nella prima colonna abbiamo il nome di memorizzazione del fotogramma da parte della camera. Vediamo che sono nomi sequenziali. Seguono tre colonne in cui sono presenti le coordinate Est, Nord e della quota del centro di presa. Infine, nell'ultima colonna, abbiamo la distanza tra i centri di presa. Accanto al primo fotogramma non è presente una distanza B in quanto non ha un'immagine che lo precede.

Strisciata longitudinale				
Camera	**Est [m]**	**Nord [m]**	**Quota [m]**	**B [m]**
P0029813	426143.73	5015120.02	710.96	-
P0029814	426267.73	5015082.77	709.46	129.48
P0029815	426389.70	5015040.44	718.11	129.40
P0029816	426513.62	5014997.87	718.84	131.03
P0029817	426639.55	5014965.18	706.40	130.70
P0029818	426764.71	5014927.59	709.65	130.72
P0029819	426886.76	5014885.79	718.24	129.30
P0029820	427010.66	5014847.29	723.44	129.84
P0029821	427136.87	5014811.73	714.46	131.43
P0029822	427261.02	5014774.04	712.55	129.77
P0029823	427385.15	5014734.92	714.04	130.16
P0029824	427509.65	5014699.77	711.83	129.38
P0029825	427634.94	5014662.79	715.14	130.67
P0029826	427760.81	5014630.22	718.80	130.08
P0029827	427885.20	5014591.96	716.23	130.16
P0029828	428010.26	5014555.58	718.06	130.26
P0029829	428136.66	5014523.74	721.71	130.40
P0029830	428259.39	5014482.38	721.28	129.51
P0029831	428384.74	5014445.24	720.01	130.75
P0029832	428510.56	5014413.75	721.56	129.70
P0029833	428633.72	5014372.24	725.59	130.04
P0029834	428756.51	5014330.13	725.82	129.80
P0029835	428882.57	5014297.53	718.23	130.43
P0029836	429008.84	5014267.12	721.56	129.92

Tabella 17: Coordinata Strisciata Longitudinale e distanze tra fotogrammi

B è la distanza tra il centro di presa del fotogramma i ed il fotogramma i-1 ed è calcolata come segue:

$$B = \sqrt{(Est_i - Est_{i-1})^2 + (Nord_i - Nord_{i-1})^2 + (h_i - h_{i-1})^2}$$

Per il calcolo del ricoprimento è stato preso il B_{medio} = 130.13 m.

A questo punto, sapendo che:

$$B = F \cdot \left(1 - \frac{rl}{100}\right)$$

Ed invertendo la formula otteniamo che il ricoprimento longitudinale RL è pari al 68,3%.

Per avere una buona progettazione del piano di volo, la fotogrammetria classica considera un ricoprimento longitudinale minimo del 60%. Si può affermare che il volo rispetta questo requisito. Proviamo a questo punto a sfoltire, per così dire, i fotogrammi. Il modo più semplice per diminuirne il numero è quello di considerare fotogrammi alternati. Ci viene in aiuto la denominazione della camera. Infatti avendo per nome dei numeri in successione possiamo calcolare il livello di ricoprimento sui soli fotogrammi pari e sui soli dispari. Seguono, nella tabella, i valori delle distanze tra i centri di presa B_i. Anche in questo caso i valori di B_i sono calcolati tra il fotogramma e il suo precedente che appartenga alla sua categoria (pari o dispari). Per questo motivo le prime due righe della tabella risultano vuote in quanto sono rispettivamente il primo fotogramma dispari ed il primo fotogramma pari e non presentano prima di loro un fotogramma.

Camera	B_i (fot. Pari) [m]	B_i (fot. Dispari) [m]
P0029813		
P0029814		
P0029815	258.62	
P0029816		260.30
P0029817	261.20	
P0029818		260.89
P0029819	259.91	
P0029820		259.09
P0029821	260.86	
P0029822		261.08
P0029823	259.90	

P0029824		259.48
P0029825	259.98	
P0029826		260.70
P0029827	260.09	
P0029828		260.37
P0029829	260.61	
P0029830		259.67
P0029831	260.21	
P0029832		260.37
P0029833	259.52	
P0029834		259.81
P0029835	259.92	
P0029836		260.11

Tabella 18: B fotogrammi pari e dispari

Anche in questo caso ci basta considerare il valore medio delle distanze. I valori di B_{medio} per le singole configurazioni sono:

	B medio [m]	**RL [%]**
Fotogrammi Dispari	260.09	36.60
Fotogrammi Pari	260.18	36.58

Tabella 19: RL fotogrammi pari e dispari

Tali valori di B non portano ad avere un ricoprimento longitudinale compatibile con i requisiti minimi della Fotogrammetria, motivo per cui, in direzione longitudinale, non è possibile diminuire il numero di fotogrammi. Questi risultati potevano essere qualitativamente previsti, in quanto, come già accennato la camera è disposta in modo tale da avere il lato lungo del fotogramma, quindi il lato che permette di avere un maggior inquadramento di terreno, in direzione trasversale rispetto alla direzione di percorrenza del volo. Ci aspettiamo dunque che sia possibile diminuire il numero di strisciate, in termini di fotogrammi. Vedremo se questa potenziale riduzione risulta essere poi compatibile con gli scarti nelle varie configurazioni.

5.2 Calcolo del Ricoprimento Trasversale (RT)

I dati riguardanti l'altezza relativa di volo, le dimensioni del pixel ed il fattore di scala non cambiano in quanto è il set up del volo e prescindono dalla direzione di ricoprimento che stiamo analizzando. Non cambiano neanche i passaggi analitici per il calcolo del ricoprimento che in questo caso è in direzione trasversale. Le differenze stanno nella direzione rispetto alla quale si calcola la distanza tra i centri di presa e nella dimensione del lato del sensore. Vediamo dapprima che l'abbracciamento del fotogramma è maggiore. La camera Phase one iXM-RS150F ha una risoluzione: 14212 x 10646 Pixel. Nel paragrafo precedente, sul ricoprimento longitudinale, abbiamo utilizzato il lato del sensore di 10646 Pixel e abbiamo ottenuto un abbracciamento del terreno pari a 410,23 m. Nella direzione trasversale usiamo il lato del sensore di 14212 Pixel, quindi avremo un abbracciamento maggiore. Troviamo infatti che:

RICOPRIMENTO TRASVERSALE	
Risoluzione lato f [Pixel]	14212
Risoluzione lato f [mm]	53.44
Lato area foto F [m]	547.65

Tabella 20: Dimensioni foto trasversale

L'abbracciamento del terreno in questo caso è di 547.65 m, circa 137 m in più del precedente. Tutto ci fa pensare che possiamo rimuovere delle strisciate. Procediamo con il calcolo.

Per valutare il ricoprimento trasversale **RT** prendiamo in considerazioni 5 strisciate. Questa volta il calcolo di B non è tra due fotogrammi successivi, ma tra due fotogrammi adiacenti. Le 5 strisciate che analizzeremo sono disposte come in tabella, per esempio il fotogramma P0029763, appartenente alla strisciata 3 ha da un lato il fotogramma P0029956, dall'altro il P0030004.

STRISCIATA 1	**STRISCIATA 2**	**STRISCIATA 3**	**STRISCIATA 4**	**STRISCIATA 5**
Camera	**Camera**	**Camera**	**Camera**	**Camera**
-	P0029956	P0029763	P0030004	P0029715
P0029813	P0029955	P0029762	P0030003	P0029714
P0029814	P0029954	P0029761	P0030002	P0029713
P0029815	P0029953	P0029760	P0030001	P0029712
P0029816	P0029952	P0029759	P0030000	P0029711
P0029817	P0029951	P0029758	P0029999	P0029710

P0029818	P0029950	P0029757	P0029998	P0029709
P0029819	P0029949	P0029756	P0029997	P0029708
P0029820	P0029948	P0029755	P0029996	P0029707
P0029821	P0029947	P0029754	P0029995	P0029706
P0029822	P0029946	P0029753	P0029994	P0029705
P0029823	P0029945	P0029752	P0029993	P0029704
P0029824	P0029944	P0029751	P0029992	P0029703
P0029825	P0029943	P0029750	P0029991	P0029702
P0029826	P0029942	P0029749	P0029990	P0029701
P0029827	P0029941	P0029748	P0029989	P0029700
P0029828	P0029940	P0029747	P0029988	P0029699
P0029829	P0029939	P0029746	P0029987	P0029698
P0029830	P0029938	P0029745	P0029986	P0029697
P0029831	P0029937	P0029744	P0029985	P0029696
P0029832	P0029936	P0029743	P0029984	P0029695
P0029833	P0029935	P0029742	P0029983	P0029694
P0029834	P0029934	P0029741	P0029982	P0029693
P0029835	P0029933	P0029740	P0029981	P0029692
P0029836	-	-	-	-

Tabella 21: Schema strisciate RT

Un'osservazione può essere fatta basandoci sulla denominazione delle immagini. I fotogrammi vengono salvati con un numero sequenziale. Possiamo vedere che tra una strisciata e l'altra non viene rispettato quest'ordine. Questo è dovuto al fatto che, essendo molto vicine tra di loro le strisciate, lo vedremo dal ricoprimento trasversale, il velivolo avrebbe dovuto compiere una virata molto stretta. Il velivolo ha invece effettuato svolte più morbide tracciando delle strisciate non adiacenti.

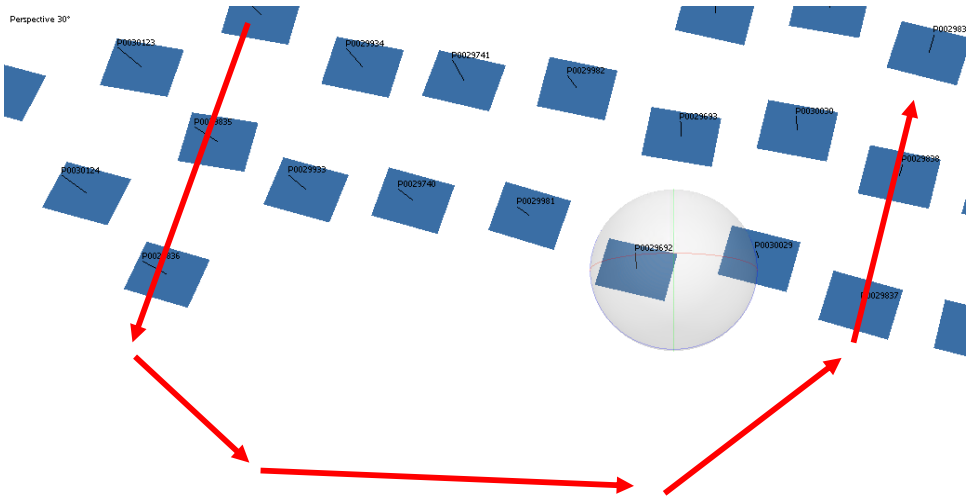


Figura 50: Traiettoria del velivolo tra una strisciata e l'altra

Nell'immagine precedente infatti vediamo il collegamento tra il fotogramma P0029836 e P0029837 (che non vediamo nella tabella).

Inoltre, nell'immagine successiva possiamo notare come il fotogramma P0029836, della strisciata n°1, non ne abbia uno adiacente nella strisciata n°2, per cui non entrerà nel calcolo della distanza tra i centri di presa. Analogamente per il lato opposto delle strisciate, la strisciata n°2 non ha adiacenza con la n°1 per quanto riguarda il primo fotogramma.

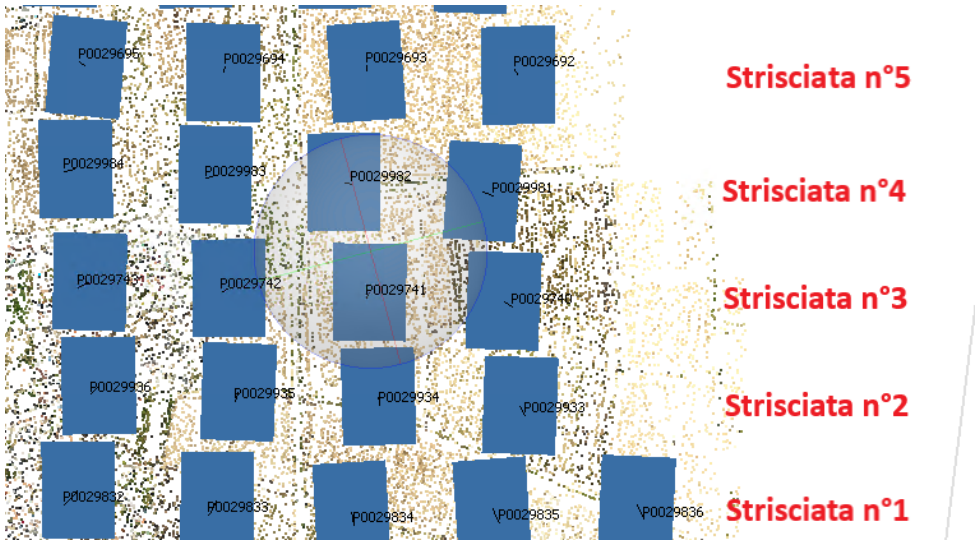


Figura 51: Schema strisciate

Analogamente a quanto abbiamo fatto nel paragrafo precedente si passa a calcolare la distanza tra i centri di presa B per ogni coppia di fotogrammi adiacenti. Nota la distanza possiamo passare alla valutazione del relativo ricoprimento trasversale. Le formule utilizzate sono le stesse e non verranno riportate. Nella tabella successiva invece possiamo vedere i risultati ottenuti. La nomenclatura utilizzata segue la seguente logica: si indica con B_{ij} la distanza tra i centri di presa adiacenti (e non successivi questa volta) tra il fotogramma della strisciata i-esima ed il fotogramma j-esima (es. la distanza tra il fotogramma P0029813 della strisciata 1 con ed il fotogramma P0029955 della strisciata 2 sarà indicato da B_{12} accanto ai due fotogrammi).

STRISCIATA 1	**STRISCIATA 2**		
Camera	**Camera**	**B_{12} [m]**	**RT_{12} [%]**
	P0029956	-	-
P0029813	P0029955	90.85	83.41
P0029814	P0029954	92.07	83.19
P0029815	P0029953	104.20	80.97
P0029816	P0029952	107.82	80.31

P0029817	P0029951	97.99	82.11
P0029818	P0029950	102.12	81.35
P0029819	P0029949	115.88	78.84
P0029820	P0029948	111.77	79.59
P0029821	P0029947	101.50	81.47
P0029822	P0029946	100.52	81.64
P0029823	P0029945	104.68	80.88
P0029824	P0029944	100.65	81.62
P0029825	P0029943	102.14	81.35
P0029826	P0029942	100.48	81.65
P0029827	P0029941	103.14	81.17
P0029828	P0029940	106.23	80.60
P0029829	P0029939	102.64	81.26
P0029830	P0029938	104.36	80.94
P0029831	P0029937	105.84	80.67
P0029832	P0029936	101.46	81.47
P0029833	P0029935	103.89	81.03
P0029834	P0029934	108.91	80.11
P0029835	P0029933	99.73	81.79
P0029836	-	-	-

Tabella 22: Risultati Strisciata 1-2

B_{12} Medio [m]	RT_{12} Medio [%]
103.00	81.19

Tabella 23: Valori medi Strisciata 1-2

Le strisciate successive sono state oggetto dei medesimi calcoli. Riportiamo solamente i valori medi di B e dei ricoprimenti.

	B Medio [m]	RT Medio [%]
Strisciate 1-2	103.00	81.19
Strisciate 2-3	103.23	81.15
Strisciate 3-4	103.35	81.13
Strisciate 4-5	104.95	80.84

Tabella 24: Valori medi delle strisciate 1-2 2-3 3-4 4-5

Ricordiamo che per la Fotogrammetria classica il minimo ricoprimento trasversale è pari al 20%, valore che è abbondantemente superato dai valori a cui è soggetto il rilievo. A questo punto è lecito domandarsi cosa accade agli scarti, e quindi alla nuvola di punti creata nel capitolo 4 e alle relative configurazioni di Ground Control Points se diminuissimo le strisciate.

Prima di rispondere a questa domanda, vediamo quante strisciate possiamo rimuovere compatibilmente con i minimi consigliati.

5.2.1 Ricoprimento trasversale: una strisciata ogni due (RT 62%)

Per il primo tentativo di riduzione delle strisciate proviamo a considerare, delle 5 strisciate viste prima, il ricoprimento trasversale che avremmo se togliessimo una strisciata ogni 2. In analogia al calcolo del ricoprimento longitudinale e seguendo la denominazione delle strisciate vista nell'immagine precedente, possiamo suddividere le strisciate dispari da quelle pari, facendo riferimento alla combinazione di strisciate (1-3, 2-4, 3-5). I calcoli eseguiti sono i medesimi per cui anche in questo caso riportiamo direttamente i valori.

	B Medio [m]	RT Medio [%]
Strisciate 1-3	203.32	62.87
Strisciate 2-4	206.13	62.36
Strisciate 3-5	205.68	62.44

Tabella 25: Valori Medi strisciate 1-3 2-4 3-5

Possiamo vedere come la distanza tra i centri di presa sia più grande rispetto al primo caso e la percentuale di ricoprimento trasversale diminuisca. Passiamo infatti da un ricoprimento trasversale del 81% circa ad un RT del 62%. Anche in questo caso siamo in presenza di un ricoprimento maggiore del ricoprimento suggerito dalla fotogrammetria classica. Possiamo spingerci ancora oltre ed eliminare una strisciata.

5.2.2 Ricoprimento trasversale: una strisciata ogni tre (RT 44%)

Proviamo allora a vedere come influisce sul livello di ricoprimento l'eliminazione di ancora una strisciata. Attenzione, non stiamo considerando una strisciata in meno rispetto al caso precedente, che porterebbe ad avere la combinazione 1-5, stiamo togliendo 2 strisciate rispetto al caso iniziale, per cui avremo una strisciata ogni 3. Le combinazioni che analizzeremo allora sono 1-4 e 2-5.

	B Medio [m]	RT Medio [%]
Strisciate 1-4	304.76	44.35
Strisciate 2-5	308.51	43.67

Tabella 26: Valori Medi strisciate 1-4 2-5

I calcoli effettuati anche in questo caso sono i medesimi. Vediamo come ancora una volta diminuisca. Decidiamo allora di spingerci ancora oltre e di ridurre di ancora una strisciata.

5.2.3 Ricoprimento trasversale: una strisciata ogni quattro (RT 25%)

Vogliamo ancora ridurre di una strisciata (sempre riferendoci al caso iniziale). In questo modo stiamo considerando una strisciata ogni quattro per cui la distanza dei centri di presa è del tipo B 1-5.

	B Medio [m]	RT Medio [%]
Strisciate 1-5	408.77	25.36

Tabella 27: Valori Medi strisciate 1-5

Siamo allora giunti al valore minimo di ricoprimento suggerito dalla Fotogrammetria. A questo punto, alla luce di quanto abbiamo trovato analiticamente possiamo ipotizzare di estendere l'analisi a tutto il modello e ridurre quindi le 21 strisciate. Infatti, oltre al fatto che visivamente si può percepire la regolarità della distribuzione dei fotogrammi, analiticamente abbiamo trovato che la distanza tra le strisciate è costante ed assume mediamente un valore di circa 103m. anche in direzione longitudinale la distanza tra due fotogrammi era pressoché costante sul valore di circa 130 m. Possiamo passare dunque ad analizzare il modello completo al variare del ricoprimento trasversale. Non possiamo far variare il ricoprimento longitudinale in quanto, come abbiamo visto, ridurre di un fotogramma comporta una diminuzione eccessiva del ricoprimento longitudinale. Di seguito vediamo un grafico che riassume l'andamento del RT in funzione delle strisciate considerate

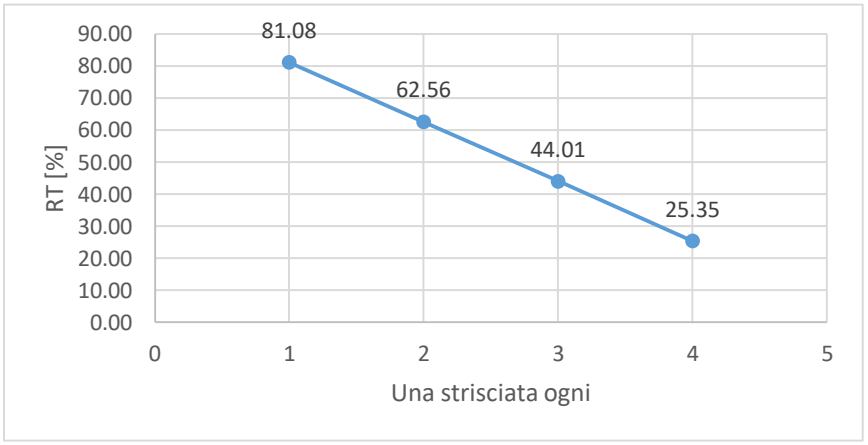


Figura 52: Andamento RT in funzione delle strisciate

5.3 Analisi del modello al variare del RT.

In questo paragrafo troviamo una risposta al quesito con il quale abbiamo aperto il capitolo: è meglio ridurre il numero di punti rilevati o ridurre il numero dei fotogrammi?

Vedremo infatti come variano gli scarti nelle varie configurazioni analizzate nel capitolo precedente al diminuire del ricoprimento trasversale. Sottolineiamo che le configurazioni studiate precedentemente si basano sul modello completo quindi sulla totalità delle strisciate per un valore di RT pari a 82%. Di conseguenza i casi che analizzeremo saranno:

- RT = 62% (11 strisciate);
- RT = 44% (8 strisciate);
- RT = 25% (6 strisciate).

In direzione longitudinale abbiamo visto che non sarà possibile ridurre i fotogrammi per cui ogni strisciata continuerà ad avere 24 fotogrammi.

5.3.1 RT = 62%

In questo paragrafo trattiamo il ricoprimento trasversale del 62% che porta a ridurre le strisciate da 21 a 11. Nell'immagine successiva possiamo vedere la distribuzione dei fotogrammi rispetto alle 11 strisciate. Possiamo osservare che, anche visivamente appare evidente la regolarità con cui i fotogrammi siano disposti.

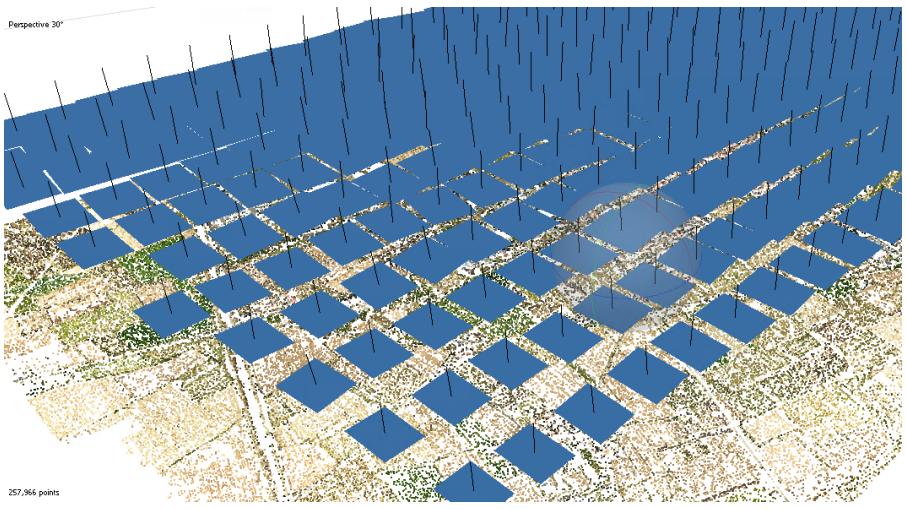


Figura 53: Strisciate RT = 62%

Non facciamo rivedere tutte le configurazioni una ad una perché le distribuzioni dei Ground Control Points è la stessa analizzata nel caso di RT 82% (Cap. 4). Riportiamo in tabella il valore degli scarti solo sui Check Points delle varie configurazioni. Abbiamo ormai visto quanto siano questi ultimi a decretare l'affidabilità del modello piuttosto che i GCP.

