

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Acquisizione multi-sensore del Chiostro di San Nicola a Tolentino per il modello parametrico



Relatore:

prof. Andrea Maria Lingua

Co-relatore:

prof.ssa Antonia Teresa Spanò

Candidata:

Raffaella Stano

Ottobre 2017

Indice

1	Introduzione	5
2	Tecniche per il rilievo tridimensionale	9
2.1	<i>La tecnica Laser scanner terrestre</i>	12
2.1.1	Acquisizione delle scansioni laser.....	15
2.1.2	Tecnica di allineamento.....	15
2.2	La tecnica fotogrammetrica	18
2.2.1	Fasi del rilievo fotogrammetrico	20
2.2.2	I fondamenti analitici: le equazioni di collinearità	21
2.2.3	Calibrazione delle camere digitali	22
2.2.4	Classificazione fotogrammetria	24
2.2.5	Relazione tra scala dei fotogrammi, distanza dall'oggetto rilevato e scala del disegno	29
2.2.6	Il GSD-Ground Sample Distance	31
2.2.7	La precisione della fotogrammetria	32
3	<i>Structure from Motion</i>	35
3.1	Modello della camera	36
3.1.1	Geometria della formazione dell'immagine.....	37
3.1.2	Modello stenopeico della fotocamera	38
3.2	Calibrazione della fotocamera	43
3.3	Stereopsi: Triangolazione	45
3.4	Posa della fotocamera	48
3.4.1	Posa relativa	48
3.4.2	Posa esterna	49
3.5	Dense Image Matching	50

3.6	<i>Sistemi di Structure from Motion workflow</i>	52
3.6.1	Individuazione dei <i>keypoint</i>	53
3.6.2	<i>Validazione delle corrispondenze</i>	56
3.6.3	<i>Stima dei parametri della camera</i>	57
3.7	Risultati finali: DEM, Raddrizzamento e Ortofoto	58
3.8	<i>Software</i> utilizzati	63
4	Chiostro di San Nicola da Tolentino	65
4.1	Stile architettonico del chiostro di San Nicola	66
4.2	Evento sismico del 2016	68
5	Acquisizione dati	71
5.1	Rilievo topografico	71
5.1.1	Rete d'inquadramento	72
5.1.2	Rete di raffittimento	74
5.1.3	Rete di dettaglio	75
5.1.4	Monografia dei vertici e eidotipi dei punti di dettaglio	76
5.2	Acquisizione dati a scala territoriale	77
5.2.1	Piano di volo UAV	78
5.2.2	UAV utilizzato	80
5.3	Acquisizione dati a scala architettonica.....	83
5.3.1	Acquisizione Lidar terrestre.....	84
5.3.2	Acquisizione Fotogrammetria terrestre	87
5.3.3	Acquisizione Fotogrammetria aerea da UAV	90
6	Elaborazione dati.....	93
6.1	Elaborazione dati a scala territoriale	93
6.1.1	Il <i>software</i> Pix4D mapper	94

6.1.2	Il <i>software</i> Agisoft PhotoScan.....	106
6.1.3	Il <i>software</i> Visual SFM	118
6.2	Elaborazione dati a scala architettonica	123
6.2.1	Dati rilevati con <i>laser scanner</i> terrestre	123
6.2.2	Dati rilevati con <i>fotogrammetria terrestre</i>	132
6.2.3	Dati rilevati con <i>fotogrammetria aerea da UAV</i>	141
7	Elaborazione delle nuvole di punti.....	155
7.1	Comparazione nuvole a scala territoriale	155
7.2	Comparazione nuvole a scala architettonica.....	160
7.3	Preparazione nuvole di punti per Revit	167
7.3.1	Pulizia e taglio.....	167
7.3.2	Suddivisione della nuvola di punti per componenti architettoniche.....	169
8	Schedatura della conoscenza di base dei beni architettonici	171
9	<i>Historical Building Information Modelling</i>	177
9.1	La metodologia BIM.....	177
9.2	La metodologia BIM applicata al patrimonio edilizio esistente	178
9.3	I Level of Development (LOD)	179
9.4	L'elaborazione del modello.....	182
9.4.1	Modellazione del terreno tramite il <i>software</i> ENVI LIDAR.....	183
9.4.2	Importazione della nuvola di punti	185
9.4.3	Plug-in PointSense	186
9.4.4	Modello generico metrico	189
9.4.5	Modello generico metrico adattativo	190
9.5	Comparazione tra modello e la nuvola di punti	193
9.5.1	Le volte	193