	Check Points RT = 62%			
	E [cm]	**N [cm]**	**h [cm]**	**Tot [cm]**
Configurazione 0	0.00	0.00	0.00	0.00
Configurazione 1	3.72	4.88	19.52	20.46
Configurazione 2	2.87	3.22	6.29	7.62
Configurazione 3	4.25	4.09	13.54	14.77
Configurazione 4	3.68	5.45	17.10	18.32
Configurazione 5	4.24	2.98	13.55	14.50
Configurazione 6	4.58	4.24	29.16	29.82
Configurazione 7	5.04	4.61	25.58	26.48

Tabella 28: Check Points RT = 62%

Ad una prima occhiata, gli scarti in planimetria non presentano valori sui CP discordanti con quelli visti prima, quasi tutti risultano minori di 4 cm del GSD. Anche per questo valore di RT l'altimetria produce degli scarti elevati. Sembra allora doveroso confrontarli con quelli a RT = 82%.

	RT=62%	**RT=82%**
	h [cm]	**h [cm]**
Configurazione 0	0.00	0.00
Configurazione 1	19.52	16.91
Configurazione 2	6.29	5.44
Configurazione 3	13.54	10.33
Configurazione 4	17.10	13.50
Configurazione 5	13.55	10.15
Configurazione 6	29.16	21.78
Configurazione 7	25.58	19.18

Tabella 29: Confronto scarti altimetrici tra RT 62% e RT 82%

Se confrontiamo i valori sui CP singolarmente vediamo che diminuire il numero delle strisciate comporta un aumento degli scarti coerente con le configurazioni, ognuna infatti subisce un peggioramento ma, se dovessimo disporre le configurazioni dalla migliore alla peggiore, l'ordine non cambierebbe tra RT 82% ed RT 62%. La migliore configurazione, tralasciando quella senza Check Points, resta la numero 2, che ricordiamo era la configurazione avente il 50% dei marker come

GCP disposti interamente lungo i bordi del modello. La peggiore resta anche in questo caso la configurazione 6, una delle due configurazioni con 4 GCP, quella che aveva i punti di appoggio disposti più internamente.

5.3.2 RT = 44%

Proseguiamo con lo studio degli scarti nel caso di ricoprimento trasversale del 44%. Le strisciate in questo caso si riducono fino a 8 strisciate. Nell'immagine successiva vediamo ancora una volta come sono disposti i fotogrammi e possiamo, già da questa immagine come, apprezzare la riduzione delle strisciate.

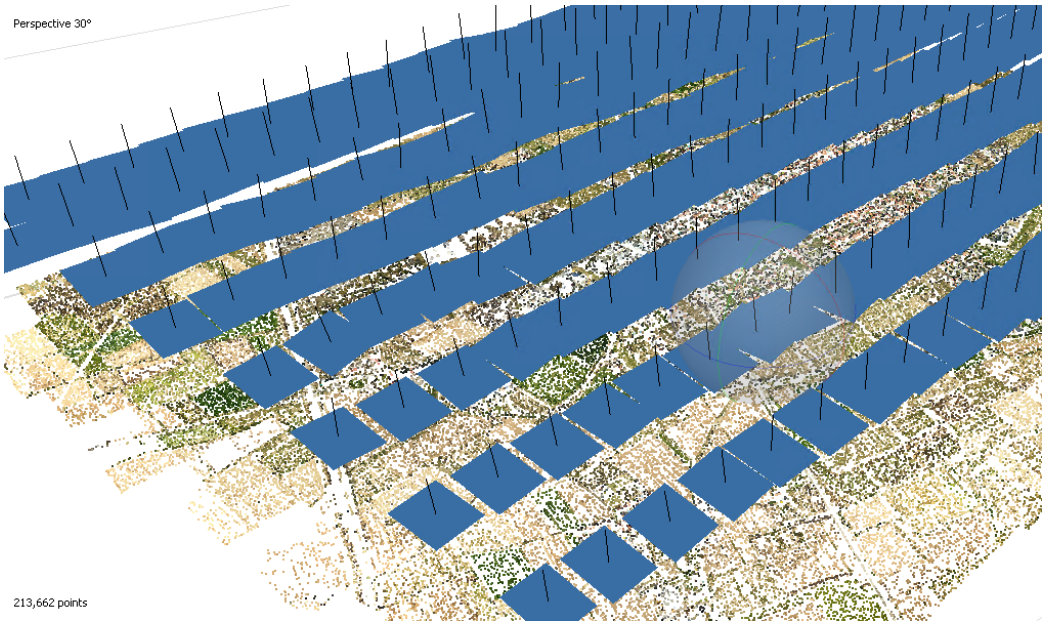


Figura 54: Strisciate RT = 44%

Vediamo anche per questo caso i valori degli scarti riassunti nella tabella seguente.

	Check Points RT = 44%			
	E [cm]	**N [cm]**	**h [cm]**	**Tot [cm]**
Configurazione 0	0.00	0.00	0.00	0.00
Configurazione 1	4.67	2.89	21.67	22.36
Configurazione 2	2.28	3.31	5.95	7.18
Configurazione 3	5.03	3.53	9.01	10.91
Configurazione 4	3.68	4.56	11.40	12.82
Configurazione 5	4.82	2.77	11.42	12.70
Configurazione 6	4.29	4.09	29.44	30.03
Configurazione 7	6.02	3.18	19.52	20.67

Tabella 30: Check Points RT = 44%

La valutazione che fino a questo momento abbiamo avuto sugli scarti planimetrici viene ancora una volta confermata. Con RT del 44% i valori degli scarti planimetrici aumentano ma non in modo significativo. Più avanti vedremo in una tabella conclusiva che in alcuni casi gli scarti diminuiscono, di poco. La questione che però ci preme analizzare è quella degli scarti altimetrici sui CP, ancora una volta di molto più grandi degli scarti planimetrici. Per poter commentare in maniera più semplice riportiamo, come fatto con RT 44%, il confronto con gli analoghi scarti a RT 82%.

	RT=44%	**RT=82%**
	h [cm]	**h [cm]**
Configurazione 0	0.00	0.00
Configurazione 1	21.67	16.91
Configurazione 2	5.95	5.44
Configurazione 3	9.01	10.33
Configurazione 4	11.40	13.50
Configurazione 5	11.42	10.15
Configurazione 6	29.44	21.78
Configurazione 7	19.52	19.18

Tabella 31: Confronto scarti altimetrici tra RT 44% e RT 82%

In questo caso, la riduzione di due strisciate ogni 3 sembra apportare benefici ad alcune configurazioni. Vediamo per esempio che la configurazione 2 sembra non risentirne della riduzione di strisciate, lo scarto altimetrico resta molto simile, mentre nelle configurazioni 3 e 4 lo scarto migliora, pur restando in linea con quanto notato nel capitolo 4. Infatti, anche in questo caso al diminuire dei punti esterni aumenta lo scarto altimetrico (se ricordiamo, la configurazione 3 aveva meno GCP esterni della 2 ma più della 4 che era la configurazione avente principalmente punti centrali con soli 6, su circa 20, esterni). La configurazione 5 vede un incremento minimo degli scarti altimetrici. La configurazione 6, anche in questo caso come nel precedente, subisce un incremento di scarti considerevole e la 7 invece possiamo dire che non risente della riduzione di fotogrammi.

Ridurre i fotogrammi, comporta la perdita di equazioni poiché vengono meno punti di legame, tuttavia vengono introdotte anche meno incognite. Se quindi avere più equazioni facilita la soluzione del problema fornendo ridondanza al sistema di equazioni, la riduzione delle incognite potrebbe privare il sistema di alcune incertezze. Ricordiamo anche che la risoluzione ai minimi

quadrati non isola un errore grossolano se presente, ma tende a distribuirlo tra le varie equazioni. La diminuzione degli scarti altimetrici allora potrebbe essere dovuta proprio a questo, oltre ai fotogrammi delle strisciate eliminate, sono state ridotte anche alcune incertezze.

5.3.3 RT = 25%

Analizziamo infine quello che accade agli scarti quando il ricoprimento trasversale del 25% porta ad avere un totale di 6 strisciate, ben visibili nell'immagine successiva.

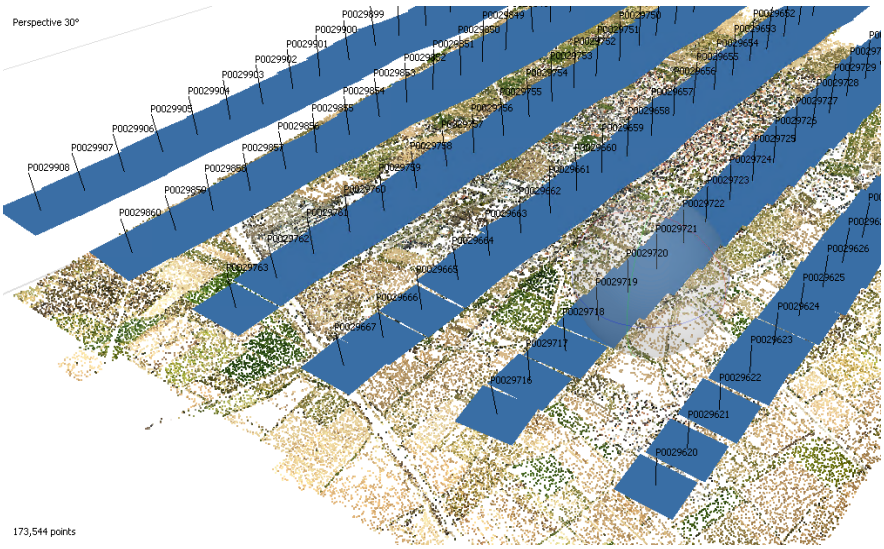


Figura 55: Strisciate RT = 35%

Riducendo allora le strisciate fino a 6, quello che si ottiene in termine di scarti è:

	Check Points RT = 25%			
	E [cm]	**N [cm]**	**h [cm]**	**Tot [cm]**
Configurazione 0	0.00	0.00	0.00	0.00
Configurazione 1	4.99	3.62	34.11	34.66
Configurazione 2	3.18	3.23	26.35	26.73
Configurazione 3	5.84	3.23	33.68	34.33
Configurazione 4	5.00	5.16	34.00	34.76
Configurazione 5	5.39	3.29	28.99	29.67
Configurazione 6	5.90	4.32	45.41	46.00
Configurazione 7	6.71	3.78	40.37	41.10

Tabella 32: Check Points RT = 25%

Questa soluzione è da scartare. Se negli altri casi avevamo visto che gli scarti in planimetria restavano accettabili nonostante alcune variazioni in questo caso, l'innalzamento oltre i 5 cm è sintomo di non adeguatezza del modello. La conferma la troviamo negli scarti altimetrici che vedono il minimo valore superare 25 cm. Questa soluzione non è da tenere in considerazione.

5.4 Conclusioni

Prima di trarre conclusioni su quanto abbiamo trovato, riportiamo di seguito i dati raccolti in un'unica tabella nella quale ogni configurazione, per ogni valore di ricoprimento trasversale, è confrontata con la medesima ma con RT 82%, che riteniamo la soluzione di riferimento.

		Check Points			
		ΔE [cm]	**ΔN [cm]**	**Δh [cm]**	**Δtot [cm]**
Conf 0	RT 62%	0.00	0.00	0.00	0.00
	RT 44%	0.00	0.00	0.00	0.00
	RT 25%	0.00	0.00	0.00	0.00
Conf 1	RT 62%	-0.39	1.18	2.61	2.89
	RT 44%	0.57	-0.81	4.76	4.86
	RT 25%	0.88	-0.08	17.20	17.22
Conf 2	RT 62%	0.43	0.10	0.84	0.95
	RT 44%	-0.17	0.20	0.50	0.56
	RT 25%	0.73	0.12	20.90	20.91
Conf 3	RT 62%	0.14	0.03	3.21	3.21
	RT 44%	0.92	-0.53	-1.32	1.69
	RT 25%	1.74	-0.84	23.35	23.43
Conf 4	RT 62%	0.15	0.14	3.60	3.60
	RT 44%	0.15	-0.76	-2.10	2.24
	RT 25%	1.47	-0.15	20.50	20.55
Conf 5	RT 62%	0.17	0.32	3.40	3.42
	RT 44%	0.75	0.10	1.27	1.48
	RT 25%	1.31	0.63	18.84	18.89
Conf 6	RT 62%	0.66	0.25	7.38	7.41
	RT 44%	0.38	0.10	7.66	7.67
	RT 25%	1.98	0.33	23.63	23.72
Conf 7	RT 62%	-0.46	1.28	6.40	6.55
	RT 44%	0.52	-0.15	0.34	0.64
	RT 25%	1.21	0.45	21.19	21.23

Tabella 33: Confronto scarti con diversi RT

Nelle colonne ΔE, ΔN, Δh troviamo la differenza tra il valore dello scarto con RT in esame ed il valore dello scarto corrispondente avente RT = 82%. Per esempio nella colonna ΔE, per la configurazione 1, in corrispondenza di RT = 44%, il valore 0.57 cm è ottenuto dalla differenza tra lo scarto sulla coordinata Est della configurazione 1 con RT = 44% (4,67 cm) e lo scarto sulla coordinata Est della medesima configurazione avente RT = 82% (4,11 cm) par. 4.4.2. I termini appartenenti alla colonna Δtot invece sono il risultato della radice quadrata della somma dei quadrati dei termini ΔE, ΔN e Δh.

L'ordine dei termini nella sottrazione non è casuale. Disponendoli in questo modo avere una differenza negativa significa avere lo scarto della configurazione con RT ridotto, minore di quello con la configurazione completa di tutti i fotogrammi (RT = 82%).

Sebbene presenti pochi Δ negativi, è da notare come la configurazione 2, con RT 62% ed RT 44% sia una buona soluzione. Gli scarti differiscono per meno di 1 cm dalla soluzione di riferimento per cui, come si era già vista nel capitolo 4 questa configurazione risulta essere utilizzabile. Una possibile soluzione quindi potrebbe essere quella di utilizzare meno strisciate. Nello specifico ne possono essere utilizzate 11 o anche 8 (rispetto alle 23) con 21 Marker come Control Points.

		Check Points			
		ΔE [cm]	**ΔN [cm]**	**Δh [cm]**	**Δtot [cm]**
Conf 2	**RT 62%**	0.43	0.10	0.84	0.95
	RT 45%	-0.17	0.20	0.50	0.56
	RT 25%	0.73	0.12	20.90	20.91

Tabella 34: Δ configurazione 2

Apparentemente anche i Check Points con RT variabile della configurazione 4 sembrano portare ad una buona soluzione. Attenzione, però, che in questa tabella sono riportati i valori della differenza tra gli scarti e avere poche variazioni vuol avere soluzioni simili tra quella in questione e quella di riferimento. La configurazione 4 tuttavia non è una delle migliori configurazioni possibili in termini di Check Point.

Come ci si poteva aspettare, la situazione altimetrica non migliora. La variazione degli scarti rispetto alla situazione di riferimento è fortemente positiva. Questo indica che l'incertezza sull'altitudine del modello aumenta al diminuire del numero delle strisciate (abbiamo visto però che non è sempre così). Anche in questo caso il problema può essere causato da un'elevata planarità del sito.

Siamo finalmente in grado di rispondere alla domanda postaci a inizio capitolo. La risposta non è una risposta assoluta e presenta un grosso "ma". Analizzando, dunque, quanto ottenuto, la configurazione che potremo usare in un futuro rilievo è la numero 2, pur avendo la doverosa consapevolezza di pagare qualcosa in termini della precisione sulla quota. Con questa configurazione si potrebbe risparmiare più della metà del tempo impiegato per percorrere le strisciate. Non possiamo dire che verrebbe risparmiato più della metà del tempo del volo in sé poiché il volo ha dei tempi che possiamo definire fissi come quelli per la preparazione, decollo e atterraggio che sono gli stessi impiegati a prescindere dal numero delle strisciate. Si risparmia anche tempo macchina e memoria del calcolatore (anche se al giorno d'oggi la memoria di un pc non rappresenta più un vincolo stringente) a causa del minor numero di fotogrammi. Dal lato invece del rilievo a terra, come già visto ci sarebbe un grosso risparmio in termini di personale, infatti per il rilievo sarebbe sufficiente utilizzare una sola squadra.

Questo tuttavia è quanto si evince dai freddi numeri. Volendo effettuare un'analisi più ragionata si potrebbe pensare di svolgere lo stesso rilievo con un RT del 44%, che abbiamo visto funzionare discretamente, ma piuttosto di eliminare completamente due strisciate ogni 3, potremmo riutilizzarne una di queste ad una quota superiore. Si avrebbero allora due altezze di volo e molto probabilmente verrebbe anche risolto il problema degli scarti altimetrici, portando una configurazione del tipo numero 5, quella con 9 GCP ad essere ottimale. La configurazione 5 infatti presentava un problema negli scarti altimetrici che tuttavia non erano così elevati come nelle configurazioni a 4 GCP. Proviamo ad illustrare come potrebbe essere un possibile sviluppo.

Immaginiamo di sezionare il terreno in direzione trasversale a di vedere le singole strisciate affiancate. Nell'immagine successiva possiamo vedere la condizione "stato attuale" ovvero le strisciate che il nostro rilievo avrebbe se come ricoprimento trasversale avesse il valore di 44%, quindi 8 strisciate. Abbiamo posto il sensore della camera in maniera positiva, si trova infatti tra il centro di presa ed il terreno. Tutto il disegno risulta in scala, tranne la distanza principale della camera (essendo di 51 mm non si sarebbe vista). Vediamo dunque le 8 strisciate, numerate. La distanza tra i centri di presa delle camere è di 306 m (abbiamo usato il valore medio tra quelli trovati nel capitolo, tutte le grandezze infatti saranno da intendere come valori medi). La quota del volo aereo è di 530 m, l'abbracciamento di terreno del singolo fotogramma è 547 m mentre l'abbracciamento totale è di 2689 m mediamente.

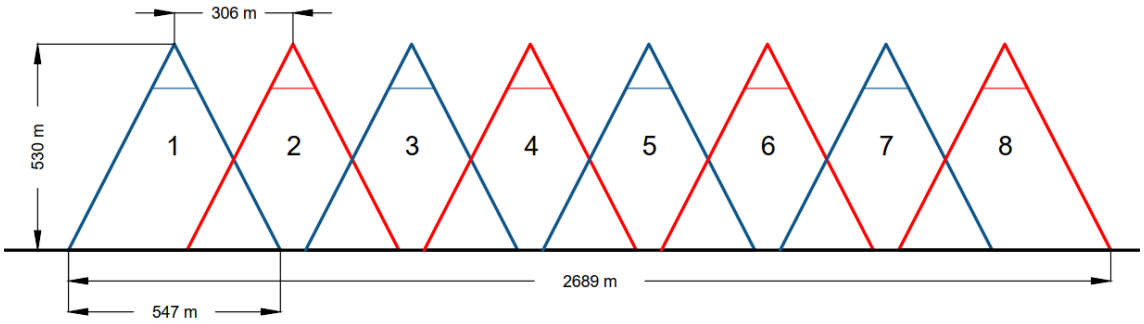


Figura 56: Vista della strisciate con abbracciamento in sezione trasversale (RT 44%)

Supponiamo adesso di, come anticipato, di voler aggiungere delle strisciate da quelle rimosse, e di eseguirle ad una quota diversa, maggiore. La nuova quota sarà 1000 m. Ipotizziamo per semplicità che i centri di presa esterni si trovino lungo la verticale dei corrispettivi centri di presa delle strisciate a quota 530 m. È solo per comodità pratica di progettazione. In questo modo infatti, essendo, i centri di presa posti più in alto, anche se la distanza tra il primo e l'ultimo resta uguale a quelli posti alla quota inferiore, copriranno più territorio (vedere immagine seguente). Svolgiamo alcuni semplici calcoli a ritroso, partendo dalle formule analizzate in questo capitolo.

Vogliamo impostare la distanza tra i centri di presa in modo tale che il ricoprimento trasversale tra le strisciate aggiuntive sia almeno pari a quello delle 8 strisciate a quota 530 m. A tal proposito iniziamo a calcolare F (lato del fotogramma sul terreno) quando la strisciata si trova a 1000 m di distanza dal terreno (non riportiamo le formule utilizzate in quanto sono le stesse del Par. 5.1). Per trovare il nuovo valore di F ci serve sapere il nuovo fattore di scala n, che vale 19345 (contro 10248 delle strisciate presenti). F allora sarà 1033 m.

Imponiamo inizialmente un ricoprimento trasversale uguale a quello delle strisciate alla quota inferiore, di valore 44%. Affinché si abbia un tale RT la distanza tra due strisciate B deve essere mediamente pari a 579 m.

A questo punto possiamo calcolare la distanza tra i centri di presa esterni e usufruendo dei centri di presa inferiori possiamo dire che vale:

$$306\ \mathrm{m} \cdot 7 = \ 2142\ \mathrm{m}$$

Avendo infatti 8 strisciate gli spazi tra una e l'altra sono 7. Quindi per come abbiamo ipotizzato il problema, avremo che anche la distanza tra i centri di presa esterni superiori sarà di 2142 m. Dividendo questo numero per B che è la distanza tra due strisciate e sommando 1 troviamo il numero delle strisciate da utilizzare per avere un minimo di ricoprimento trasversale del 44%.

$$\frac{2142\ \mathrm{m}}{579\ \mathrm{m}} + 1 = 4.7$$

Chiaramente non ha un senso fisico avere 4.7 strisciate per cui le arrotondiamo a 5 (portarle a 4 significherebbe avere un RT minore). A questo punto dividiamo la distanza totale per 4 (5 strisciate meno 1) per trovare la nuova distanza tra le strisciate. Troviamo che la nuova B vale 536 m. Il ricoprimento trasversale finale sarà del 48%.

Ripetiamo che questa configurazione di strisciate a quota 1000 m dal terreno, non deve sostituire quelle in quota 530 m ma devono coesistere, cioè il rilievo dovrà essere formato da due set di strisciate a quote diverse (in figura successiva è riportato lo schema, nel quale le strisciate della quota inferiore sono di colore grigio e tratteggiate solo per una questione visiva, infatti, anticipando i risultati possiamo dire di avere 13 strisciate in tutto, 8 a quota 530 m e 5 a quota 1000 m).

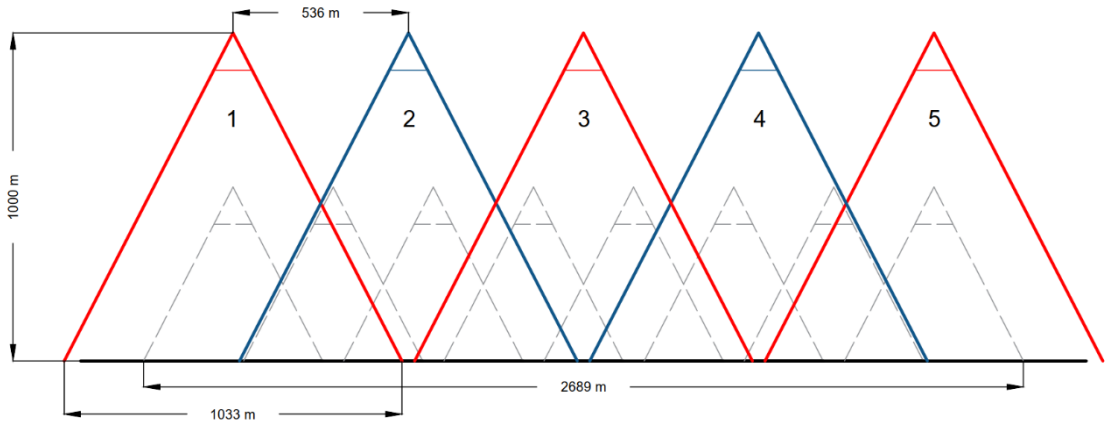


Figura 57: Configurazione del nuovo Rilievo

In questo modo cerchiamo di ridurre le incertezze sull'altimetria. Supponiamo di prendere, nella nuova configurazione, 2 strisciate adiacenti k e p a quota 1000 m e 2 a quota 530 m i e j (immagine successiva). Nella configurazione precedente eravamo in presenza di intersezioni del tipo A'_iA - A'_jA, nella nuova configurazione possiamo avere intersezione di raggi proiettati da quote

differenti, come per esempio A'_kA - A'_jA dove il pedice indica la strisciata e l'apice indica che è il punto immagine. In questo modo potremmo risolvere il problema della planarità.

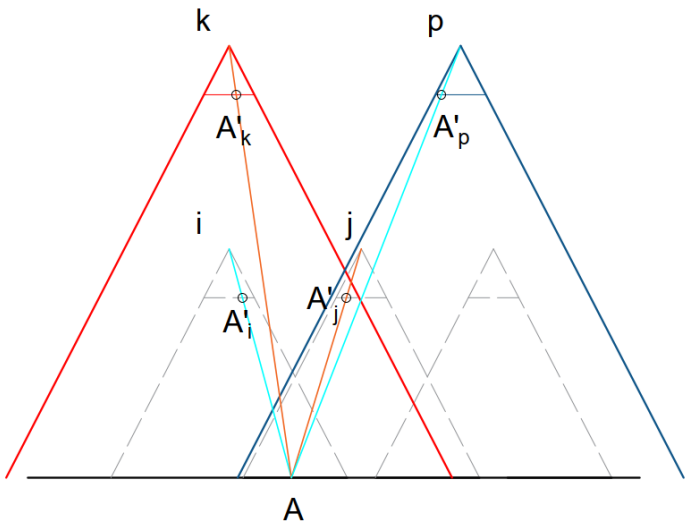


Figura 58: Intersezione di nuovi raggi omologhi

In definitiva quello che si farebbe è togliere dalle 21 strisciate, una strisciata ogni 3, facendone rimanere 8. Delle 13 rimosse se ne possono usare 5 poste ad una quota superiore. In questo modo ci sarebbe comunque un risparmio di fotogrammi rispetto alla configurazione 0 in cui sono presenti tutte le strisciate per cui valgono le argomentazioni effettuate prima sui vari guadagni.

Per concludere, in analogia con quanto fatto nel capitolo 4, riportiamo graficamente l'andamento delle variazioni di scarti altimetrici rispetto alla configurazione con RT 82% Δh in funzione del numero di Marker utilizzati come control point al variare del ricoprimento trasversale.

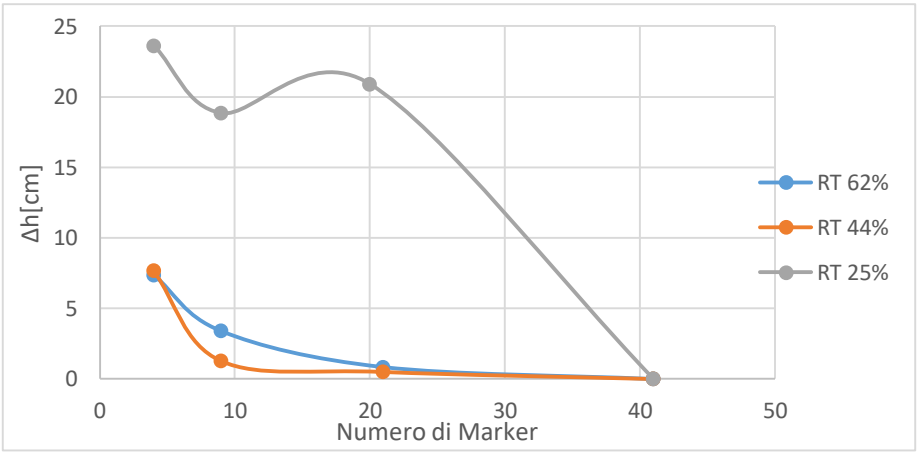


Figura 59: Andamento della variazione degli scarti altimetrici sui Check Points

Nel grafico precedente vediamo in ascissa il numero di marker utilizzati come Control Points mentre in ordinata la variazione degli scarti sui Check Points rispetto alla configurazione di riferimento. Nel grafico, tra la 4 configurazioni che vedono l'utilizzo di 21 Marker è stata presa la migliore, la configurazione 2.

Anche in questo caso, come si era visto nel capitolo 4, gli scarti aumentano con il diminuire dei Marker considerati. Per completezza si riportiamo il grafico dell'andamento planimetrico della variazione degli scarti per le stesse configurazioni.

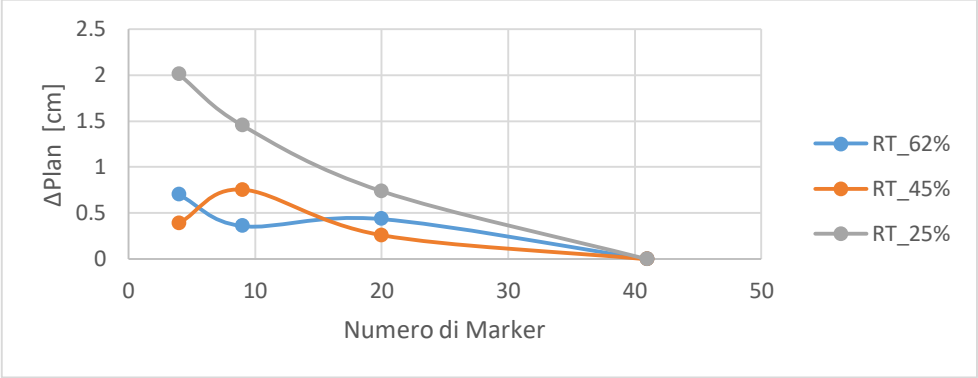


Figura 60: Andamento della variazione degli scarti planimetrici

6 Restituzione Immagini Inclinate

In questo breve capitolo andremo ad analizzare i fotogrammi ottenuti dal secondo rilievo, quello svoltosi il 23 Marzo 2021. Nel rilevo la camera è la stessa, ma il suo asse ottico è inclinato di 30 gradi rispetto alla verticale. Questo comporta una migliore visibilità sulle facciate degli edifici, ma vedremo che comporta anche una maggiore distorsione delle immagini.

In questo secondo rilievo aereo sono stati acquisiti 278 fotogrammi, circa la metà di quelli ottenuti in condizioni di camera Nadirale. La distribuzione dei fotogrammi è irregolare e non possiamo dunque cercare una soluzione ottimale in termini di ricoprimento. La superficie ricoperta dalle immagini è inferiore e questo ci ha impedito di considerare alcuni Marker poiché presenti in zone non visibili dai fotogrammi. Nell'immagine successiva possiamo vedere quanto detto.

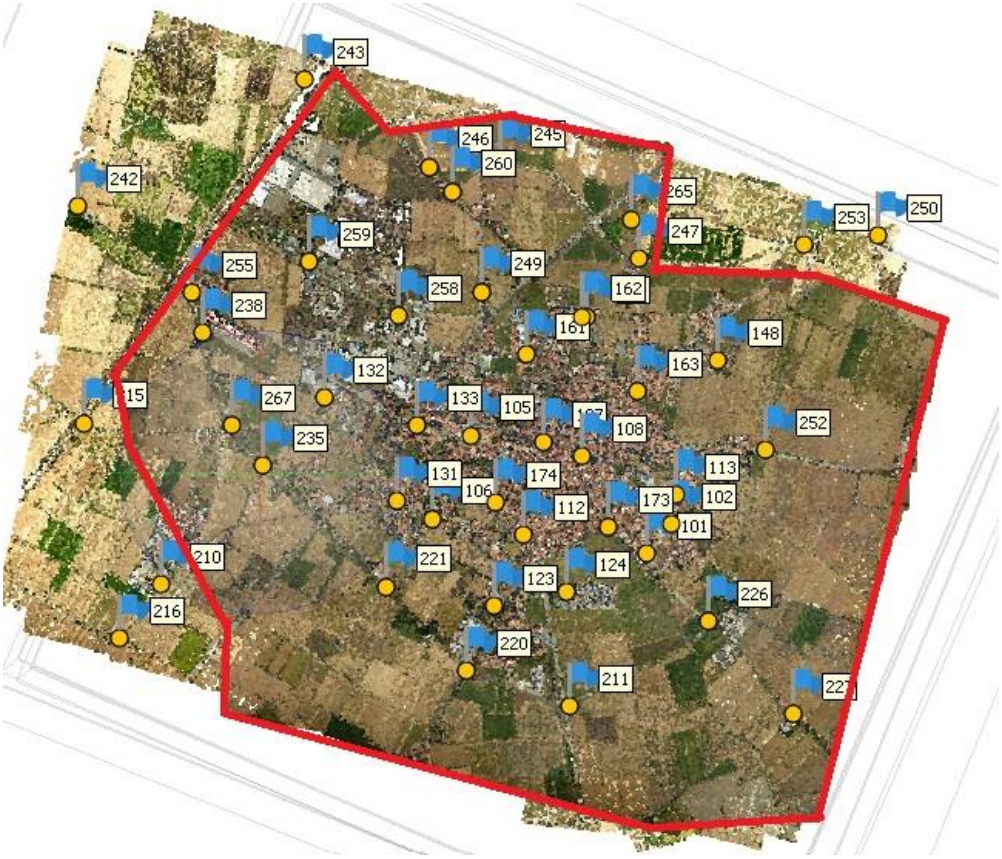


Figura 61: Superficie coperta dalle Immagini inclinate rispetto alle Immagini Nadirali (la linea rossa corrisponde al perimetro della nuvola di punti ottenuta a partire dalle immagini a presa inclinata

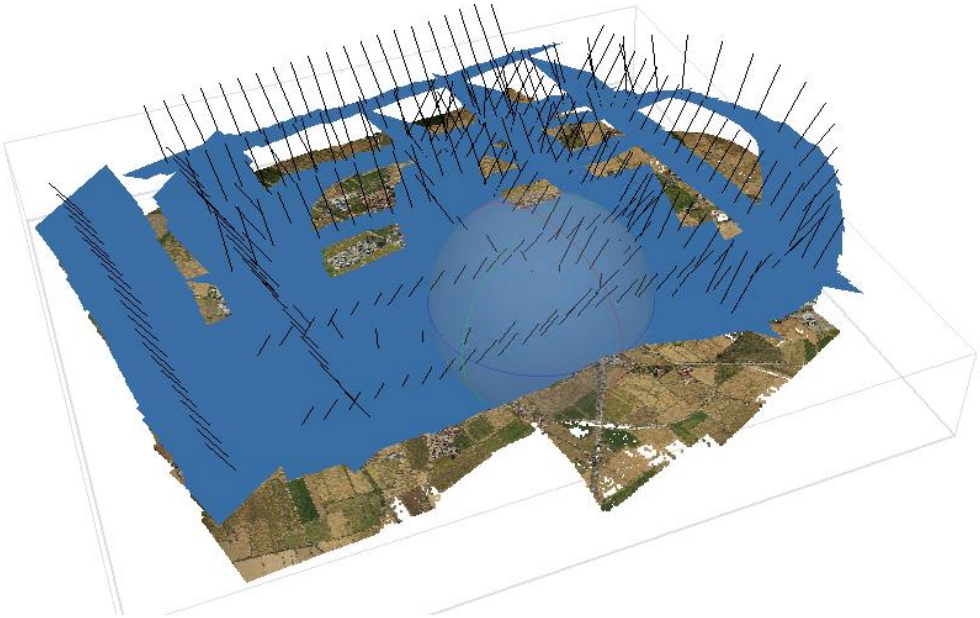


Figura 62: Irregolarità della distribuzione dei fotogrammi

In questo caso le configurazioni analizzate, in termini di GCP sono solamente tre:

- La configurazione 0, analogamente al caso delle Immagini a presa Nadirale, dove tutti i Marker sono presi come Ground Control Points;
- Configurazione 1, nella quale sono stati utilizzati solo i Marker della squadra 1 come Ground Control Points;
- Configurazione 2, nella quale sono stati utilizzati solo i Marker della squadra 2 come Ground Control Points.

La configurazione 2 in questo corrisponde alla configurazione 2 del caso Nadirale, avente però in meno i Marker 210, 215, 216, 242, 243, 250, 253 che rimangono fuori dalla nuvola di punti.

In questo capitolo vogliamo riportare per completezza anche l'analisi svolta sulle immagini Nadirali che però allo stato attuale non comporta passaggi aggiuntivi che non siano già stati descritti nel capitolo 4 e 5. Di conseguenza i passaggi sono i medesimi a partire dall'upload delle immagini, il loro allineamento, posizionamento dei Marker e compensazione delle equazioni di collinearità. Vediamo di seguito gli scarti ottenuti per queste tre configurazioni

	Control Points				Check Points			
	Est [cm]	**Nord [cm]**	**h [cm]**	**Tot Er [cm]**	**Est [cm]**	**Nord [cm]**	**h [cm]**	**Tot Er [cm]**
Conf 0 (Inc.)	2.27	1.98	3.59	4.68	0.00	0.00	0.00	0.00
Conf. 1 (Inc.)	2.22	1.99	4.17	5.13	4.89	2.66	8.02	9.76
Conf. 2 (Inc.)	2.19	1.63	1.86	3.30	2.79	2.71	7.24	8.22

Tabella 35: Valori scarti immagini inclinate

Dando un rapido sguardo agli scarti sui control points ci accorgiamo che, come di consuetudine, risultano essere bassi. Anche i check points in queste configurazioni sono abbastanza bassi, soprattutto in planimetria. I problemi sorgono per quanto concerne l'altimetria, infatti gli scarti risultano essere maggiori della precisione ottenibile nelle condizioni di volo.

Possiamo concludere dicendo che anche in questo caso, sebbene i marker utilizzati nella configurazione 2 siano minori di quelli utilizzati nella configurazione 1 (sono stati esclusi perché non visibili sui fotogrammi), gli scarti sui Check points sono inferiori. Prende sempre più consistenza l'ipotesi che sia più efficiente avere dei GCP perimetrali piuttosto che centrali.

Infine un consiglio che si può dare ad un eventuale lettore, è quello di far attenzione, in fase di rilievo dei punti di appoggio per un rilievo fotogrammetrico a prese inclinate, alla posizione dei punti scelti come marker. Bisogna assicurarsi che la presenza di eventuali ostacoli, dotati di una certa altezza (come edifici o alberi), non occludano la visuale dei marker in determinati fotogrammi. Infatti, come possiamo vedere nelle immagini successive, la presenza di edifici alti può nascondere la visione dei punti oggetto e possono rendere vano l'utilizzo di tali marker se non visibili in alcun fotogramma. Si riporta, come esempio, il caso del Marker numero 124 (un esempio analogo potrebbe anche essere fatto sul Marker 108 e 112).



Figura 63: Corretta visualizzazione Marker 124

Nel precedente fotogramma possiamo vedere come il marker numero 124 sia ben visibile nel fotogramma. Esso rappresenta lo spigolo di una scalinata.



Figura 64: Visuale occultata Marker 124

In questo fotogramma invece la visuale è impedita dalla presenza della struttura. Il velivolo dunque, una volta trovato nella strisciata adiacente acquisisce il fotogramma che tuttavia non potrà concorrere al sistema delle equazioni di collinearità per il marker 124.

7 Calibrazione della camera

Nel paragrafo 2.3 abbiamo parlato della distorsione dell'obiettivo della camera e dell'eventuale certificato di calibrazione che il produttore della camera dovrebbe fornire al cliente. Non avendo un certificato a disposizione, in questo capitolo affronteremo il tema della calibrazione della camera. Il software di calcolo utilizzato fino a questo momento ci permette sia di effettuare una stima dei parametri utili al calcolo della distorsione dei pixel, sia di utilizzare dei parametri di calibrazioni forniti dal produttore della camera. Nel secondo caso, Metashape Professional consente di fissare tale parametri prima di effettuare la compensazione del modello.

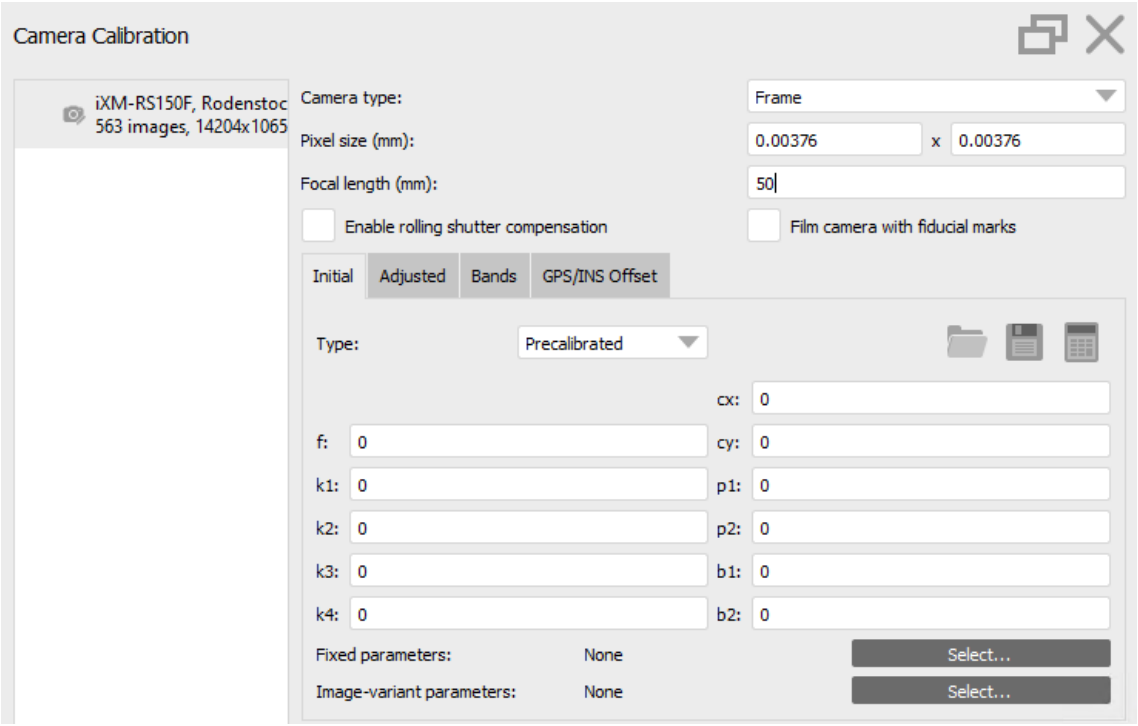


Figura 65: Interfaccia Calibrazione della camera: inserimento parametri

Nell'immagine precedente si può vedere l'interfaccia di METASHAPE PROFESSIONAL in cui è possibile passare al software i parametri di calibrazione forniti dal produttore. Per accedere a questa sezione bisogna andare su "Tools", "Camera Calibration" e cliccare su "initial". Un volta selezionato "Precalibrated" ed inseriti i parametri è necessario fissare i parametri che il programma non deve stimare da "select" accanto a "Fixed parameters".

Diversamente, ed è il nostro caso, qualora volessimo stimare i parametri in maniera automatica, bisogna sostituire la voce “Precalibrated” con “Auto”. I parametri stimabili in totale sono 11 e sono quelli descritti al 2.3.

Nel par. 2.3 abbiamo detto che solitamente la lente della camera è a simmetria cilindrica per cui è possiamo stimare solo i parametri circa la distorsione radiale. In questo caso i parametri da stimare sono solo 8 e sono: f, c_x, c_y, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2. Tuttavia vedremo, effettuando un’analisi delle componenti principali che i valori b_1 e b_2 presentano una varianza decisamente superiore a termini k per cui non possono essere trascurati. Effettueremo, tramite Metashape Professional la stima di tutti e 11 i parametri (8 precedenti più k_4, b_1 e b_2).

Questo capitolo allora verterà inizialmente su dei richiami teorici riguardanti il metodo delle componenti principali. Successivamente verranno esaminate e messe a confronto le prove effettuate per stimare i parametri della camera. Saranno dunque affiancati i valori degli scarti di tutte le prove che abbiamo visto fino a questo momento utilizzando la stima degli 8 e 11 parametri. Vedremo che, sebbene alcuni parametri, come i b, presenti una maggiore varianza rispetto ad altri parametri e quindi in linea teorica non possono essere trascurati, non porteranno grande modifiche negli scarti delle varie configurazioni.

Infine, proprio in occasione della stima dei parametri della camera, è stato creato un modello che unisse sia le immagini a presa nadirale che le immagini a presa inclinate. Sono stati stimati anche in questa condizione i parametri di calibrazione della camera e sono state confrontate le curve di distorsione risultanti.

7.1 Metodo delle Componenti Principali: Richiami teorici

In questo paragrafo andremo a vedere come sfruttare il metodo delle componenti principali per una matrice generica, per poi applicarlo al nostro caso oggetto di studio. Come anche per gli altri richiami teorici, l’intento non è quello di approfondire l’argomento, ma di fornire il concetto chiave che vi è dietro. Per cui, come era stato nel Par. 3.2.1 per l’approfondimento dei concetti geometrici e di altra natura si rimanda a testi specifici.

Partiamo con la descrizione della covarianza. Supponiamo di avere due set di misure simultanee A e B a media nulla relative ad un esperimento effettuato. Con media nulla intendiamo che ogni valore del proprio set è decurtato del valore medio del set stesso.

I set di misure sono:

$$A = (a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n)$$

$$B = (b_1, b_2, b_3, \cdots, b_n)$$

E le varianze di A e B sono rispettivamente:

$$\sigma_A^2 = \langle a_i \rangle_i^2$$

$$\sigma_B^2 = \langle b_i \rangle_i^2$$

Dove $\langle \cdots \rangle_i$ indica la media dei valori "⋯" valuta su tutti gli indici 1 < i < n. Introduciamo allora il concetto di covarianza come generalizzazione di varianza riferita a due variabili combinate:

$$\sigma_{AB}^2 = \langle a_i \cdot b_i \rangle_i^2$$

Possiamo notare che la covarianza ha termine nullo se A e B sono completamente scorrelate dando luogo a termini positivi e negativi che nella media tendono ad annullarsi. Inoltre σ_{AB}^2 = σ_A^2 se A è coincidente a B.

Possiamo in questo punto esprimere la covarianza in forma matriciale e per far questo adottiamo la convenzione che considera le componenti delle misure per i parametri A e B come elementi di vettori di tipo riga:

$$\mathbf{a} = [a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n]$$

$$\mathbf{b} = [b_1, b_2, b_3, \cdots, b_n]$$

Ora possiamo esprimere la covarianza come:

$$\sigma_{AB}^2 = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}^T}{n - 1}$$

Dove il vettore **b** deve essere trasposto per la regola di prodotto matriciale "righe per colonne". Il valore n-1 è il valore dello stimatore corretto per la media. Il prodotto darà allora come risultato:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}^{\mathrm{T}} = \mathrm{a}_1\mathrm{b}_1 + \mathrm{a}_2\mathrm{b}_2 + \mathrm{a}_3\mathrm{b}_3 + \cdots + \mathrm{a}_\mathrm{n}\mathrm{b}_\mathrm{n}$$

A questo punto complichiamo un po' l'argomento ed applichiamo quanto visto fino a questo momento ad un numero arbitrario di misure. Supponiamo di avere n misure di m grandezze misurate. Possiamo riassumere le misure in vettori riga, contenuti in un vettore colonna, come di seguito:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x_1} \\ \mathbf{x_2} \\ \vdots \\ \mathbf{x_m} \end{bmatrix}$$

Per esempio la componente $\mathbf{x_1}$ presenta a sua volta n componenti che corrispondono alle grandezze relative a quel set di misure. Quindi con $\mathbf{x_j}$ ci riferiamo al parametro j-esimo che sarà composto a sua volta da n singole misure.

Parlando ancora in generale, ogni riga j corrisponde a tutte le misure di un particolare tipo, ottenuta tramite misurazione, ad istanti temporali diversi. Quindi le componenti di ogni riga fanno riferimento alla stessa grandezza ma misurata in tempi diversi, nello specifico in n tempi diversi. Ogni vettore colonna, di conseguenza corrisponde all'insieme delle grandezze misurate tutte nello stesso istante temporale.

A questo punto siamo in grado di generalizzare la covarianza, introdotta precedentemente in forma matriciale per due set di misure, per definire una matrice di covarianza $\mathbf{S_x}$ in questo modo:

$$\mathrm{S_x} = \frac{1}{\mathrm{n}-1}\mathbf{X}\mathbf{X}^{\mathbf{T}}$$

Usando la regola del prodotto matriciale possiamo vedere che moltiplicando la prima riga di **X** con la prima colonna di $\mathbf{X^T}$ otteniamo la varianza della grandezza espressa dalla prima riga. Infatti per il prodotto matriciale eseguiamo un prodotto scalare tra la riga di **X** e la colonna di $\mathbf{X^T}$, e per come è stata costruita, il prodotto tra la prima riga con la prima colonna da origini a prodotti tra gli stessi valori, che vengono poi sommati ed infine divisi per n-1. Questa è, per definizione, la varianza della grandezza presente nella prima colonna e la indichiamo con $\sigma_{1,1}^2$.