9.5.2	L'involucro esterno	194
9.6	I LOD al Chiostro di San Nicola a Tolentino	197
	Conclusioni	201
	Bibliografia.....	204
	Sitografia.....	206
	ALLEGATO	208
	A1-Pianificazione del GSD del rilievo realizzato con drone Phantom Dji 4	208
	A2- Coordinate punti d'appoggio	212
	A3- Errore Faro Scene	214
	A.4- Analisi di number of neighbors e Cloud to Cloud.....	220
	A5- Documentazione fotografica	230
	A6- Altra documentazione	234
	Indice delle Figure	238
	Indice delle tabelle	247
	Ringraziamenti.....	250

1 Introduzione

“L’Italia è un immenso museo a cielo aperto” (Ministero dei beni culturali e delle attività culturali e del turismo) in cui ogni paese, città e capoluogo è caratterizzato da resti e testimonianze concrete della storia dei secoli scorsi. Fin dall’impero romano, il nostro paese ha vissuto una storia intellettuale, ma soprattutto artistica fiorente, favorendo così lo sviluppo di un tesoro di valore incalcolabile, a partire da monumenti fino a singoli elementi quali affreschi, statue ecc., non sempre valorizzate, monitorate e conservate in maniera adeguata. Negli ultimi anni, grazie al progresso tecnologico, si sono sviluppate tecniche di restauro sempre più avanzate, le quali si fondano su un rilievo tridimensionale del monumento o del singolo elemento artistico. La Geomatica, quindi, ricopre un ruolo fondamentale per il rilevamento e la valorizzazione dei beni culturali. Ad oggi, infatti, le nuove tecnologie della geomatica consentono di acquisire dati terrestri e aerei compatibili fra loro permettendone una facile integrazione.

Il termine Geomatica fu coniato negli anni '80 e individua la strumentazione e la metodologia per l’acquisizione e archiviazione dei dati spazialmente georeferenziati. Essa comprende più discipline come a esempio la topografia, la fotogrammetria, il laser scanner e la cartografia.

Negli ultimi anni la Geomatica, applicata al rilevamento di beni immobili e/o di intere aree territoriali, ha assunto un ruolo fondamentale negli eventi catastrofici di carattere sismico e idrogeologico. Ad esempio, si sono utilizzate tali tecniche per monitorare le strutture colpite dal sisma del centro Italia. Si è potuto constatare come queste risultino particolarmente efficienti in queste situazioni, infatti con lo sviluppo delle procedure di acquisizione avanzate quali fotogrammetria con UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) è possibile effettuare un rilievo con tempi di esecuzione rapidi e senza contatto diretto con l’oggetto. Uno dei principali vantaggi è relativo alle informazioni oggettive acquisite che comprendono caratteristiche metriche e costruttive, la geometria, la forma con lo scopo finale di ricreare l’oggetto reale per effettuare successivi studi sullo stato di conservazione o per eventuali interventi di recupero.

Il presente lavoro si pone come obiettivo la restituzione di un edificio esistente in scala architettonica 1:100 a partire dall'integrazione dei dati acquisiti con tecniche multisensore, quali fotogrammetria aerea con UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), fotogrammetria terrestre e LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) al fine di ottenere modelli tridimensionali che rappresentano al meglio l'intero oggetto esaminato.

Inoltre, con il seguente elaborato si è sperimentato l'utilizzo della metodologia BIM (*Building Information Modelling*) ai beni architettonici esistenti, non solo al progetto di edifici di nuova costruzione e come il rilievo integrato e la modellazione HBIM (*Historical Building Information Modelling*) possono essere utilizzati per la conoscenza, la conservazione e la manutenzione del patrimonio artistico.

La seguente tesi è articolata in otto capitoli. Nel primo capitolo vengono trattate in modo teorico le principali tecniche di rilevamento adottate soprattutto in campo architettonico, concentrando l'attenzione sui due metodi adoperati nella campagna di rilievo, quali *laser scanner* e fotogrammetria aerea mediante UAV.

Nel secondo capitolo si approfondiscono le tecniche di *Structure from Motion*, ovvero il processo per l'individuazione della superficie tridimensionale di un oggetto, che vengono combinate con gli algoritmi di *dense matching* nei *software* commerciali e *open source*.

Nel terzo capitolo viene presentato il Chiostro di San Nicola da Tolentino, elemento oggetto di studio, soffermandosi principalmente sullo stile architettonico e sulle caratteristiche sismiche della località in cui esso è collocato.