Analogamente, moltiplicando la prima riga di **X** per la seconda colonna di $\mathbf{X^T}$ diamo luogo alla covarianza tra la prima e la seconda grandezza $\sigma_{1,2}^2$. Proseguendo il calcolo si ottiene:

$$S_x = \begin{bmatrix} \sigma_{1,1}^2 & \sigma_{1,2}^2 & \sigma_{1,2}^2 & \dots & \sigma_{1,2}^2 \\ \sigma_{1,2}^2 & \sigma_{1,2}^2 & \sigma_{1,2}^2 & \dots & \sigma_{1,2}^2 \\ \sigma_{1,2}^2 & \sigma_{1,2}^2 & \sigma_{1,2}^2 & \ddots & \sigma_{1,2}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sigma_{1,2}^2 & \sigma_{1,2}^2 & \sigma_{1,2}^2 & & \sigma_{1,2}^2 \end{bmatrix}$$

Possiamo notare che la matrice S_x è:

- Una matrice quadrata m x m;
- Ha per diagonale le varianze delle varie grandezze;
- I termini fuori diagonale corrispondono alle covarianze tra le coppie di grandezze;
- La matrice è simmetrica;
- Il valore delle covarianze indica il grado di correlazione presente tra le relative grandezze, un valore elevato indica che le grandezze sono correlate, un valore tendente allo 0 indica indipendenza della grandezze.

Questa matrice allora contiene le informazioni relative alle correlazioni presenti tra le varie grandezze. Quello che noi vorremmo fare è sfruttare la geometria per trovare una base che annulli i termini fuori diagonale e ci permetta di avere le grandezze scorrelate in modo da avere sulla diagonale i valori massimi delle varianze. La nuova matrice che vogliamo trovare allora la chiameremo S_y.

Per fare questo quindi dobbiamo diagonalizzare la matrice di covarianza. Vogliamo infatti trovare delle nuove variabili che mostrino grande varianza e quindi una grande sensibilità al variare delle condizioni in cui si svolge la fase di misurazione. Queste nuove variabili devono essere sempre rappresentative dei dati ma che abbiano una covarianza quanto più piccola possibile. Per trovare queste nuove variabili allora dobbiamo trovare una nuova proiezione dei nostri dati, in un sistema di riferimento diverso (una nuova base vettoriale) che produca una matrice di dati Y tale che la sua covarianza $\mathbf{S_y}$ abbia gli elementi non diagonali nulli o molto piccoli. In questo modo semplifichiamo il problema poiché basterà considerare i termini sulla diagonale per valutare quale siano le nuove variabili più importanti per descrivere il problema, ovvero quelle che

producono una maggiore varianza dei dati e saranno dunque più sensibili di quelle originali e di conseguenza più adatte alla descrizione del problema.

Possiamo concludere che il metodo delle componenti principali PCA (Principal Component Analysis) cerca una base di vettori $\{p_1, p_2, \cdots, p_m\}$ ortonormali che individuano le direzioni più appropriate per rappresentare il nostro insieme di dati nel modo più essenziale possibile.

Per quanto riguarda il nostro caso, noi utilizzeremo questo metodo per andare a trovare le componenti principali per vedere se, le variabili che stavamo trascurando, fossero più o meno sensibili delle variabili che invece stavamo considerando. Come vedremo più avanti la matrice di varianza covarianza è deducibile dalla matrice di correlazione che viene riportata sul report dell'elaborazione del software Metashape.

7.2 Stima dei parametri di Calibrazione

Iniziamo allora a trattare, in questo paragrafo, la calibrazione della camera. Partiremo con stimare gli 8 parametri classici della camera, ovvero i parametri che tengono solo conto della distorsione radiale (parametri k_1 k_2 e k_3) e in minima parte di quella tangenziale (parametri p_1 e p_2), oltre ai parametri di calibrazione interna come gli offset sul sensore per il Punto Principale (c_x e c_y) e la distanza principale (tutte nozioni che avevamo visto nel capitolo 2). Una volta stimati i parametri i parametri è stata calcolata analiticamente la curva di distorsione seguendo il modello fornito da Metashape Professional, descritto nel Par. 2.3.

Avendo a disposizione immagini a presa nadirale ed immagini a presa inclinata sono state costruite, per entrambi i modelli, le curve di distorsione e sono state messe a confronto. Una terza configurazione di fotogrammi è stata presa in considerazione poiché le curve di distorsione dei due modelli precedenti non erano compatibili (vedremo più avanti). In Metashape Professional sono state caricate simultaneamente sia le immagini nadirali che quelle inclinate e si è lanciato l'allineamento. Il resto della procedura è sempre il medesimo e non sarà descritto. Vedremo in seguito quanto trovato.

A questo punto, date le perplessità di quanto troveremo, abbiamo deciso di utilizzare l'analisi delle componenti principali sulla matrice di correlazione dei parametri della camera, data in uscita dal software. È stata effettuata questo tipo di analisi per vedere se effettivamente, i pa-

rametri che stavamo trascurando (k_4 b_1 e b_2 che riguardano rispettivamente la quarta componente radiale e l'ortogonalità del pixel) fossero meno sensibili e quindi non si stesse commettendo un errore nel tralasciarli.

Quindi sono stati stimati gli 11 parametri e ricalcolate le curve di distorsione. Tutte poi messe a confronto.

Per concludere, i parametri stimati del modello composto sia dalle immagini nadirali che inclinate sono stati trattati come provenienti da un certificato di calibrazione e sono stati inseriti e "forzati" all'interno del modello nadirale. In questo modo sono stati analizzati gli scarti sulle coordinate per tutte le configurazioni analizzate nel Cap. 4.

Per concludere vedremo, a partire dalle coordinate dei centri di presa stimati per ogni configurazione, quanto influiscono i parametri della camera stimati. Nello specifico vedremo di quanto si discosta la posizione dei centri di presa quando i parametri della camera sono 8 oppure sono 11.

Nei seguenti paragrafi useremo la seguente nomenclatura:

- Modello Nadirale a 8 (o 11) parametri, indica il modello figlio delle solo immagini Nadirali studiato nel Cap. 4 e prevede l'utilizzo di 563 fotogrammi;
- Modello Inclinate a 8 (o 11) parametri, indica il modello creato a partire dalle 278 immagini studiato nel capitolo 5;
- Modello Misto a 8 (o 11) parametri, indica il modello nato dall'unione dei fotogrammi a presa nadirale ed inclinata.
- Modello Nadirale Forzato a 8 o 11 parametri, indica il modello nadirale nel quale sono stati forzati i parametri stimati nel modello misto a 8 (o 11) parametri.

Gli 8 o 11 parametri indicano il numero di parametri di calibrazione stimati.

In questo sotto paragrafo trattiamo il modello Nadirale a 8 parametri prima e ad 11 parametri poi. Ad inizio capitolo abbiamo visto l'interfaccia del software Metashape Professional. Dalla stessa interfaccia è possibile reperire, a seguito della compensazione del modello (risoluzione del sistema di equazioni di collinearità), i parametri di calibrazione stimati.

7.2.1 Modello Nadirale a 8 parametri

Riportiamo i parametri stimati per il modello Nadirale a 8 parametri, per tutte le configurazione che abbiamo già trattato nel Cap. 4.

	Conf 0	Conf 1	Conf 2	Conf 3
f [Pixel]	1.37E+04	1.37E+04	1.37E+04	1.37E+04
cx [Pixel]	5.93E+01	5.92E+01	5.92E+01	5.92E+01
cy [Pixel]	-6.35E+00	-6.26E+00	-6.29E+00	-6.50E+00
k1	-6.13E-03	-6.10E-03	-6.13E-03	-6.12E-03
k2	3.00E-02	3.03E-02	2.99E-02	3.01E-02
k3	-3.65E-02	-3.71E-02	-3.64E-02	-3.67E-02
p1	9.23E-06	9.84E-06	9.80E-06	9.14E-06
p2	8.78E-05	8.58E-05	8.76E-05	8.36E-05

Tabella 36: Parametri Camera modello Nadirale a 8 parametri configurazioni 0, 1, 2, 3.

	Conf 4	Conf 5	Conf 6	Conf 7
f [Pixel]	1.37E+04	1.37E+04	1.37E+04	1.37E+04
cx [Pixel]	5.92E+01	5.90E+01	5.93E+01	5.92E+01
cy [Pixel]	-6.34E+00	-6.38E+00	-6.22E+00	-6.21E+00
k1	-6.15E-03	-6.17E-03	-6.10E-03	-6.13E-03
k2	3.02E-02	3.01E-02	3.04E-02	3.04E-02
k3	-3.69E-02	-3.67E-02	-3.73E-02	-3.72E-02
p1	8.77E-06	7.32E-06	1.12E-05	9.31E-06
p2	8.47E-05	8.47E-05	8.51E-05	8.66E-05

Tabella 37: Parametri Camera modello Nadirale a 8 parametri configurazioni 4, 5, 6, 7.

I valori li riportiamo per dovere di cronaca poiché visti in questo modo solo sono dei numeri. Li utilizziamo allora per calcolare la curva di distorsione.

Il grafico presenta sulle ascisse la coordinata radiale (si veda Figura 9) mentre in ordinata abbiamo il valore della distorsione. L'ascissa del grafico ha l'origine nel centro del sensore della camera e si sviluppa radialmente. Vediamo che parte con una tangente quasi orizzontale, fino a circa 1000 Pixel che corrispondono a 3.76 mm sul sensore e 38 m circa sul terreno. Questo vuol

dire che per ogni fotogramma, in un raggio di 38 m dal punto principale proiettato a terra, le immagini non hanno quasi distorsione.

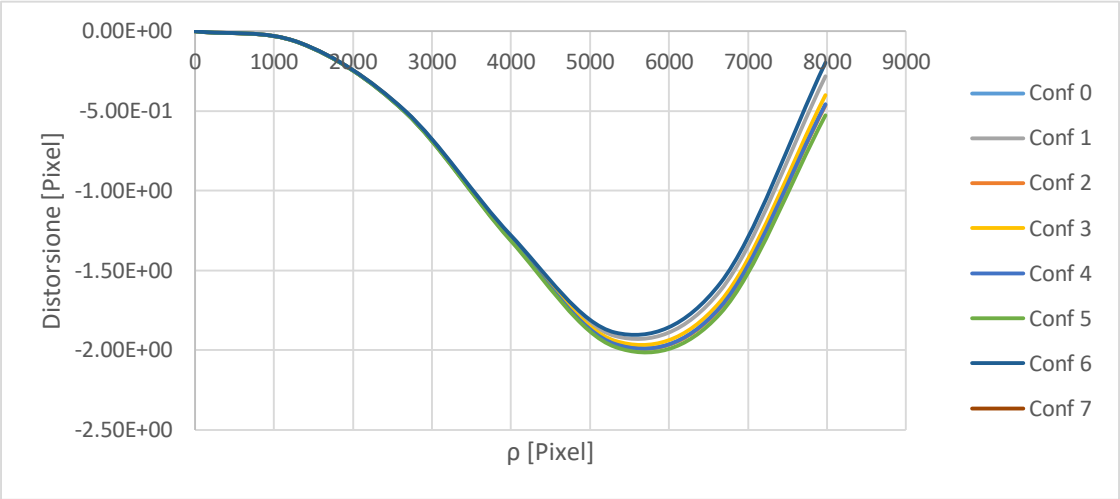


Figura 66: Andamento distorsione radiale del Modello Nadirale a 8 parametri

Successivamente l'andamento subisce una forte pendenza fino ad avere un picco intorno ai 5600 pixel. Essi corrispondono a circa 216 m. Tutti i punti appartenenti alla circonferenza di raggio circa pari a 216 m, centrata nella proiezione del centro del pixel sul terreno, risentono della massima distorsione, pari a 1.98 Pixel, 0.0074 mm sul sensore che corrispondono a 76.3 mm a terra. Nel punto massimo la distorsione è maggiore degli scarti che abbiamo trovato mediamente in planimetria.

Gli andamenti della distorsione per le varie configurazioni sono qualitativamente molto simili. Quantitativamente la differenza massima, in corrispondenza del picco, è pari a 0.09 Pixel. Il valore è trascurabile, per cui da questo momento in poi considereremo unicamente la distorsione della configurazione 0.

7.2.2 Modello Inclinate a 8 parametri

Anche per le Inclinate riportiamo i parametri di calibrazione e l'andamento grafico della distorsione. In questo caso si riportano unicamente i parametri della configurazione 0.

	Inclinate
f [Pixel]	1.37E+04
cx [Pixel]	6.02E+01
cy [Pixel]	-1.06E+01
k1	-3.92E-02
k2	3.41E-02
k3	-9.84E-03
p1	-8.19E-05
p2	9.42E-05

Tabella 38: Parametri calibrazione modello inclinate

Anche in questo caso traduciamo i numeri in un grafico.

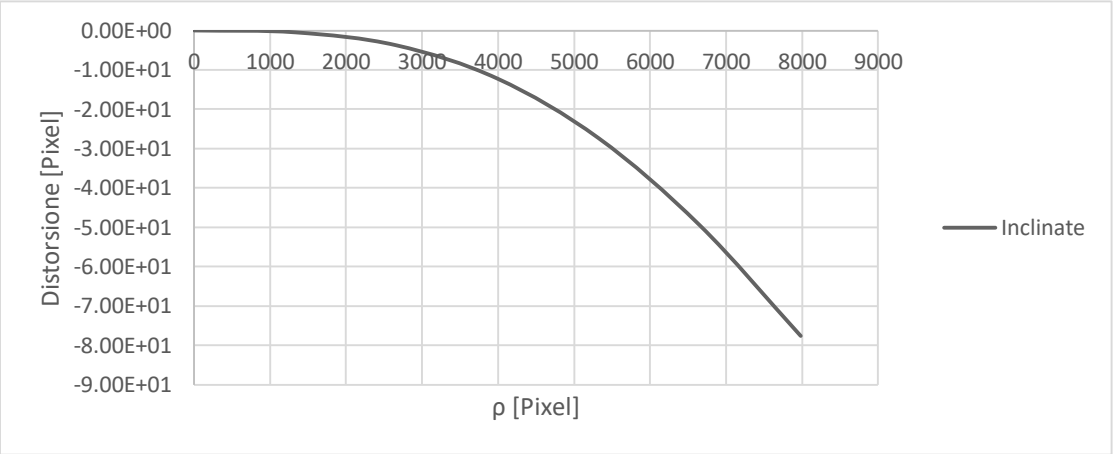


Figura 67: Andamento distorsione radiale immagini Inclinate

Possiamo subito notare come già qualitativamente il grafico assume una forma diversa. La curva ha una tangente orizzontale fino a circa 1500 Pixel per poi crescere in maniera monotona senza mostrare punti di flesso. In questo caso non abbiamo un picco. Vediamo anche che in corrispondenza dell'ultimo valore di ascissa siamo intorno agli 80 pixel di distorsione, circa 40 volte in più del picco del grafico proveniente dal modello nadirale a 8 parametri. 8 pixel di distorsione corrispondono a circa 0.3 mm sul sensore e 3080.3 mm a terra. Questo modello risulta decisamente più distorto del modello nadirale.

Infatti, possiamo confrontare gli andamenti della distorsione nei due casi esaminati:

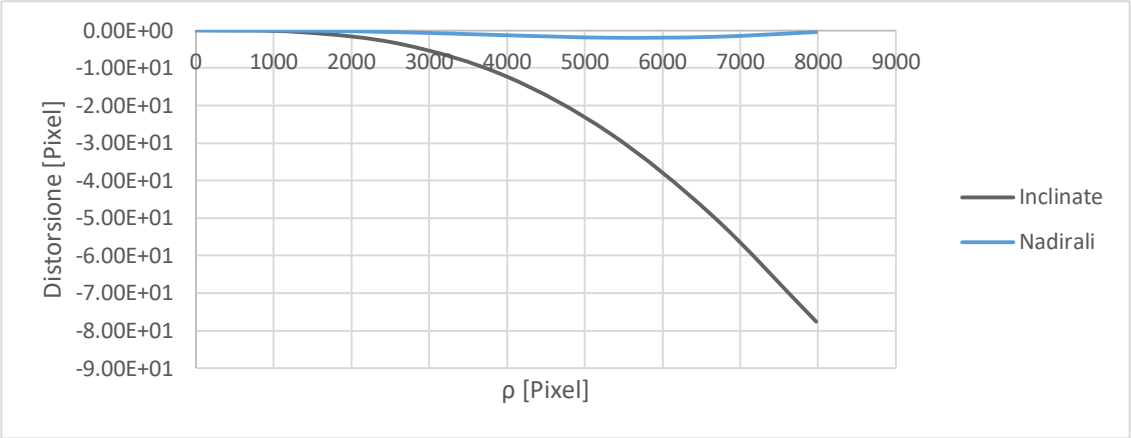


Figura 68: Andamento distorsione radiale immagini Nadirali ed Inclinate

Analizzando gli andamenti grafici della distorsione, sembrerebbe quasi di confrontare due camere diverse. Per questo motivo, non trovando riscontro tra gli andamenti delle distorsione si è deciso di inserire nel software sia le immagini nadirali che quelle inclinate e creare un modello allineando la totalità delle immagini.

7.2.3 Modello Misto a 8 parametri

Vediamo allora come risponderà il modello composto da tutti i fotogrammi a nostra disposizione (a presa nadirale e a presa inclinata) in termini di curva di distorsione. Questo modello si basa dunque su 841 immagini. Una volta lanciato l'allineamento delle immagini, ci si rende subito conto che la nuvola sparsa di punti creata, nonostante la qualità richiesta al modello fosse più alta (si è richiesta una qualità "high") rispetto modello Nadirale (qualità "medium"), fosse molto meno densa rispetto ai due modelli precedenti (il modello Nadirale e modello Inclinate). Infatti i punti di legame trovati nel modello misto sono: 140.414, contro i 391.626 del modello Nadirale e 12.977.161 del modello con fotogrammi a presa inclinata. Anche in questo caso alcuni Marker sono stati tagliati fuori dal modello in quanto non rientravano all'interno della nuvola.

Nell'immagine successiva si possiamo notare come nella nuvola di punti sparsa siano presenti svariate zone bianche in cui non è avvenuta alcuna intersezione dei raggi omologhi. Questo può essere un primo indizio: un rilievo a prese Nadirali e uno a prese Inclinate potrebbero far fatica

a trovare punti in comune, di conseguenza sembrerebbe necessario avere due certificati di calibrazione separati.

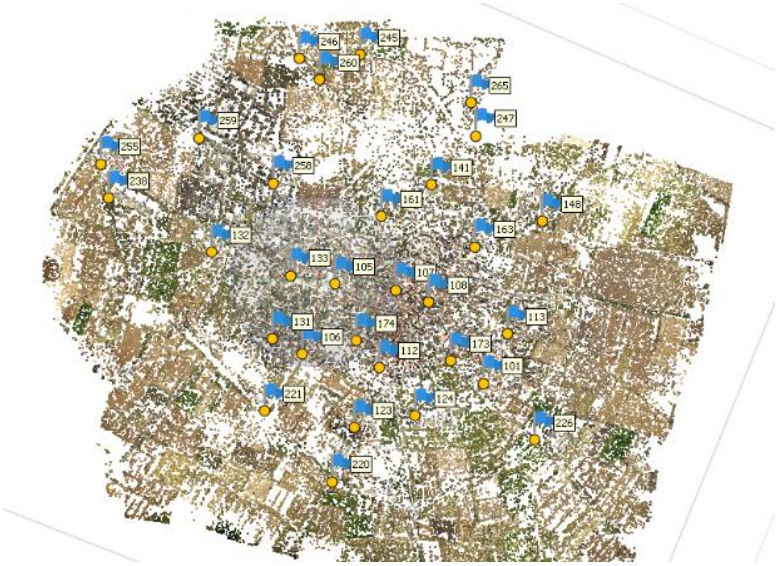


Figura 69: Nuvola sparsa modello Nadirali più Inclinate

Un secondo indizio lo troviamo nel momento del posizionamento dei Marker. Si è visto nel paragrafo 4.1 che, posizionando un marker sul rispettivo punto immagine, la bandierina diventa verde mentre sugli altri fotogrammi contenenti quel marker diventa blu. Nel modello misto, invece, è stato riscontrato che posizionando il marker sul primo fotogramma, sulle immagini dello stesso tipo viene suggerita la posizione, sulle altre no. In altri termini, ipotizziamo che il primo marker che vogliamo posizionare sia su un fotogramma nadirale, il suggerimento di posizione ci viene fornito solo sulle altre immagini nadirali, mentre sulle inclinate contenenti lo stesso punto immagine la posizione non è suggerita e la bandierina resta bianca. Finito l'allineamento delle immagini nadirali, e passando al posizionando dello stesso marker sulla prima immagine a presa inclinata, le bandiere delle immagini inclinate, contenenti il marker, assumono colore blu. Anche in questo caso sembra quasi che i due modelli "non comunichino" tra di loro, restando indipendenti.

Una volta terminata la fasi di posizionamento dei marker sui rispettivi punti immagine si lancia la compensazione. In questo modello sono state analizzate solo tre configurazioni, come era stato per le immagini a presa inclinata nel capitolo 6. La configurazione 0 ha tutti i marker come GCP, la numero 1 solo quelli rilevati dalla squadra 1 e la configurazione 2 solo i marker della squadra 2. A questo punto possiamo vedere gli scarti che abbiamo ottenuto:

	Control Points		
	E [cm]	**N [cm]**	**h [cm]**
Configurazione 0	6.34	5.85	41.54
Configurazione 1	5.40	5.74	5.76
Configurazione 2	6.17	6.84	43.14

Tabella 39: Scarti su Control Points modello Nadirali & Inclinate

	Check Points		
	E [cm]	**N [cm]**	**h [cm]**
Configurazione 0	0.00	0.00	0.00
Configurazione 1	13.86	15.23	282.00
Configurazione 2	11.11	7.11	268.00

Tabella 40: Scarti su Check Points modello Nadirali & Inclinate

Notiamo che già negli scarti sui control points qualcosa non funziona. Fino a questo momento avevamo quasi evitato di analizzare gli scarti sui control points poiché inferiori anche ai 2 cm in alcuni casi. Nel modello misto invece tutti gli scarti superano abbondantemente 5 cm. La situazione non migliora se andiamo a controllare quello che succede sui Check Points, nei quali lo scarto altimetrico arriva quasi a 3 m.

Anche questa analisi è un campanello dall'allarme, dall'unione di due ottimi modelli, in termini di scarti, viene creato un modello che presenta incertezze significative. Allineare un numero elevato di fotogrammi appartenenti, per così dire, a due scuole di pensiero differenti (immagini a presa nadirale e immagini a presa inclinata) non è la soluzione che sistema le cose. Infatti, la curva di distorsione del modello misto, risulta essere una combinazione tra i due singoli modelli. Di seguito vediamo i parametri di calibrazione e la curva di distorsione.

	Nadirali & Inclinate
f [Pixel]	1.37E+04
Cx [Pixel]	6.47E+01
Cy [Pixel]	-8.27E+00
k1	-3.70E-02
k2	1.39E-01
k3	-1.67E-01
p1	1.31E-04
p2	9.93E-05

Tabella 41: Parametri calibrazione Nadirali & Inclinate

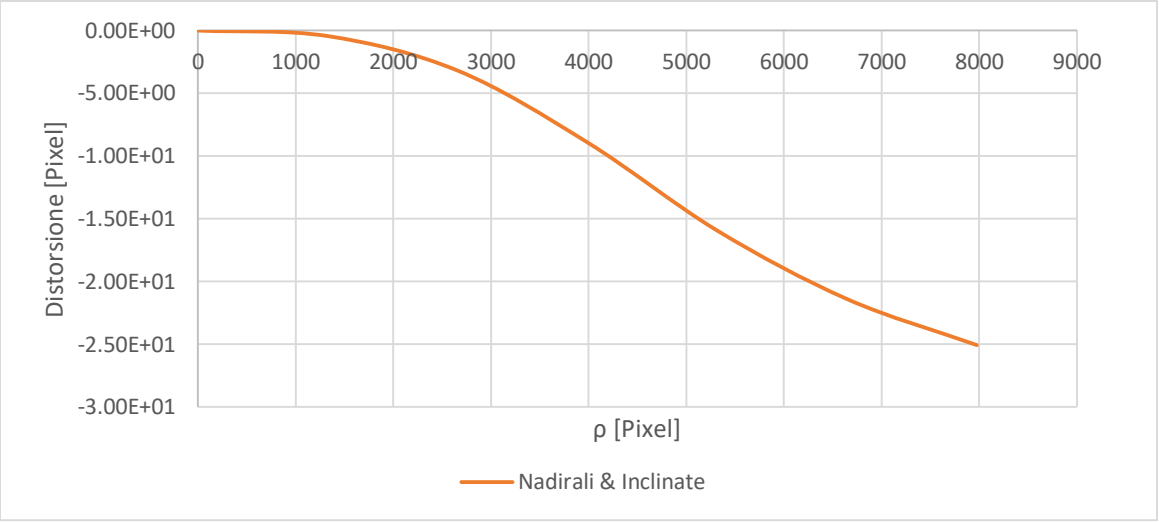


Figura 70: Andamento distorsione radiale immagini Nadirali & Inclinate

Studiando l'andamento della curva di distorsione, vediamo che presenta la prima parte che segue lo stesso percorso della distorsione del modello inclinate mentre presenta un cambio di concavità intorno ai 5000 Pixel. Nel caso del modello nadirale il flesso si trova a circa 3500 Pixel. Mettiamo a confronto gli andamenti della distorsione per i 3 modelli:

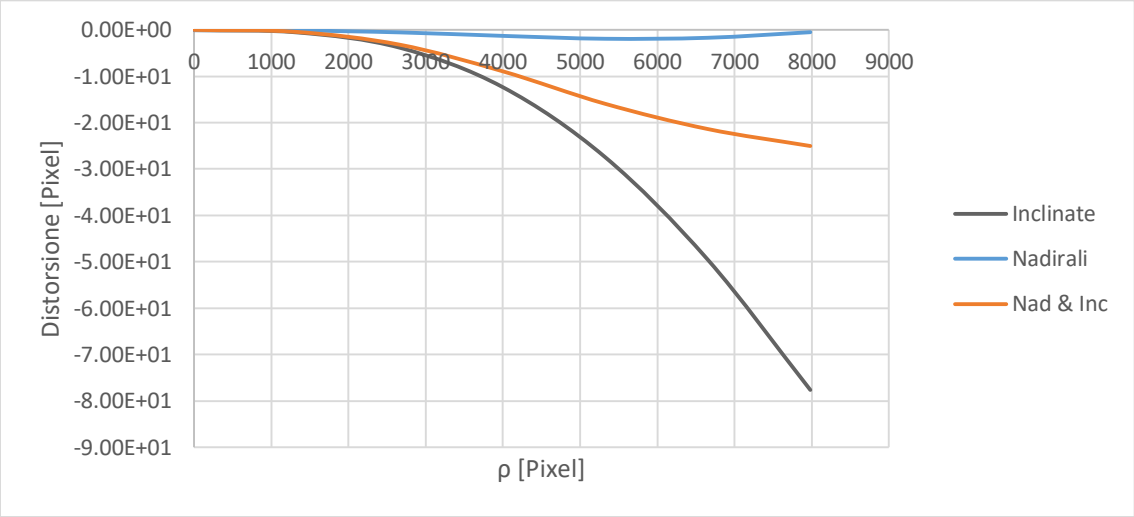


Figura 71: Confronto andamenti distorsione

A questo punto, per togliere ogni dubbio, nel modello nadirale sono stati inseriti (forzandoli) i parametri di calibrazione stimati nel modello misto e sono stati valutati anche in questo caso gli andamenti degli scarti per tutte le configurazioni del Cap. 4.

	Control Points			
	E [cm]	**N [cm]**	**h [cm]**	**Tot [cm]**
Configurazione 0	12.89	12.46	30.65	35.51
Configurazione 1	4.67	6.68	44.66	45.40
Configurazione 2	19.16	19.21	49.76	56.68
Configurazione 3	7.42	11.08	52.37	54.04
Configurazione 4	7.45	12.09	51.61	53.53
Configurazione 5	19.04	34.26	61.57	72.99
Configurazione 6	15.85	3.50	21.39	26.85
Configurazione 7	16.56	12.96	6.43	21.99

Tabella 42: Control Points delle configurazioni del modello nadirale con parametri del modello misto

Anche in questo caso, già i control points sono sintomatici di un abbassamento della precisione del modello. Il valore degli scarti risulta più elevato dello stesso modello con i "propri" parametri di calibrazione. Il fatto che siano più alti poteva essere previsto in quanto sono stati forniti dei parametri che comportano una distorsione superiore a quella del modello originale. Tuttavia alcuni valori sono decisamente più alti sia in planimetria che in altimetria (soprattutto). Lo scarto in quota, per alcune configurazioni supera 50 cm. Gli scarti sono da considerare elevati soprattutto perché il software, come ripetuto più volte, utilizza i control points per generare il modello. Vediamo i Check Points.

	Check Points			
	E [cm]	N [cm]	h [cm]	Tot [cm]
Configurazione 0	0.00	0.00	0.00	0.00
Configurazione 1	40.24	45.77	1173.83	1175.41
Configurazione 2	21.77	12.13	190.48	192.10
Configurazione 3	23.23	18.42	472.82	473.75
Configurazione 4	21.58	18.51	472.89	473.75
Configurazione 5	41.07	36.96	507.72	510.71
Configurazione 6	32.15	35.04	1008.61	1009.73
Configurazione 7	18.15	26.12	1141.56	1142.00

Tabella 43: Check Points delle configurazioni del modello nadirale con i parametri del modello misto

I Check Points confermano, ancora una volta, che i modelli nadirale e inclinate non riescano a comunicare tra di loro nemmeno attraverso il modello misto.

Quanto visto fino a questo momento è figlio di 8 parametri di calibrazione stimati. Abbiamo visto che in realtà, tramite Metashape Professional, i parametri stimabili sono 11. Vogliamo allora

vedere se è lecito trascurare i 3 parametri aggiuntivi. Il parametro k4 è possibile che sia ininfluente per la distorsione in quanto se analizziamo la formula in cui compare vediamo che moltiplica un termine minore di 1 elevato all'ottava. Ci concentreremo sui parametri b_1 e b_2.

7.3 Analisi delle componenti principali sui parametri di calibrazione

Non avendo trovato corrispondenza tra le curve di distorsione dei tre modelli, ci si è chiesti se il responsabile fosse l'aver trascurato termini nel calcolo della curva di distorsione. I termini che potrebbero unificare le soluzioni sono i parametri b, che tengono conto della perdita di ortogonalità tra i lati del pixel.

Abbiamo visto che con il metodo delle Componenti Principali riusciamo a trovare una base che renda diagonale una matrice di correlazione con i termini sulla diagonale che corrispondono alla massiva varianza della misura. A tal proposito allora i tre modelli sono stati ri-compensati utilizzando tutti e 11 i parametri e sono state analizzate le matrici di correlazione dei parametri di calibrazione della camera. Metashape fornisce la possibilità di ottenere in output la matrice di correlazione delle grandezze. Di seguito, a titolo d'esempio, vediamo la matrice di correlazione del modello nadirale in cui sono stimati tutti i parametri di calibrazione.

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	**13748.2**	0.24	1.00	-0.08	-0.31	0.27	-0.05	-0.05	0.04	-0.03	0.02	-0.00	0.02
Cx	**58.6115**	0.044		1.00	0.03	0.05	0.16	-0.00	0.00	-0.00	0.00	0.43	-0.00
Cy	**-7.00399**	0.045			1.00	-0.18	0.16	0.00	-0.00	-0.00	0.01	0.00	0.39
B1	**0.126029**	0.0094				1.00	-0.03	0.01	-0.02	0.02	-0.02	-0.06	0.00
B2	**-0.752122**	0.0088					1.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.06	0.04
K1	**-0.00336805**	2.3e-05						1.00	-0.98	0.93	-0.89	-0.01	0.00
K2	**0.00189342**	0.00022							1.00	-0.99	0.96	0.01	-0.00
K3	**0.0699552**	0.0008								1.00	-0.99	-0.01	0.00
K4	**-0.134015**	0.001									1.00	0.01	-0.00
P1	**5.46695e-06**	5.1e-07										1.00	-0.01
P2	**8.67507e-05**	4.5e-07											1.00

Figura 72: Matrice di Correlazione dei parametri della camera nella Configurazione 0 del modello nadirale

Diamo uno sguardo alla matrice, con particolare attenzione ai termini fuori diagonale (come abbiamo visto nei richiami teorici, la matrice è simmetrica e per questo motivo non vengono riportati i termini al di sotto della diagonale. Vediamo come possiamo leggere la matrice per avere un'idea di quanto le grandezze in questione siano correlate tra di loro.

La distanza principale F per esempio risulta essere poco correlata con l'offset C_x del punto principale, avendo un coefficiente pari a 0.08. Risulta invece più correlata con il parametro C_y e B_1 e quasi non correlata con i restanti parametri. Vediamo allora che la presenza del parametro B_1 influisce sul valore della distanza principale. Le più grandi correlazioni le troviamo comunque tra il parametro K_1 e K_2 con un coefficiente di 0.98.

A questo punto, per diagonalizzare la matrice, che vuol dire trovare i suoi autovalori, ci siamo serviti di uno script di Matlab. Riportiamo di seguito le componenti principali, sotto forma di vettore.

	Nadirali	**Inclinate**	**Nad & Inc**
f [mm]	0.057821	0.9252072	0.011553
cx [mm]	0.001826	0.0165214	0.0003473
cy [mm]	0.001927	0.013935	0.0001616
b1	8.06E-05	0.0020436	7.787E-05
b2	7.33E-05	0.0023028	1.139E-05
k1	1.68E-06	6.008E-06	4.334E-08
k2	1.02E-08	3.659E-08	2.769E-10
k3	1.34E-10	1.702E-10	-3.489E-12
k4	-1.2E-10	-1.58E-10	2.036E-12
p1	1.69E-13	7.77E-13	7E-15
p2	2.09E-13	8.55E-13	6.8E-14

Tabella 44: Componenti Principali dei parametri di Calibrazione

È interessante vedere che i parametri b_1 e b_2, prima trascurati nel calcolo della distorsione sono quasi 2 ordini di grandezza più grandi di k1. I termini b_1 e b_2 sono responsabili dell'ortogonalità del pixel. Le grandezze b1 e b2 allora sono più sensibili dei parametri k circa la distorsione dell'immagine. Presentano infatti una varianza maggiore e per questo motivo sono state lanciate nuovamente tutte le compensazioni per tutti i modelli e tutte le configurazioni viste fino a questo momento. Diversamente dei termini b, il termine k4 può ritenersi trascurabile come anche i termini p1 e p2. La distorsione nelle lenti è prevalentemente radiale, mentre in direzione tangenziale è da ritenersi nulla.

Nei seguenti paragrafi rivedremo tutti e tre i modelli e le relative distorsioni, con la differenza che in questo caso saranno figlie di 11 parametri e non più di 8.

7.3.1 Modello nadirale a 11 parametri

Torniamo al modello nadirale stimando 11 parametri e vediamo se, e in che quantità, cambia rispetto al modello a 8 parametri. Come anche fatto nel paragrafo analogo mostriamo dapprima i valori stimati e in seguito analizziamo la curva di distorsione.

	Nadirali
f	13748.219
cx	58.6114514
cy	-7.0039903
b1	0.1260293
b2	-0.7521218
k1	-0.0033681
k2	1.89E-03
k3	7.00E-02
k4	-1.34E-01
p1	5.47E-06
p2	8.68E-05

Tabella 45: Parametri di calibrazione configurazione 0 del modello nadirale

Prima di procedere con il calcolo della distorsione vediamo come cambiano gli scarti nelle varie configurazioni del modello nadirale. Utilizzando un modello più accurato per la distorsione dei fotogrammi ci aspettiamo che i valori siano migliori. Infatti possiamo vedere nella tabella successiva i valori dei nuovi scarti, trovati utilizzando gli 11 parametri, confrontati con gli scarti trovati nel Cap. 4.

Anche in questo caso vengono analizzati prettamente gli scarti sui Check Points. Vediamo che in planimetria, quindi nella coordinata Est e Nord, gli scarti diminuiscono sempre, seppur di poco. In altimetria la situazione non migliora né peggiore. Avevamo infatti visto che il problema poteva dipendere dalla planarità del sito, di conseguenza una modifica ai parametri di calibrazione della camera non porta a risolvere il problema. La configurazione 2 è, anche in questo caso la migliore ottenibile. I discorsi fatti nel capitolo 4 possono essere dunque ripetuti.

Check Points					
	E [cm]	**N [cm]**	**h [cm]**	**Tot [cm]**	**n° Parametri**
Configurazione 0	0.00	0.00	0.00	0.00	8
	0.00	0.00	0.00	0.00	11
Configurazione 1	4.11	3.70	16.91	17.79	8
	3.80	3.11	17.84	18.50	11
Configurazione 2	2.45	3.11	5.44	6.73	8
	2.25	2.46	5.63	6.55	11
Configurazione 3	4.11	4.06	10.33	11.84	8
	3.56	3.78	10.05	11.31	11
Configurazione 4	3.53	5.31	13.50	14.93	8
	3.39	3.93	13.27	14.24	11
Configurazione 5	4.07	2.66	10.15	11.26	8
	3.01	2.70	10.19	10.96	11
Configurazione 6	3.92	3.99	21.78	22.48	8
	3.04	3.94	20.77	21.36	11
Configurazione 7	5.50	3.33	19.18	20.23	8
	4.82	3.18	16.23	17.23	11

Tabella 46: Confronto Check Points Nadirali (11 e 8 Parametri)

Per il calcolo della distorsione sono state utilizzate le formule complete che tenessero conto di tutti e 11 i parametri di calibrazione. Le formule utilizzate sono quelle del modello fornite dal programma Metashape Professional, nella sezione “help” e che abbiamo avuto modo di accennare le capitolo 2 al paragrafo 2.3. Attraverso l’utilizzo di queste formule è stata calcolata la distorsione e rappresentata graficamente come fatto per i modelli ad 8 parametri.

Il grafico seguente mette a confronto la distorsione calcolata utilizzando 8 parametri con la distorsione calcolata utilizzando 11 parametri. Tra i due picchi è presente una variazione di meno di un pixel. Gli andamenti sembrano non essere compatibili nella parte finale. In realtà possiamo vedere come la curva di distorsione calcolata con 11 parametri anticipi l’andamento della curva, oltre che ad essere più bassa. Ci aspettiamo infatti che se spingessimo oltre la coordinata radiale ρ troveremmo anche nella curva a 8 parametri un picco massimo. Questo lo possiamo vedere nel secondo grafico. Si noti bene che analiticamente è possibile prolungare la coordinata radiale, ma andare oltre le dimensioni del sensore non ha un significato fisico. Infatti la coordinata radiale ha origine nel punto principale del sensore e mostra l’andamento della distorsione al variare di questa coordinata.

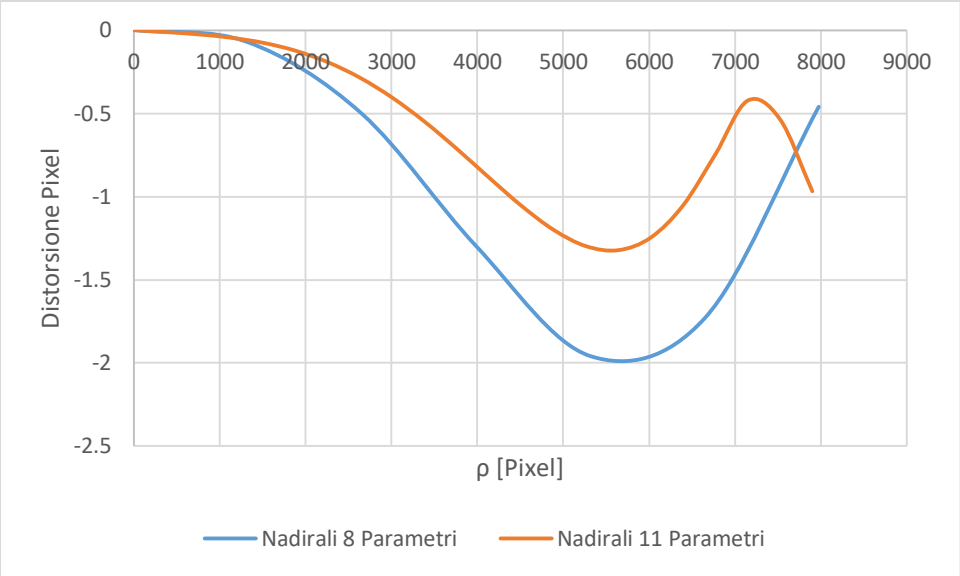


Figura 73: Andamento Distorsione Nadirale 11 e 8 Parametri

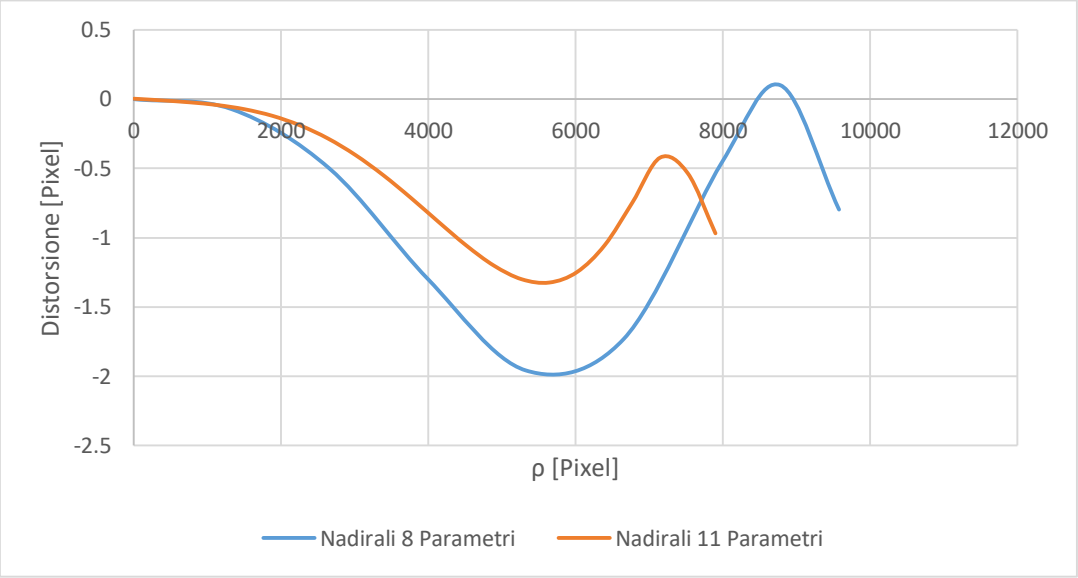


Figura 74: Andamento Distorsione Nadirale 11 e 8 Parametri estensione diagonale

Se l'utilizzo di 11 parametri piuttosto che 8 poteva rappresentare un punto di incontro tra le curve che avevamo visto per i 3 modelli, possiamo affermare, dal grafico ottenuto che in realtà ci stiamo allontanando. Infatti l'andamento della distorsione che otteniamo nel modello a 11 parametri risulta essere ancora più lontano di quello che era l'andamento della distorsione nel modello inclinate. Ci aspettiamo, dai prossimi paragrafi dunque, che gli andamenti siano molto simili a quelli precedentemente trovati e che quindi i immagini nadirali ed immagini inclinate forniscano due modelli distinti con conseguenti calibrazioni distinte. Questo potrebbe voler dire

che la camera con cui si è effettuato il rilievo non può essere calibrata una volta per tutte ma che dipenda dal set up iniziale.

7.3.2 Modello Inclinate a 11 parametri

La struttura di questo sotto paragrafo è la stessa del precedente. Vedremo in ordine: i parametri di calibrazione, gli scarti del modello ed infine le curve di distorsione.

	Inclinate
f	13748.76701
cx	69.3079935
cy	-10.31852927
b1	-2.897055456
b2	-0.105676196
k1	-0.039610293
k2	3.74E-02
k3	-2.21E-02
k4	0.014825219
p1	-0.000103181
p2	9.60E-05

Tabella 47: Parametri di calibrazione per la configurazione 0 del modello Inclinate

	Control Points				
	E [cm]	N [cm]	h [cm]	Tot [cm]	n° Parametri
Configurazione 0	2.27	1.98	3.59	4.68	8
	2.29	1.98	3.52	4.64	11
Configurazione 1	2.19	1.63	1.86	3.30	8
	2.16	1.66	1.81	3.27	11

Tabella 48: Confronto tra scarti Control Points Inclinate 8 e 11 Parametri

	Check Points				
	E [cm]	N [cm]	h [cm]	Tot [cm]	n° Parametri
Configurazione 0	0.00	0.00	0.00	0.00	8
	0.00	0.00	0.00	0.00	11
Configurazione 1	2.79	2.71	7.24	8.22	8
	2.86	2.69	6.15	7.30	11

Tabella 49: Confronto tra scarti Check Points Inclinate 8 e 11 Parametri

Come nel caso del modello Nadirale anche in questo caso è presente un lieve miglioramento sul valore degli scarti, che può considerarsi trascurabile.

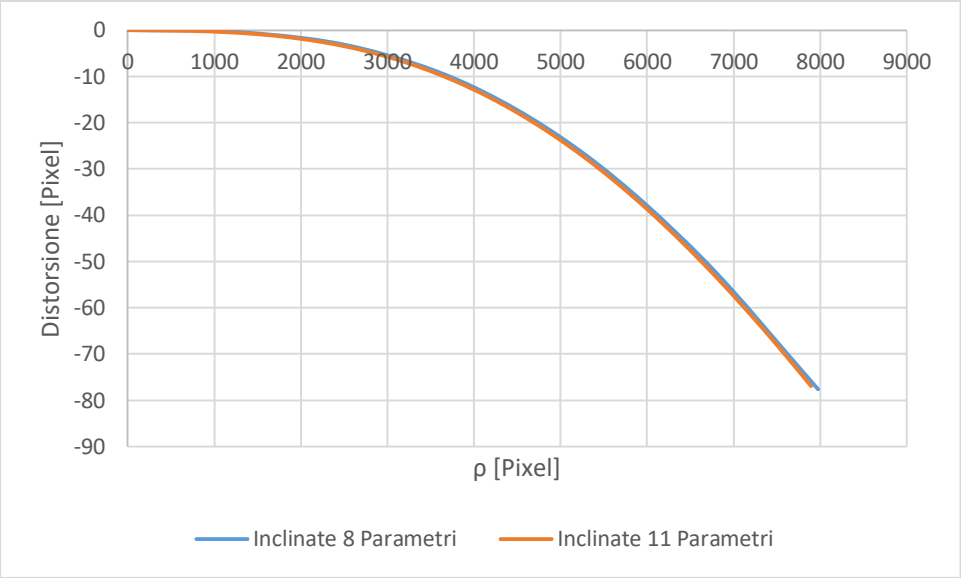


Figura 75: Andamento Distorsione Inclinate 11 e 8 Parametri

Come avevamo anticipato, gli andamenti della distorsione sono quasi coincidenti per cui, anche in questo caso, l'aggiunta dei parametri di calibrazione può essere trascurata.

7.3.3 Modello Misto a 11 parametri

Infine si riportano gli 11 parametri stimati, gli scarti e gli andamenti delle distorsioni.

	Nadirali e Inclinate
f	13745.3562
cx	64.2799475
cy	-8.6685898
b1	1.85983321
b2	-0.0439648
k1	-0.0368413
k2	0.13649495
k3	-0.159379
k4	-0.0098358
p1	0.00014124
p2	1.02E-04

Tabella 50: Parametri di calibrazione della configurazione 0 del modello misto

	Control Points			
	E [cm]	N [cm]	h [cm]	n° Parametri
Configurazione 0	6.33	5.85	41.54	8
	5.20	5.10	41.66	11
Configurazione 1	5.40	5.74	57.60	8
	5.10	5.34	57.80	11
Configurazione 2	6.17	6.84	43.14	8
	4.43	5.74	42.2	11

Tabella 51: Confronto scarti sui Control Points del Modello Nadirali & Inclinate 8 e 11 Parametri

	Check Points			
	E [cm]	N [cm]	h [cm]	n° Parametri
Configurazione 0	0.00	0.00	0.00	8
	0.00	0.00	0.00	11
Configurazione 1	13.86	15.23	282.00	8
	10.33	11.81	281.00	11
Configurazione 2	11.11	7.11	268.00	8
	7.22	7.44	275.00	11

Tabella 52: Confronto scarti sui Check Points del modello Nadirali & Inclinate 8 e 11 Parametri

La configurazione 0 è quella dove tutti i marker sono utilizzati come Control Points. Le configurazioni 1 e 2 considerano come Control Points rispettivamente i Marker della Squadra 1 e Squadra 2, al solito.