Nel quarto capitolo vengono trattati i metodi di acquisizione adoperati durante la campagna di misura sia a livello urbano sia a livello architettonico. La fase di conoscenza è caratterizzata da due momenti principali: il primo è la realizzazione di eidotipi della fisicità dell'elemento utilizzati come documentazione, mentre il secondo è relativo al rilevamento vero e proprio, che richiede una rete topografica e la determinazione dei punti d'appoggio, utilizzati per geo-referenziare e scalare correttamente il modello tridimensionale ottenuto.

Nel quinto capitolo viene presentata l'elaborazione dei dati realizzata mediante i *software* Pix4D Mapper, VisualSFM, PhotoScan e Faro Scene. I principali *file* di *output* generati sono *point cloud*, *mesh*, *DSM* (*Digital surface model*), ortofoto e prospetti.

Nel sesto capitolo sono riportati i risultati delle analisi di densità relative alla nuvola di punti rappresentante la porzione della città di Tolentino eseguite per individuare le differenze esistenti tra i *software* commerciali e *open source*. Vengono inoltre illustrati i risultati delle analisi “*cloud to cloud*” tra la nuvola di punti generata con tecnica fotogrammetrica e quella acquisita con *laser scanner*. Queste analisi sono fondamentali per determinare le nuvole di punti che devono costituire l’unico modello tridimensionale utilizzabile in AutoDesk Revit. Il settimo capitolo è dedicato alla modellazione parametrica tridimensionale, HBIM (*Historical Building Information Modeling*) e l’applicazione di tale processo ai beni architettonici.

Nell’ultimo capitolo si analizzano i dati estratti dalle precedenti elaborazioni, valutando i punti di forza di questo processo innovativo poco sperimentato a livello professionale e le possibili prospettive future.

Team DIRECT (Disaster RECOVERY Team)

Il Disaster RECOVERY Team è composto da studenti e docenti del Politecnico di Torino e nasce per supportare la formazione studentesca nel campo del rilievo metrico tridimensionale e del telerilevamento relativi al territorio e al patrimonio costruito. Il nome del *team* scaturisce dalle attività di rilievo speditive realizzate in situazioni di post disastro o di rischio ambientale per la documentazione o il monitoraggio di strutture o beni architettonici.

Le attività di documentazione si realizzano mediante diverse metodologie di acquisizione come sistemi fotogrammetrici a basso costo, tra cui i mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo UAV in grado di acquisire immagini digitali ad elevata risoluzione, e tecnica *laser scanning* per registrare una nuvola di punti relativa all’oggetto rilevato.

Il comune di Tolentino ha promosso una collaborazione con il *team* del Politecnico di Torino e l’università di Nogoya per il monitoraggio dei principali beni architettonici danneggiati dal sisma. Per tale motivo si è realizzata una campagna di misura dal 20 al 25 febbraio 2017 per acquisire dati mediante tecniche innovative non-invasive come LIDAR e fotogrammetria da drone ad ala fissa e ala rotante.

2 Tecniche per il rilievo tridimensionale

Nel corso degli ultimi anni, la comunità scientifica che si occupa della scienza del rilevamento si è particolarmente interessata all'ambito dei Beni Culturali, campo in cui le differenti tecniche e tecnologie di rilievo possono integrarsi e completarsi. Le condizioni di rilievo reali sono spesso molto complesse, infatti ogni situazione è contraddistinta dalle proprie problematiche, caratteristiche e specificità, che possono costringere ad abbandonare gli schemi classici di rilevamento e cercare nuove e diversificate soluzioni. Inoltre, per studiare correttamente e completamente un bene culturale non si deve esaminare solo la singola entità, ma si deve considerare il contesto territoriale in cui è collocato, per tale motivo è necessario un approccio multi-disciplinare e multi-scala, dal rilievo del territorio fino al singolo manufatto.

L'acquisizione e il *processing* dei dati devono essere realizzati seguendo appropriate metodologie e considerando le caratteristiche di ogni tecnica sia in termini di capacità intrinseche, precisione, accuratezza e formato dei dati, sia allo scopo di mutua integrazione con la finalità di introdurre tutti i prodotti in un comune *database*.

Per ottenere un rilievo tridimensionale di un oggetto si possono usare una serie di metodologie di acquisizione (FIGURA 2.1), differenziate a seconda delle caratteristiche e prestazioni, la cui scelta dipende dalla finalità del prodotto digitale finale, dalla superficie da rilevare, dall'accuratezza e dal dettaglio geometrico richiesti, dalle condizioni ambientali in cui avviene il rilievo, dal *budget* a disposizione e dall'esperienza dell'operatore.

Nella TABELLA 2.1 è possibile osservare le differenti tecniche maggiormente utilizzate per ogni scala di lavoro. (M. Russo et al. 2011)