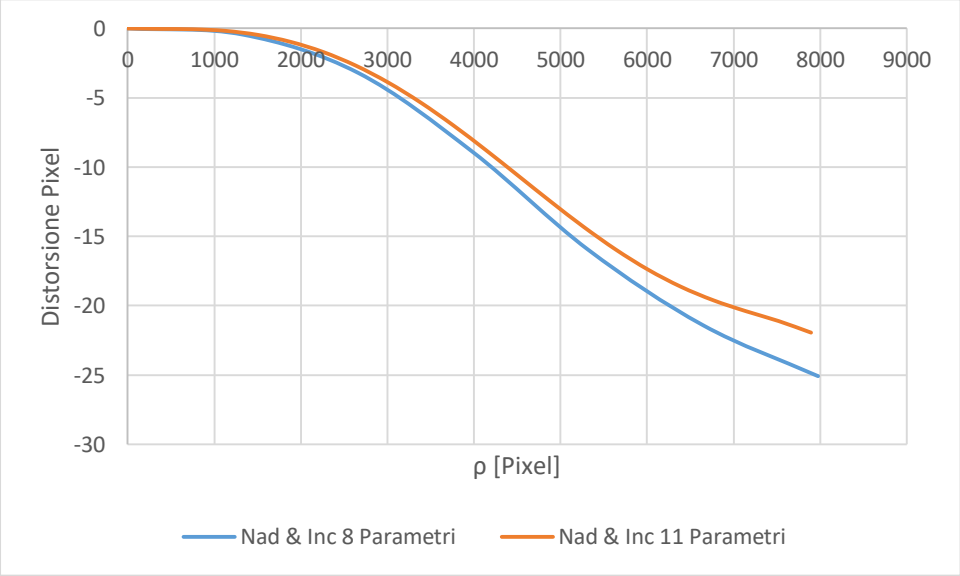


Figura 76: Andamento Distorsione del modello misto a 8 e 11 Parametri

La distorsione rispecchia quanto visto fino a questo momento. Nel caso delle Nadirali si è visto come la distorsione basata su 11 parametri quasi anticipasse la distorsione a 8 parametri, mentre per le inclinate i due grafici erano quasi sovrapposti. Confrontando la distorsione figlia dell'unione dei due blocchi di fotogrammi possiamo affermare che accade la stessa cosa: un primo tratto in cui gli andamenti partono insieme per poi vedere che la distorsione a 11 parametri anticipa quella a 8.

Per completezza, come fatto per il caso a 8 parametri, riportiamo i valori degli scarti delle varie configurazioni del modello nadirale utilizzando gli 11 parametri stimati nel modello misto come se provenissero da un certificato di Calibrazione. Gli scarti sono messi a confronto con i relativi scarti trovati nel modello a 8 parametri (sempre forzati).

	Check Points				
	E [cm]	N [cm]	h [cm]	Tot [cm]	n° Parametri
Configurazione 0	0.00	0.00	0.00	0.00	8
	0.00	0.00	0.00	0.00	11
Configurazione 1	40.24	45.77	1173.83	1175.41	8
	38.85	47.46	1174.34	1175.94	11
Configurazione 2	21.77	12.13	190.48	192.10	8
	18.46	12.57	190.81	192.11	11
Configurazione 3	23.23	18.42	472.82	473.75	8
	20.62	20.51	473.35	474.24	11
Configurazione 4	21.58	18.51	472.89	473.75	8
	18.47	22.54	474.25	475.15	11
Configurazione 5	41.07	36.96	507.72	510.71	8
	39.34	38.50	508.79	511.76	11
Configurazione 6	32.15	35.04	1008.61	1009.73	8
	31.39	35.31	1009.00	1010.10	11
Configurazione 7	18.15	26.12	1141.56	1142.00	8
	19.37	27.06	1142.55	1143.04	11

Tabella 53: Confronto tra Check Points delle configurazioni Nadirali utilizzando i parametri del modello misto a 8 e a 11 parametri

Coerentemente a quanto visto fino a questo momento, gli scarti sui check Points migliorano in planimetria e lasciano molti dubbi sull'altimetria. E anche in questo caso le migliorie presenti non rilevanti e non possiamo dare per affidabile questo modello.

7.4 Conclusioni

Ripercorriamo quanto visto in questo capitolo per trarre delle conclusioni. Abbiamo suddiviso le varie casistiche che avevamo a disposizione in tre modelli e per ciascuno sono stati stimati i parametri di calibrazione. Prima sono stati analizzati gli 8 parametri per quello che possiamo definire modello semplificato della distorsione. In queste condizioni abbiamo visto che i grafici del modello nadirale e del modello inclinato presentavano differenze sostanziali sia qualitativamente che quantitativamente, portando ad avere un modello poco distorto nel modello nadirale e più distorto in quello inclinato. Nonostante questa differenza, gli scarti per le rispettive configurazioni sono comunque bassi, fatta eccezione per l'altimetria, problema però che abbiamo visto non dipendere dalla distorsione, o perlomeno, non principalmente. Questo ci porta alla prima conclusione, ovvero che il software Metashape non trova una soluzione esatta del problema ma tende a "mettere a posto" le cose affinché gli scarti raggiungano i valori più bassi possibili. Del resto, il principio su cui fa leva il software è la risoluzione delle equazioni di collinearità per mezzo del metodo dei minimi quadrati. La Statistica ci insegna che questo metodo non trova una soluzione esatta, eliminando gli errori, ma tende a minimizzare il quadrato degli scarti. La presenza di un errore non è segnalata, anzi viene "spalmata" tra le equazioni.

Abbiamo visto poi, dal terzo modello, quello misto, che la curva di distorsione era una combinazione delle precedenti. A questo punto tramite un'analisi delle componenti principali abbiamo diagonalizzato la matrice di correlazione degli 11 parametri e abbiamo visto come i parametri b mostrino una sensibilità maggiore al problema, avendo una varianza maggiore rispetto ai parametri k. Questo però non è bastato a correggere le curve di distorsione che coerentemente con le ipotesi fatte risento quasi esclusivamente delle componenti radiali.

Ci resta da pensare dunque che la camera non sia calibrabile in senso assoluto, ma che i parametri dipendano molto dal set up iniziale del rilievo. Una prova che potrebbe essere fatta è quella di vedere se i parametri si avvicinino nel caso in cui venisse fatto il volo fotogrammetrico con più quote. Quindi un possibile sviluppo futuro, a titolo di tentativo, è lo stesso del capitolo 5, ovvero in fase di rilievo aereo, provare ad effettuare strisciate che abbiano quote diverse.

Vedremo infine, nei prodotti finali, che, sebbene ci siano queste incompatibilità tra i modelli, gli output ottenibili sono soddisfacenti e si riesce dunque ad avere, per quanto riguarda le immagini inclinate una buona visuale, nel modello tridimensionale, sulle facciate degli edifici.

8 Prodotti Finali

Come abbiamo visto nel capitolo introduttivo, la Fotogrammetria viene impiegata per l'acquisizione di dati relativi al terreno. Dai dati raccolti sui due rilievi svolti, è stato possibile produrre un'Ortofoto del comune di Livorno Ferraris e il suo relativo modello digitale del terreno. Questo è stato possibile grazie alle immagini Nadirali.

Con il modello inclinato invece siamo riusciti ad ottenere un modello 3D del sito, nel quale sono ben visibili le facciate degli edifici. Infine tramite immagini termiche, non analizzate nello specifico come per le Nadirali ed Inclinate, è stato ottenuto un'ortofoto termica.

Vedremo, nel capitolo conclusivo, come è possibile utilizzare tali prodotti, mentre nel presente vediamo i prodotti finali.

8.1 Ortofoto



Figura 77: Ortofoto Livorno Ferraris

L’ortofoto è una foto aerea che è stata geometricamente corretta e Georeferenziata in modo tale che la scala di rappresentazione della fotografia sia uniforme e quindi possa essere considerata equivalente ad una carta geografica. L’immagine prodotta attraverso la configurazione 0 del modello nadirale ha una densità di campionamento pari a 3.86 cm/pixel.

Per capire se il livello di campionamento è buono, analizziamo l’immagine successiva che è uno zoom dell’immagine completa precedente. Possiamo infatti vedere come sia ben distinguibile la segnaletica orizzontale e gli spigoli degli edifici. Notiamo anche come ogni elemento, è “visto dall’alto” quindi è rimossa la prospettiva. Su un’immagine di questo tipo, se inserita in programma GIS, per esempio, è possibile risalire alle coordinate di ogni punto ed effettuare delle misure senza essere presenti fisicamente sul luogo. Quindi, se volessimo conoscere il diametro dell’aiuola che vediamo nel centro (circa) dell’immagine, con gli opportuni software possiamo farlo. Un occhio più attento potrebbe anche riconoscere il modello delle auto del parcheggio che si trova in alto a sinistra dell’immagine.



Figura 78: Ingrandimento ortofoto

8.2 Modello digitale del Terreno (DTM)

Il DTM descrive la superficie del terreno in termini di quota. Il modello che è stato trovato attraverso il software in questo lavoro di tesi ha una densità di campionamento pari a 15.5 cm/pixel e comprende le quote tra 168 m e 237 m. Il dislivello è da ritenere discretamente attendibile in quanto è pari a circa 70 m, ben oltre le incertezze che abbiamo trovato sugli scarti altimetrici. Anche esso proviene dalla configurazione 0 del modello nadirale.

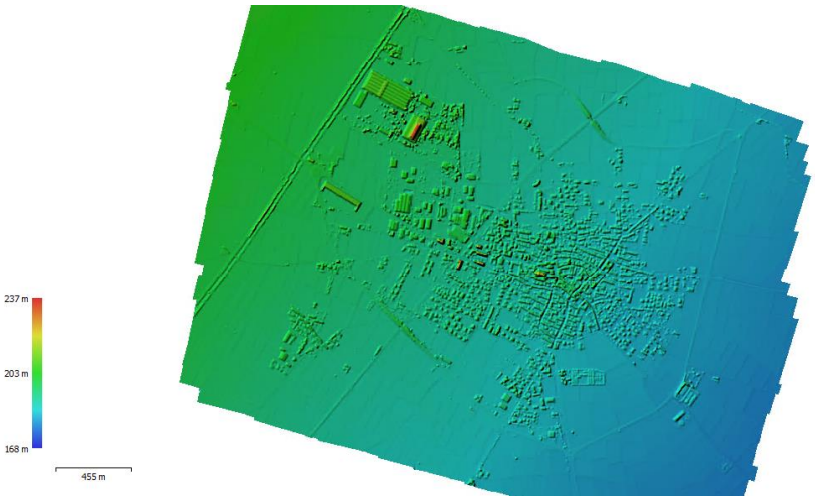


Figura 79: Modello digitale del Terreno DEM

Il DEM può essere utilizzato per delle pianificazioni e larga scala. Potrebbe essere utile, per la progettazione di grandi opere sapere l'andamento altimetrico del sito nonostante le incertezze che abbiamo trovato nei capitoli sul modello nadirale. È interessante vedere come, facendo uno zoom nel modello, sia stata rappresentata la Chiesa Parrocchiale di San Lorenzo in piazza Pietro Micca.

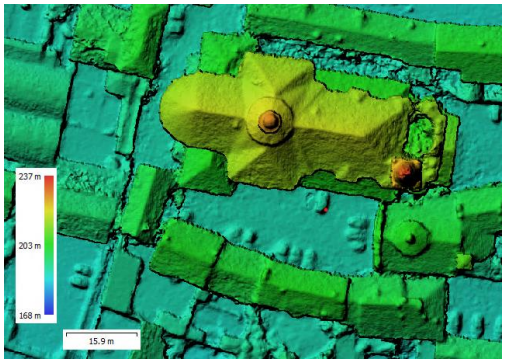


Figura 80: Zoom del DEM su Chiesa di San Lorenzo

8.3 Modello 3D

Per il modello tridimensionale del sito ci siamo serviti delle immagini inclinate. Infatti per poter apprezzare delle facciate degli edifici, le immagini nadirali possono non essere adatte. Dalle immagini seguenti possiamo ben apprezzare come gli edifici siano ben riprodotti e le facciate degli edifici siano ben distinguibili. È possibile infatti risalire al numero di piani di un edificio e anche, in parte, avere le altezze degli edifici. Le altezze tuttavia mostrano un livello di incertezza significativo e hanno delle precisioni dell'ordine di 30 - 40 cm. Inoltre in alcune zone e per alcune facciate è possibile notare gli effetti della maggiore distorsione, rispetto alle immagini nadirali. Infatti nell'ortofoto vista precedentemente, la distorsione è impercettibile mentre nelle immagini che seguono (nella prima, in basso a sinistra mentre nella seconda, nel viale centrale) è possibile notare la distorsione. Tuttavia possiamo dire che, per l'utilizzo catastale queste immagini possono essere abbastanza utili, per la rilevazione di eventuali abusivismi.



Figura 81: Modello 3D visuale 1



Figura 82: Modello 3D visuale 2

8.4 Immagini termiche

Sul velivolo, oltre alla camera descritta nell'elaborato, era presenta anche una camera di tipo termico. Vogliamo allora mostrare un prodotto finale di questo tipo, anche se non è stato trattato nell'elaborato. Tramite dunque le immagini è stato possibile ottenere un'ortofoto termica, la cui densità di campionamento è di 12.8 cm/pixel. Sicuramente come campionamento risulta più scarso dell'ortofoto proveniente dalle immagini nadirali, tuttavia se volessimo rilevare un campo fotovoltaico al fine di capire se qualche cella è inattiva, questa risoluzione sarebbe sufficiente.

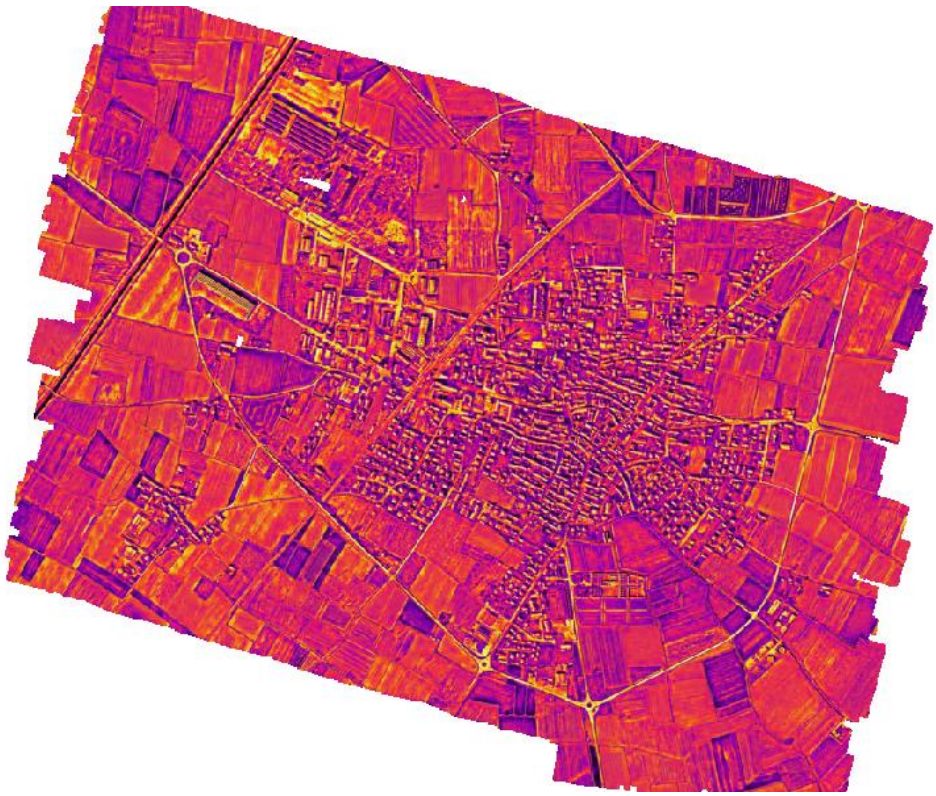


Figura 83: Immagini Termiche

Riferimenti prodotti finali:

PC: labtopo3 computer one IP *****.100

- Ortofoto e Dem - D:\Livorno Ferraris\Tesi_Giuseppe_Tommaso_Ria_257623\Soluzione_1\ DTM Nadirali;
- Modello 3D - D:\Livorno Ferraris\Tesi_Giuseppe_Tommaso_Ria_257623\Soluzione_1\Inclinate\Soluzione_0_Inclinate;
- Immagini Termiche - D:\Livorno Ferraris\Tesi_Giuseppe_Tommaso_Ria_257623\Progetto_Professore.

9 Conclusioni

Siamo finalmente giunti al termine di questo elaborato di tesi. Quando è iniziato, l'obiettivo era chiaro ma la strada da percorrere non era ancora tracciata. Era presente solo un'idea: è possibile ridurre le operazioni da svolgere durante un rilievo fotogrammetrico utilizzando meno risorse ed impiegando meno tempo? A seguito di tentativi, di prove e di ore di processamento, siamo giunti a diverse soluzioni e conclusioni. Ripercorriamole in ordine.

Nel capitolo 3 abbiamo visto le diverse fasi che si compiono in genere durante un rilievo fotogrammetrico, partendo dunque dalla pianificazione del volo e dalla raccolta delle immagini. Abbiamo visto come è stato organizzato il rilievo dei punti di appoggio a terra, la suddivisione in squadre e la compilazione delle monografie. Nei capitoli 4, 5 e 6 abbiamo invece analizzato la fasi da laboratorio, ovvero la restituzione per mezzo di software. Abbiamo analizzato prima il modello nadirale secondo diverse configurazioni per numero e distribuzione di GCP. Successivamente lo stesso modello e le stesse configurazioni sono state oggetto di riduzione dei fotogrammi. Infine è stato analizzato anche il modello inclinato, nel quale i fotogrammi di partenza e anche il volo di partenza erano completamente diversi. Infine nel capitolo 7 si è affrontato la delicata questione della calibrazione della camera, studiando e stimando i parametri e la loro influenza nella curva di distorsione.

A valle di questo breve richiamo sugli argomenti trattati, possiamo tirare le somme. Delle 8 configurazioni analizzate, tolta la configurazione 0 che prevedere l'utilizzo di tutti i marker come GCP, la soluzione ottimale è la numero 2, la configurazione che utilizza la metà dei Control Points figli dei punti rilevati dalla squadra 2. La caratteristica di questa configurazione è quella di avere tutti i punti disposti in maniera periferica nei confronti del centro Urbano. Abbiamo anche visto che le soluzioni peggiorano al diminuire dei punti GCP esterni e allo stesso tempo all'aumentare di quelli interni. Ne consegue che è molto probabile ottenere una maggiore precisione utilizzando punti perimetrali, poiché è come se meglio "stirassero" la nuvola di punti.

Tuttavia è sorto il primo problema dell'elaborato: gli scarti altimetrici. La causa di questa mancanza di precisione è ricaduta sulla planarità del sito. Questa ipotesi si ripete nel capitolo 5, quando sono state studiate configurazione aventi un numero di fotogrammi inferiore. Infatti si è trovato che rinunciando a due strisciate ogni tre, riducendo dunque il ricoprimento trasversale dall'82% al 44% le soluzioni, per alcuni tratti, migliorano pur lasciando un livello di incertezza

altimetrico non trascurabile. A termine del capitolo 5 dunque è stata trovata una configurazione di riferimento, quella avente metà dei marker utilizzata come GCP e un terzo delle strisciate, che risponde alla nostra domanda iniziale sull'ottimizzazione del rilievo. Un possibile sviluppo è stato anche mostrato. Esso potrebbe risolvere il problema dell'incertezza altimetrica e potrebbe fare anche in modo di ridurre ulteriormente i GCP da rilevare. Per realizzare questo rilievo, si dovrebbero utilizzare alcune delle strisciate rimosse, ad una quota superiore, in modo da avere eterogeneità in termini di quota nelle intersezioni dei raggi omologhi.

Dal modello nadirale, configurazione 0, abbiamo ottenuto sia l'ortofoto del comune Livorno Ferraris che il modello digitale del terreno. L'utilità di questi prodotti è stata discussa sia nel capitolo introduttivo che nel capitolo 8 e riguarda prettamente il fatto che un'ortofoto è un'immagine geometricamente corretta e georeferenziata il che comporta ad avere note le coordinate di ogni suo punto e alle quali è possibile risalire attraverso opportuni software. Le ortofoto dunque sono delle carte geografiche e sono molto utili soprattutto in fase di progettazione di opere pubbliche (e non) in quanto è possibile eseguire progetti preliminare senza dover ricorrere a rilievi in situ qualora ci fosse, per esempio, da espropriare appezzamenti di terreno, o, nel caso di progettazione stradale, la presenza di ostacoli da superare. Il modello del terreno digitale può affiancare un'ortofoto, per le stesse mansioni, fornendo l'andamento altimetrico del rilievo. È utile sapere la pendenza generale del terreno per la pianificazione delle opere.

Nel capitolo 6 abbiamo analizzato e compensato il modello figlio dei fotogrammi a presa inclinate. Anche in questo caso le soluzioni ottenute sono molto buone ma che, come vedremo nel capitolo 7, provengono da una distorsione completamente diversa (e maggiore) da quella del modello nadirale. Grazie all'utilizzo di queste immagini è stato possibile ottenere come prodotto il modello tridimensionale del rilievo, sul quale è possibile distinguere abbastanza bene le facciate degli edifici (Cap. 8). Un prodotto di questo tipo può risultare molto utile, come abbiamo visto, in ambito catastale. Infatti dal modello è possibile effettuare dei primi sopralluoghi senza essere presenti in situ. È possibile effettuare delle indagini preliminari da approfondire una volta trovatisi sul posto. Per esempio da un modello di questo tipo possono risaltare eventuali coperture non dichiarate oppure possono essere viste costruzioni abusive, il tutto facendo un semplice "tour digitale".

Se la prima problematica, quella relativa alle incertezze altimetriche, può trovare una soluzione eseguendo dei rilievi dello stesso posto a quote differenti, la seconda problematica incontrata,

quella relativa alla calibrazione, lascia ancora qualche dubbio sulla possibile soluzione. Dal capitolo 7 infatti si evince come, a differenti set up iniziali, corrispondano parametri di calibrazione e soprattutto curve di distorsione completamente diversi. Sicuramente una prova da fare è quella di capire se, effettuando voli a differenti quote, le differenze riscontrate possano essere risolte o per lo meno affievolite. Diversamente sarebbe necessario un certificato di calibrazione che tenga conto di come la camera venga montata. Anche questa sembra essere una soluzione poco plausibile poiché dovrebbero essere previste ed analizzate numerose configurazioni della camera.

Infine, anche se non è stato trattato, abbiamo accennato al fatto che rilievi effettuati con immagini termiche, simile a quello visto nei prodotti finali, possono essere molto utili, per esempio, nella manutenzione di estesi campi fotovoltaici. Infatti, avendo una densità di campionamento di 12.8 cm/pixel, si può identificare rapidamente il malfunzionamento di una cella, facendo risparmiare tempo e personale all'impresa incaricata della manutenzione.

Riferimenti Bibliografici

- Cina, A. - Appunti del corso Geomatica, A.A. 2020/2021;
- Cina, A. (2015). Dal GPS al GNSS, Celid;
- Aicardi, I. Calibrazione delle camere, Lo strumento Metashape. Dispense Corso di Geomatica;
- Chiabrando, F., Lingua, A. M., Maschio, P. F., Teppati L. L. (2017). The influence of flight planning and camera orientation in UAVs Photogrammetry (pp. 164-168). Copernicus Publications;
- Lingua, A. M., Noardo, F., Spanò A. T., Sanna, S., Matrone F. (2017). 3D model generation using oblique images acquired by UAVs (pp. 108-112). International Society for Photogrammetry and Remote Sensing;
- Di Marco, F., (2020) Tesi di Laurea Magistrale – Fotogrammetria diretta da drone per la misura e il monitoraggio delle frane;
- Nuzzo, G., (2020). Tesi di Laurea Magistrale – Geomatica e Cambiamenti Climatici: Osservazione e Monitoraggio di Corpi Glaciali;
- Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri. (2012) Topografia, Modulo T. Zanichelli;
- Agisoft MetaShape, [Online]. Available: https://www.agisoft.com/;
- Strafella, F., Capitolo 6: Analisi delle componenti principali (PCA) (pp 86-91).

Indice delle Figure

Figura 1: Allineamento dei punti 10
Figura 2: Necessità di un secondo fotogramma 11
Figura 3: Problema fotogramma singolo 12
Figura 4: Univocità della posizione di A 12
Figura 5: Ricoprimenti longitudinali e trasversali nel volo Fotogrammetrico 13
Figura 6: Parametri interni della camera 14
Figura 7: Parametri orientamento esterno 15
Figura 8: Orientamento Relativo, intersezione raggi omologhi 16
Figura 9: Distorsione dell'obiettivo 17
Figura 10: Curva di distorsione a barilotto 17
Figura 11: Curva di distorsione a cuscinetto 18
Figura 12: Immagine corretta, distorsione a barilotto, distorsione a cuscinetto 18
Figura 13: Equazione di Collinearità: allineamento punto generico 21
Figura 14: Tecnica delle Stelle Proiettive: Punti di legame 25
Figura 15: Equazioni di Collinearità e Stelle Proiettive 26
Figura 16: Definizione di Zenit e Nadir 30
Figura 17: Disposizione dei fotogrammi nadirali su Livorno Ferraris 30
Figura 18: Disposizione dei fotogrammi a presa inclinata su Livorno Ferraris 31
Figura 19: Schema del velivolo TECNAM P92 JS 31
Figura 20: Phase one iXM-RS150F 32
Figura 21: Specifiche Tecniche Camera 33
Figura 22: Marker 34
Figura 23: Distanza tra satellite e ricevitore 35
Figura 24: Funzionamento Virtual Reference Station 40
Figura 25: Pianificazione punti da rilevare su Google Earth 41
Figura 26: Rilievo del Punto 247 (in figuro ci sono io) 43
Figura 27: Esempio monografia del punto 106 46
Figura 28: Metashape Professional "View Matches" 48
Figura 29: Punti di legame tra due fotogrammi 49
Figura 30: Metashape Professional: "Import Reference" 49
Figura 31: Interfaccia inserimento Marker 50
Figura 32: Trascinamento del Marker sul punto immagine 51

Figura 33: Interfaccia posizionamento Marker 52
Figura 34: Posizionamento Marker su segnaletica orizzontale 53
Figura 35: Difficoltà nel riconoscere spigolo del chiusino 54
Figura 36: Metashape Professional risoluzione sistema di equazioni di collinearità 55
Figura 37: Metashape Professional: Minimi Quadrati 55
Figura 38: Control Points e Check Points 56
Figura 39: Soluzione 0 59
Figura 40: Configurazione 1 60
Figura 41: Configurazione 2 62
Figura 42: Configurazione 3 63
Figura 43: Configurazione 4 65
Figura 44: Configurazione 5 66
Figura 45: Configurazione 6 67
Figura 46: Configurazione 7 68
Figura 47: Andamento degli scarti altimetrici al variare del numero di GCP perimetrali presenti nelle configurazioni che sfruttano il 50% dei marker come Ground Control Point 70
Figura 48: Andamento scarti Altimetrici: Check Points 71
Figura 49: Andamento scarti Planimetrici: Check Points 72
Figura 50: Traiettoria del velivolo tra una strisciata e l'altra 80
Figura 51: Schema strisciate 81
Figura 52: Andamento RT in funzione delle strisciate 84
Figura 53: Strisciate RT = 62% 85
Figura 54: Strisciate RT = 44% 87
Figura 55: Strisciate RT = 35% 89
Figura 56: Vista della strisciate con abbracciamento in sezione trasversale (RT 44%) 93
Figura 57: Configurazione del nuovo Rilievo 94
Figura 58: Intersezione di nuovi raggi omologhi 95
Figura 59: Andamento della variazione degli scarti altimetrici sui Check Points 95
Figura 60: Andamento della variazione degli scarti planimetrici 96
Figura 61: Superficie coperta dalle Immagini inclinate rispetto alle Immagini Nadirali (la linea rossa corrisponde al perimetro della nuvola di punti ottenuta a partire dalle immagini a presa inclinata 97
Figura 62: Irregolarità della distribuzione dei fotogrammi 98

Figura 63: Corretta visualizzazione Marker 124 100
Figura 64: Visuale occultata Marker 124 100
Figura 65: Interfaccia Calibrazione della camera: inserimento parametri 101
Figura 66: Andamento distorsione radiale del Modello Nadirale a 8 parametri 109
Figura 67: Andamento distorsione radiale immagini Inclinate 110
Figura 68: Andamento distorsione radiale immagini Nadirali ed Inclinate 111
Figura 69: Nuvola sparsa modello Nadirali più Inclinate 112
Figura 70: Andamento distorsione radiale immagini Nadirali & Inclinate 114
Figura 71: Confronto andamenti distorsione 114
Figura 72: Matrice di Correlazione dei parametri della camera nella Configurazione 0 del modello nadirale 116
Figura 73: Andamento Distorsione Nadirale 11 e 8 Parametri 120
Figura 74: Andamento Distorsione Nadirale 11 e 8 Parametri estensione diagonale 120
Figura 75: Andamento Distorsione Inclinate 11 e 8 Parametri 122
Figura 76: Andamento Distorsione del modello misto a 8 e 11 Parametri 123
Figura 77: Ortofoto Livorno Ferraris 126
Figura 78: Ingrandimento ortofoto 127
Figura 79: Modello digitale del Terreno DEM 128
Figura 80: Zoom del DEM su Chiesa di San Lorenzo 128
Figura 81: Modello 3D visuale 1 129
Figura 82: Modello 3D visuale 2 130
Figura 83: Immagini Termiche 131

Indice delle Tabelle

Tabella 1: Computo tra equazioni ed incognite per risolvere un blocco composto da 3 fotogrammi....27
Tabella 2: Marker Caricati all'interno del Software....44
Tabella 3: Configurazioni dei marker utilizzati come GCP....58
Tabella 4: Scarti Configurazione 0....59
Tabella 5: Scarti configurazione 1....61
Tabella 6: Scarti Configurazione 2....62
Tabella 7: Scarti Configurazione 3....64
Tabella 8: Scarti Configurazione 4....64
Tabella 9: Scarti Configurazione 5....66
Tabella 10: Scarti Configurazione 6....67
Tabella 11: Scarti Configurazione 7....68
Tabella 12: Riepilogo Scarti su Check Points....69
Tabella 13: Valori statistici quote Marker....71
Tabella 14: Media e scarti quadratici medi sulle varianze delle coordinate stimate dei centri di presa della configurazione 0, immagini Nadirali....74
Tabella 15: Calcolo Altezza di Volo relativa al terreno....74
Tabella 16: Valori per il calcolo del ricoprimento longitudinale....75
Tabella 17: Coordinata Strisciata Longitudinale e distanze tra fotogrammi....76
Tabella 18: B fotogrammi pari e dispari....78
Tabella 19: RL fotogrammi pari e dispari....78
Tabella 20: Dimensioni foto trasversale....79
Tabella 21: Schema strisciate RT....80
Tabella 22: Risultati Strisciata 1-2....82
Tabella 23: Valori medi Strisciata 1-2....82
Tabella 24: Valori medi delle strisciate 1-2 2-3 3-4 4-5....82
Tabella 25: Valori Medi strisciate 1-3 2-4 3-5....83
Tabella 26: Valori Medi strisciate 1-4 2-5....83
Tabella 27: Valori Medi strisciate 1-5....84
Tabella 28: Check Points RT = 62%....86
Tabella 29: Confronto scarti altimetrici tra RT 62% e RT 82%....86
Tabella 30: Check Points RT = 44%....87

Tabella 31: Confronto scarti altimetrici tra RT 44% e RT 82% 88
Tabella 32: Check Points RT = 25% 89
Tabella 33: Confronto scarti con diversi RT 90
Tabella 34: Δ configurazione 2 91
Tabella 35: Valori scarti immagini inclinate 99
Tabella 36: Parametri Camera modello Nadirale a 8 parametri configurazioni 0, 1, 2, 3. 108
Tabella 37: Parametri Camera modello Nadirale a 8 parametri configurazioni 4, 5, 6, 7. 108
Tabella 38: Parametri calibrazione modello inclinate 110
Tabella 39: Scarti su Control Points modello Nadirali & Inclinate 113
Tabella 40: Scarti su Check Points modello Nadirali & Inclinate 113
Tabella 41: Parametri calibrazione Nadirali & Inclinate 113
Tabella 42: Control Points delle configurazioni del modello nadirale con parametri del modello misto 115
Tabella 43: Check Points delle configurazioni del modello nadirale con i parametri del modello misto 115
Tabella 44: Componenti Principali dei parametri di Calibrazione 117
Tabella 45: Parametri di calibrazione configurazione 0 del modello nadirale 118
Tabella 46: Confronto Check Points Nadirali (11 e 8 Parametri) 119
Tabella 47: Parametri di calibrazione per la configurazione 0 del modello Inclinate 121
Tabella 48: Confronto tra scarti Control Points Inclinate 8 e 11 Parametri 121
Tabella 49: Confronto tra scarti Check Points Inclinate 8 e 11 Parametri 121
Tabella 50: Parametri di calibrazione della configurazione 0 del modello misto 122
Tabella 51: Confronto scarti sui Control Points del Modello Nadirali & Inclinate 8 e 11 Parametri 123
Tabella 52: Confronto scarti sui Check Points del modello Nadirali & Inclinate 8 e 11 Parametri 123
Tabella 53: Confronto tra Check Points delle configurazioni Nadirali utilizzando i parametri del modello misto a 8 e a 11 parametri 124

ALLEGATO A: Monografie punti di appoggio

POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Monografie punti di appoggio

Località: Livorno Ferraris		**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 101	**Foto particolare:** 
Descrizione: Tombino (spigolo Nord – Est)		
Ubicazione: Percorrendo via Vaccolo in direzione Livorno Ferraris, girando in via degli Ulivi, il tombino adiacente il civico 7		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 428279.316	**H ellissoidica:** 229.015	
Nord: 5014240.127	**h ellissoidica(corretta):** 183.017	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	

Inquadramento generale:



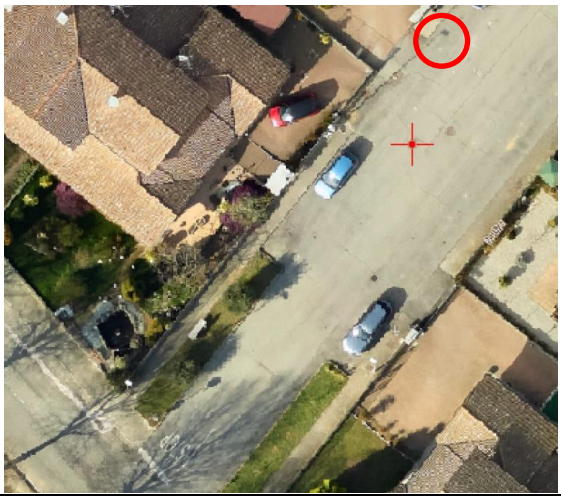


Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**

Data: 11/06/2021
fotografici

Nome:	**Numero:** 102

Descrizione:
Tombino

Ubicazione:
a centro strada su via degli Ulivi, adiacente il civico 29

Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 428379.321	**H ellissoidica:** 228.832
Nord: 5014360.258	**h ellissoidica(corretta):** 182.838

Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 105
Descrizione: Angolo Sud-Est CADITOIA	
Ubicazione: su Piazza Possis	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427558.079	**H ellissoidica:** 234.312
Nord: 5014723.185	**h ellissoidica(corretta):** 188.193
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



Foto generale:

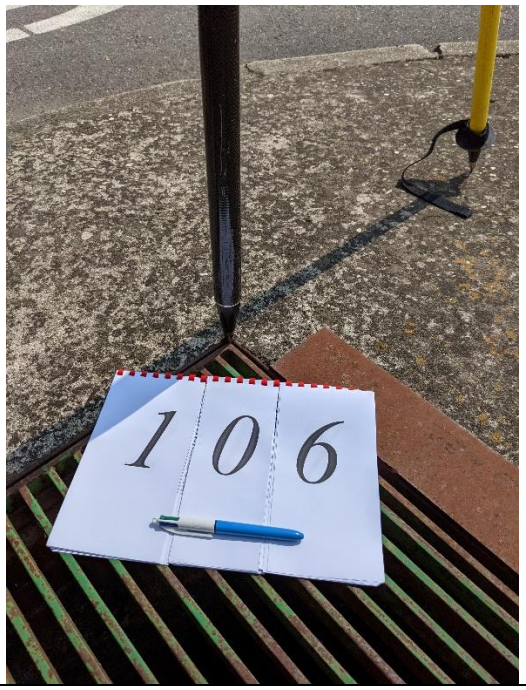




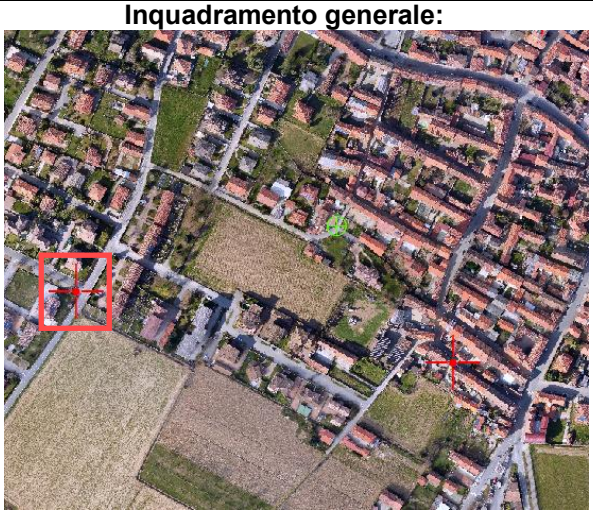
POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 106
Descrizione: Griglia	
Ubicazione: Spigolo Nord-Est della griglia ubicata tra Via Saragat e via del Molino	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427400.732	**H ellissoidica:** 235.039
Nord: 5014383.659	**h ellissoidica(corretta):** 188.925
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



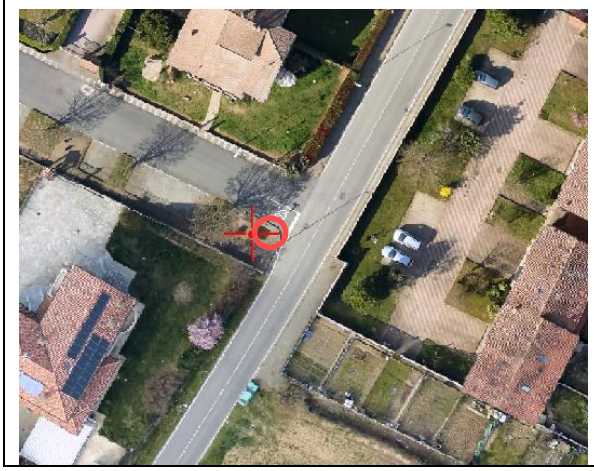


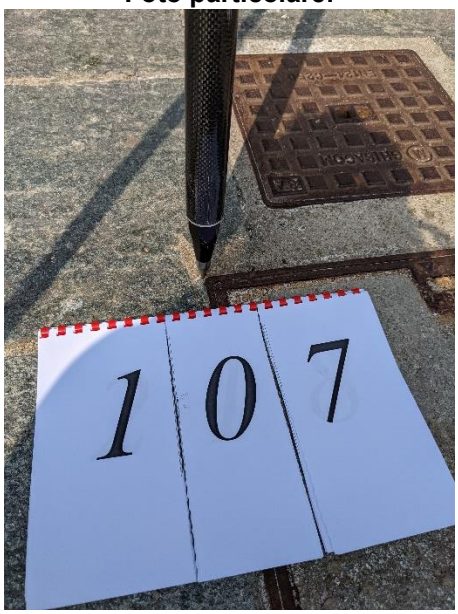
Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 Fotografici
Nome:	**Numero:** 107
Descrizione: Tombino	
Ubicazione: ~~Inizio area pedonale / ciclabile Piazza Galileo Ferraris~~ Sostituito con TOMBINO al centro della piazza, fronte palazzo Galfer, su angolo tombino con rivestimento in pietra	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427854.429	**H ellissoidica:** 233.154
Nord: 5014694.564	**h ellissoidica(corretta):** 187.073
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 108
Descrizione: Spigolo aiuola	
Ubicazione: Piazzetta antistante Comune di LF, aiuola a Sud Est, spigolo interno a Nord	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 428013.726	**H ellissoidica:** 232.177
Nord: 5014636.873	**h ellissoidica(corretta):** 186.119
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



Foto generale:





POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 112
Descrizione: Tombino	
Ubicazione: In via Francesco Miglietta tra i civici 14 e 16	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427774.645	**H ellissoidica:** 231.681
Nord: 5014317.383	**h ellissoidica(corretta):** 185.617
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 113
Descrizione: Caditoia Spigolo Nord Est	
Ubicazione: In prossimità dello stop di via Don Francesco Vaccarino su via Pisalesco	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 428395.068	**H ellissoidica:** 229.814
Nord: 5014482.591	**h ellissoidica(corretta):** 183.813
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



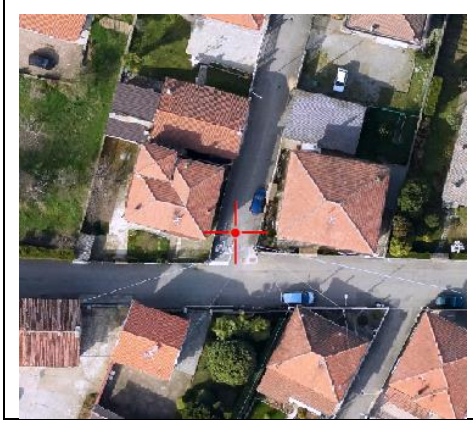


Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 123
Descrizione: Tombino (spigolo Nord – Est)	
Ubicazione: Via Francesco Nicolina in prossimità del civico 6	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427651.359	**H ellissoidica:** 232.055
Nord: 5014027.317	**h ellissoidica(corretta):** 185.997
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 124
Descrizione: Spigolo gradino	
Ubicazione: Ingresso cimitero, monumento commemorativo caduti di guerra	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427949.082	**H ellissoidica:** 230.880
Nord: 5014083.349	**h ellissoidica(corretta):** 184.854
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 131
Descrizione: Tombino su incrocio	
Ubicazione: Incrocio tra via Angelo Lavarino e via Arturo Guglielmi	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427256.811	**H ellissoidica:** 235.933
Nord: 5014456.953	**h ellissoidica(corretta):** 189.797
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



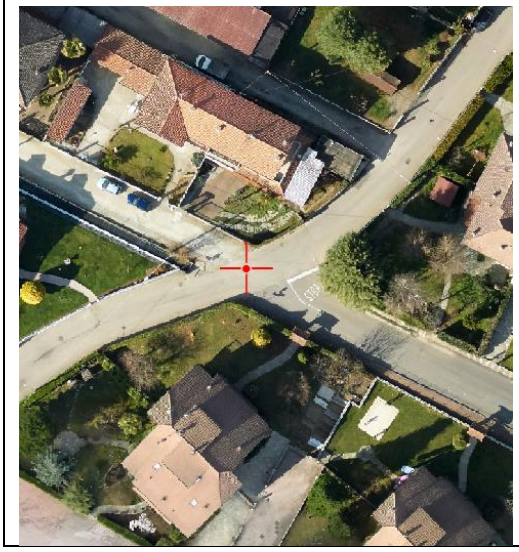


Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 132
Descrizione: Caditoia	
Ubicazione: Su via San Vito in prossimità dello stop con via Vasco Vittone	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 426958.423	**H ellissoidica:** 238.483
Nord: 5014878.092	**h ellissoidica(corretta):** 192.280
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



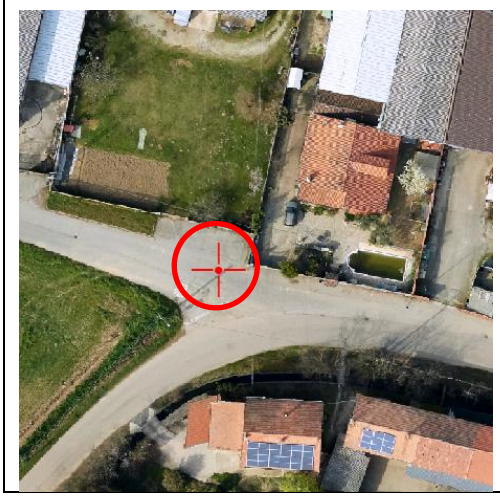


Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 133
Descrizione: Tombino (servizi)	
Ubicazione: Spigolo NORD-EST su viale IV Novembre in prossimità di corso Leone Giordano	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427341.669	**H ellissoidica:** 236.439
Nord: 5014764.546	**h ellissoidica(corretta):** 190.291
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:

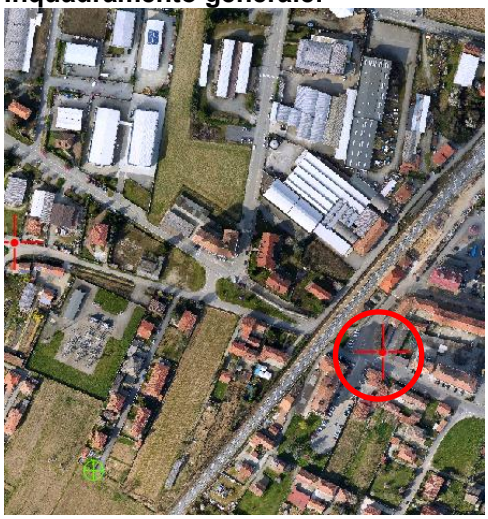




Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 141
Descrizione: Caditoia/Tombino	
Ubicazione: Traversa via Aldo Gaspardino, al termine della traversa, all'inizio del parcheggio, la caditoia sulla sinistra (guardando a Sud) – Spigolo Sud-Ovest	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 428028.502	**H ellissoidica:** 234.033
Nord: 5015205.904	**h ellissoidica(corretta):** 187.936
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



Foto generale:





POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 13/05/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 148
Descrizione: Tombino spigolo NW	
Ubicazione: In via San Bernardo tra i civici 86 e 88	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 428566.629	**H ellissoidica:** 229.906
Nord: 5015026.997	**h ellissoidica(corretta):** 183.887
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:





POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

1**Località:** **Livorno Ferraris**		**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 161	**Foto particolare:** 
Descrizione: Caditoia su incrocio		
Ubicazione: in prossimità dello STOP tra via G.Cortellia e via G.B.Vercelli – Spigolo Nord-Est		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 427784.722	**H ellissoidica:** 234.545	
Nord: 5015051.980	**h ellissoidica(corretta):** 188.430	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	

Inquadramento generale:



Foto generale:





POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 162
Descrizione: Caditoia/Tombino	
Ubicazione: Traversa via Aldo Gaspardino, la caditoia centrale al termine della traversa, all'inizio del parcheggio – Spigolo Sud-Est	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 428011.471	**H ellissoidica:** 233.933
Nord: 5015207.553	**h ellissoidica(corretta):** 187.834
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



Foto generale:





POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**		**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 163	**Foto particolare:** 
Descrizione: Tombino su marciapiede spigolo NE		
Ubicazione: Fianco Est della chiesa di San Sebastiano su via Martiri della Libertà, in prossimità della diramazione con le vie Alice, Bianzè e S. Bernardo		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 428239.369	**H ellissoidica:** 230.564	
Nord: 5014904.524	**h ellissoidica(corretta):** 184.514	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	
Inquadramento generale:  		**Foto generale:** 

POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

173**Località:** **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 173
Descrizione: Caditoia	
Ubicazione: A incrocio su via Vaccolo, lato opposto birrificio	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 428120.373	**H ellissoidica:** 229.188
Nord: 5014351.515	**h ellissoidica(corretta):** 183.163
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:

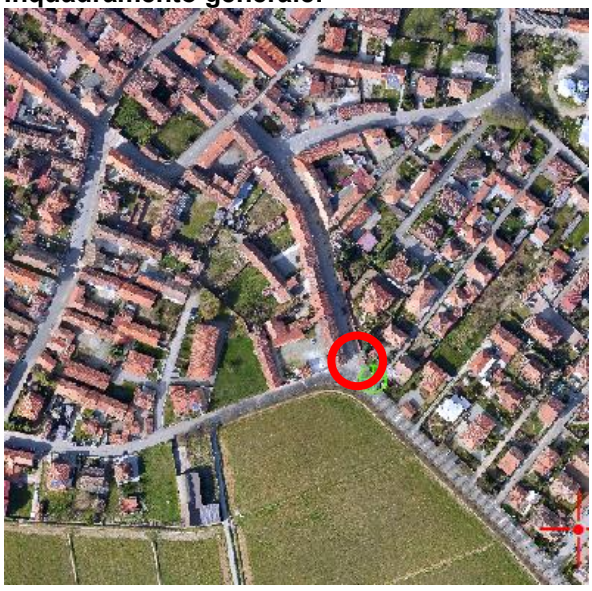




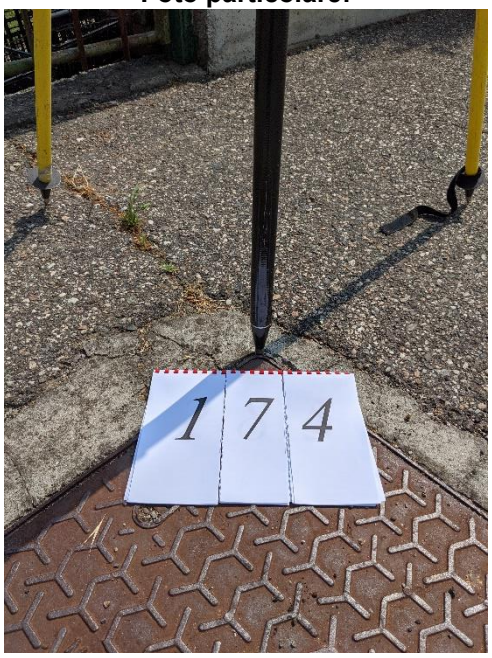
Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 174
Descrizione: Tombino	
Ubicazione: In via Antonio Gramsci tra i civici 15 e 23	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427662.470	**H ellissoidica:** 233.295
Nord: 5014447.982	**h ellissoidica(corretta):** 187.208
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:

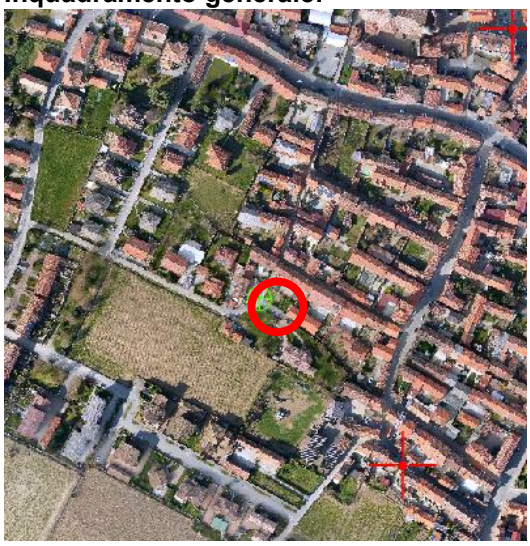




Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 29/04/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 210
Descrizione: Angolo muro	
Ubicazione: Frazione Garavoglie, in via Sant'Emiliano 9	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 426292.286	**H ellissoidica:** 239.348
Nord: 5014117.416	**h ellissoidica(corretta):** 193.119
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 29/04/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 211
Descrizione: Segnaletica verticale	
Ubicazione: Pressi rotatoria su via Garibaldi/SP2/SP3	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427960.645	**H ellissoidica:** 229.799
Nord: 5013617.545	**h ellissoidica(corretta):** 183.807
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



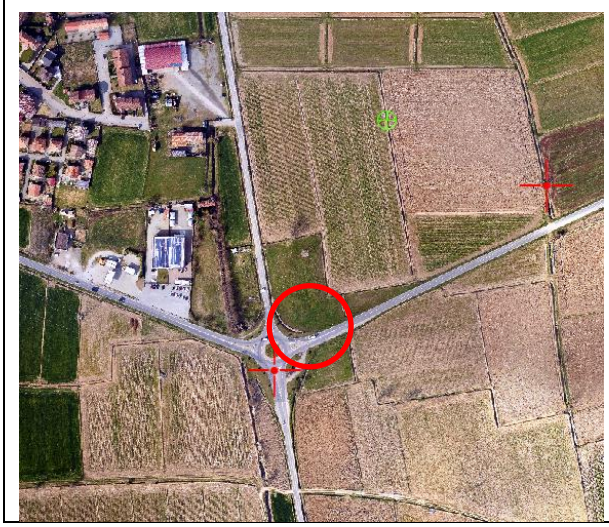


Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

215**Località:** **Livorno Ferraris**		**Data:** 29/04/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 215	**Foto particolare:** 
Descrizione: Cordolo ponte		
Ubicazione: Su via Vasco Vittone in direzione ovest da LF, in prossimità del Canale Depretis		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 425978.715	**H ellissoidica:** 247.505	
Nord: 5014773.144	**h ellissoidica(corretta):** 201.188	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	

Inquadramento generale:

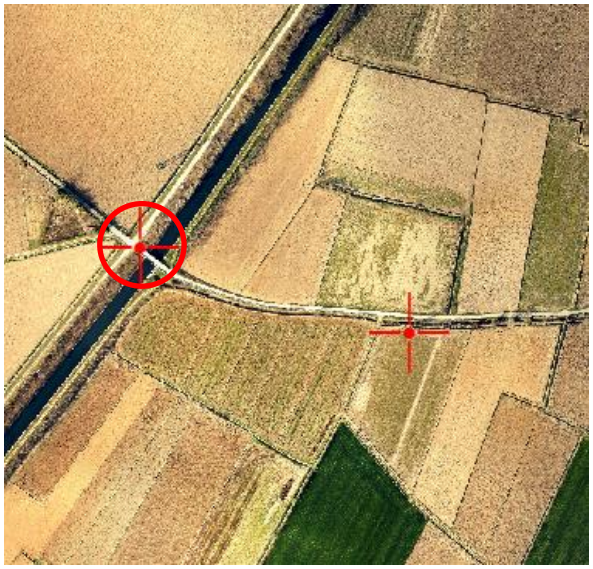




Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**		**Data:** 29/04/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 216	**Foto particolare:**
Descrizione: Chiusa canaletto irrigazione		
Ubicazione: Frazione Garavoglie, via Sant'Emiliano direzione sud / sud-ovest		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 426127.063	**H ellissoidica:** 239.665	
Nord: 5013896.737	**h ellissoidica(corretta):** 193.431	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	



Inquadramento generale:



Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**		**Data:** 29/04/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 220	**Foto particolare:**
Descrizione: Spigolo segnaletica orizzontale		
Ubicazione: Su strada provinciale SP3 direzione sud / sud-ovest in prossimità della rotonda con via Saluggia e la SP2		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 427542.193	**H ellissoidica:** 231.992	
Nord: 5013763.684	**h ellissoidica(corretta):** 185.940	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**

Data: 29/04/2021
fotografici

Nome:	**Numero:** 221

Descrizione:
Segnaletica orizzontale

Ubicazione:
Inizio della linea continua sulla SP2 (via Piemonte) in direzione ovest dallo stop su via del Molino

Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427215.148	**H ellissoidica:** 235.205
Nord: 5014106.754	**h ellissoidica(corretta):** 189.089

Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:

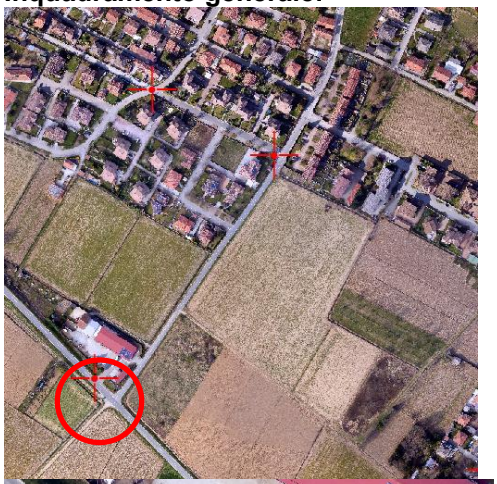




Foto generale:

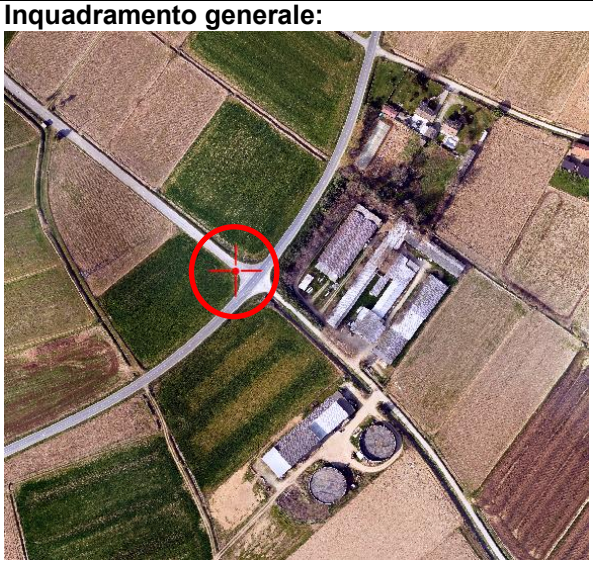


POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**		**Data:** 29/04/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 226	**Foto particolare:**
Descrizione: Tombino		
Ubicazione: In prossimità dello stop di via Vaccolo su via Piemonte		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 428527.930	**H ellissoidica:** 228.267	
Nord: 5013967.362	**h ellissoidica(corretta):** 182.318	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	



Inquadramento generale:



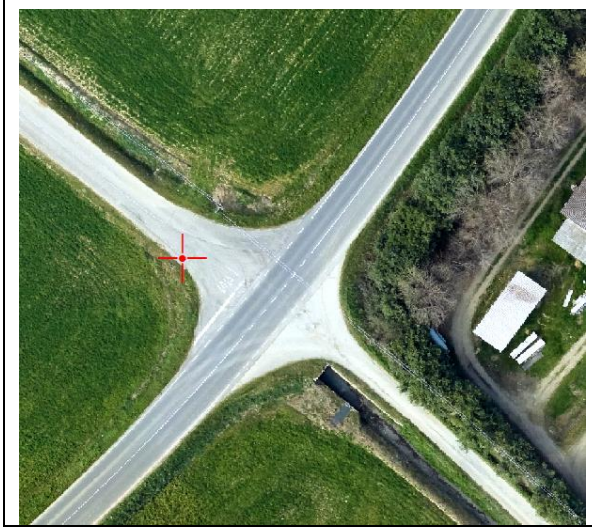


Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**		**Data:** 29/04/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 227	**Foto particolare:**
Descrizione: Angolo parapetto		
Ubicazione: In prossimità dell'impianto di depurazione di via Vaccolo		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 428874.786	**H ellissoidica:** 225.748	
Nord: 5013589.341	**h ellissoidica(corretta):** 179.867	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	



Inquadramento generale:



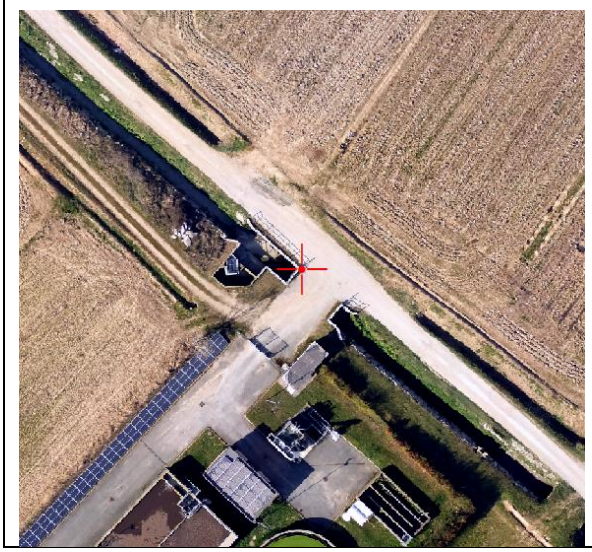


Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**		**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 235	**Foto particolare:**
Descrizione: Fine striscia continua		
Ubicazione: Fine tratto continuo su via Piemonte / deviazione per via Sant'Emiliano		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 426710.751	**H ellissoidica:** 240.551	
Nord: 5014601.595	**h ellissoidica(corretta):** 194.338	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	



Inquadramento generale:



Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 238
Descrizione: Segnaletica orizzontale	
Ubicazione: Inizio tratto continuo in prossimità dell'uscita della ditta Radex su via Piemonte	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 426462.658	**H ellissoidica:** 244.175
Nord: 5015139.875	**h ellissoidica(corretta):** 197.891
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 13/05/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 242
Descrizione: Spigolo aiuola	
Ubicazione: DisCar LF, ingresso rifornimento carburante	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 425955.103	**H ellissoidica:** 249.179
Nord: 5015655.603	**h ellissoidica(corretta):** 202.793
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:

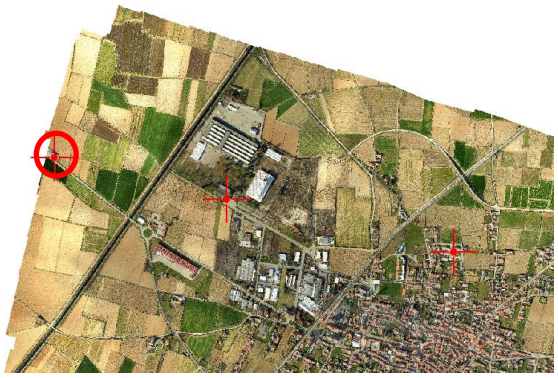




Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 13/05/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 243
Descrizione: Spigolo canale irriguo	
Ubicazione: Spigolo a Sud-Est canale irriguo fiancheggiante strada sterrata che mette in comunicazione la Strada Provinciale 2 e l'azienda "Rondoletto Francesco e C"	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 426877.840	**H ellissoidica:** 245.020
Nord: 5016173.052	**h ellissoidica(corretta):** 198.713
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 13/05/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 245
Descrizione: Pozzo affiorante	
Ubicazione: Su terreno agricolo adiacente via Arelio	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427679.638	**H ellissoidica:** 238.256
Nord: 5015836.073	**h ellissoidica(corretta):** 192.072
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:





POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

246**Località:** **Livorno Ferraris**	**Data:** 13/05/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 246
Descrizione: Cordolo ponticello	
Ubicazione: Attraversamento da via Chivoli su terreno agricolo	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427385.891	**H ellissoidica:** 240.000
Nord: 5015817.510	**h ellissoidica(corretta):** 193.781
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

247**Località:** **Livorno Ferraris**		**Data:** 13/05/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 247	**Foto particolare:**
Descrizione: Spigolo Stop segnaletica orizzontale		
Ubicazione: Incrocio presso via Alice 41		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 428243.069	**H ellissoidica:** 232.641	
Nord: 5015442.158	**h ellissoidica(corretta):** 186.553	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 13/05/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 249
Descrizione: Tombino	
Ubicazione: In via Chivoli in prossimità del civico 14	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427599.922	**H ellissoidica:** 236.069
Nord: 5015308.494	**h ellissoidica(corretta):** 189.913
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

250**Località:** **Livorno Ferraris**	**Data:** 13/05/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 250
Descrizione: Angolo canale irriguo	
Ubicazione: Strada sterrata adiacente via dei Coppi in prossimità della cascina.	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 429220.431	**H ellissoidica:** 228.890
Nord: 5015539.650	**h ellissoidica(corretta):** 182.914
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:

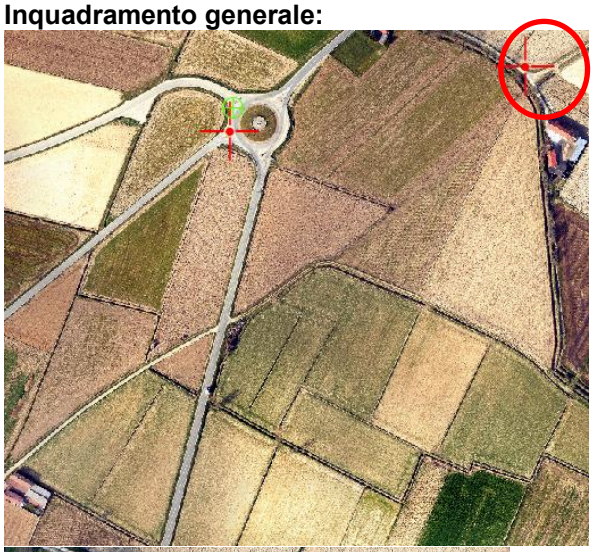




Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 252
Descrizione: Spigolo segnaletica orizzontale	
Ubicazione: Ad est di LF, presso incrocio tra SP7 e Via Piemonte (SP3)	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 428762.467	**H ellissoidica:** 228.973
Nord: 5014663.621	**h ellissoidica(corretta):** 183.003
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



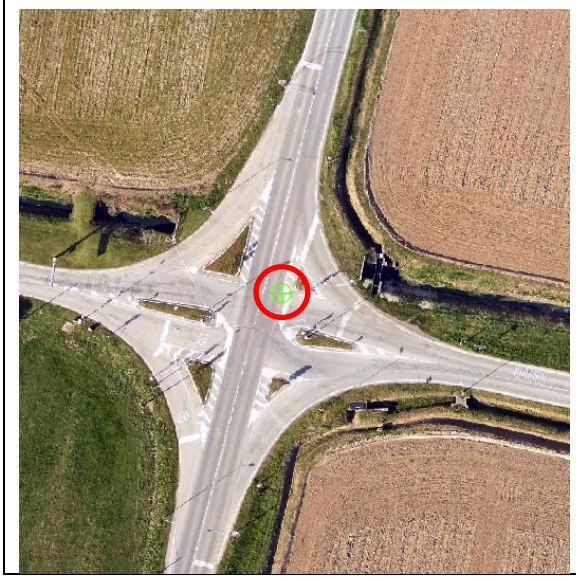


Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 253
Descrizione: Spigolo isola di traffico a raso (strisce intorno)	
Ubicazione: A nord est di LF, presso rotatoria incrocio via Bianzè - SP3, percorrendo via Bianzè, tenendo sul lato destro la terza uscita della rotatoria, il secondo spigolo dell'isola di traffico a raso (strisce intorno) considerando il verso di percorrenza della rotatoria	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 428919.115	**H ellissoidica:** 230.575
Nord: 5015500.949	**h ellissoidica(corretta):** 184.566
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



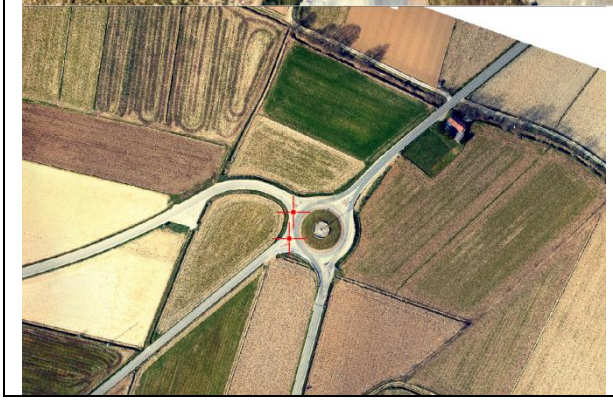


Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: Livorno Ferraris		**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 255	**Foto particolare:**
Descrizione: Spigolo segnaletica orizzontale		
Ubicazione: A ovest da LF, in prossimità della rotonda su SP2 / Corso Aosta nei pressi dell'Associazione Sportiva "Il Quadrifoglio"		
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est: 426423.585	**H ellissoidica:** 246.264	
Nord: 5015305.458	**h ellissoidica(corretta):** 199.963	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]		
Est:	**H ellissoidica:**	
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**	



Inquadramento generale:

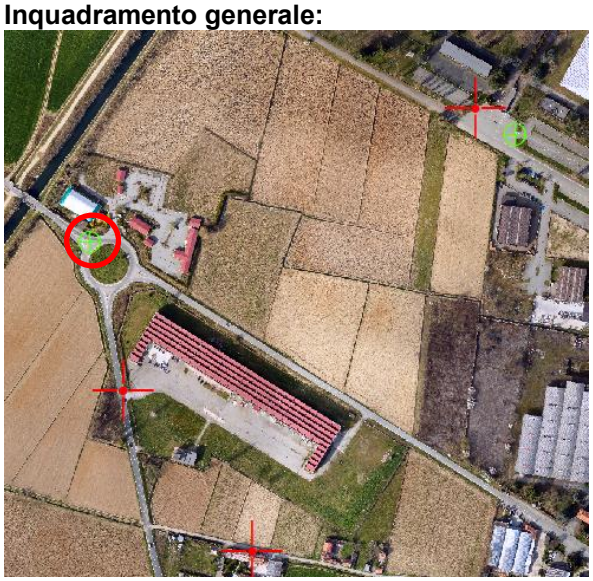




Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 258
Descrizione: Angolo interno striscia segnaletica orizzontale	
Ubicazione: In prossimità della rotonda di via Sergio Goretta	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427261.251	**H ellissoidica:** 238.408
Nord: 5015212.667	**h ellissoidica(corretta):** 192.218
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 259
Descrizione: Angolo striscia segnaletica orizzontale STOP	
Ubicazione: Al fondo di via Goretta percorrendola venendo da LF, nei pressi di "Prysmian cavi e sistemi". Tenendo le spalle a "Prysmian..", l'uscita dal parcheggio sulla sinistra.	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 426898.221	**H ellissoidica:** 241.064
Nord: 5015432.255	**h ellissoidica(corretta):** 194.814
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:





Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 260
Descrizione: Spigolo STOP (sulla P)	
Ubicazione: A nord ovest di LF, su via Chivoli	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 427482.964	**H ellissoidica:** 238.109
Nord: 5015716.494	**h ellissoidica(corretta):** 191.909
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



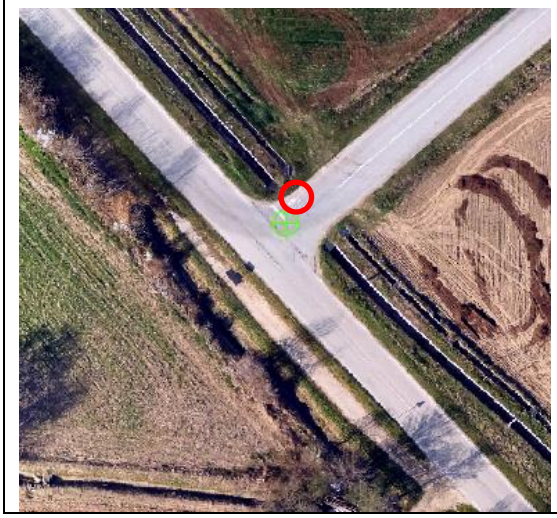


Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 265
Descrizione: Bordo canale irriguo	
Ubicazione: Lato Ovest di via Alice, in prossimità della ferrovia	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 428215.934	**H ellissoidica:** 233.983
Nord: 5015605.051	**h ellissoidica(corretta):** 187.881
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



Foto generale:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Località: **Livorno Ferraris**	**Data:** 11/06/2021 fotografici
Nome:	**Numero:** 267
Descrizione: Spigolo segnale orizzontale (punta triangolo di rallentamento)	
Ubicazione: Frazione Graravoglie, incrocio tra via Vasco Vittone e la SP2 via Piemonte	
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est: 426581.237	**H ellissoidica:** 241.123
Nord: 5014766.396	**h ellissoidica(corretta):** 194.882
Coordinate WGS 84/UTM 32N [m]	
Est:	**H ellissoidica:**
Nord:	**h ellissoidica(corretta):**

Foto particolare:



Inquadramento generale:



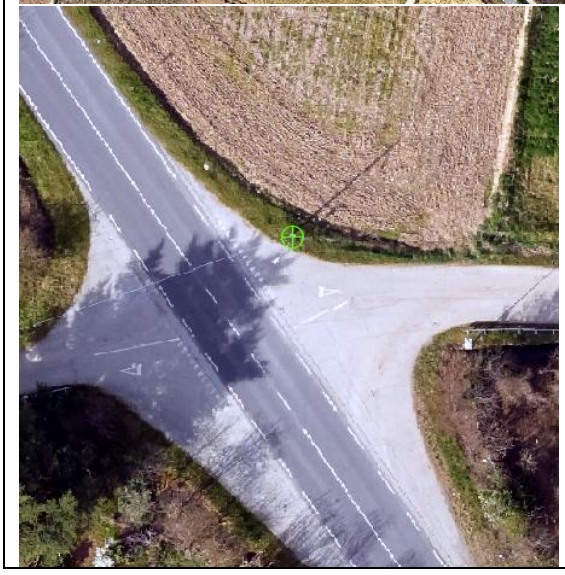


Foto generale:



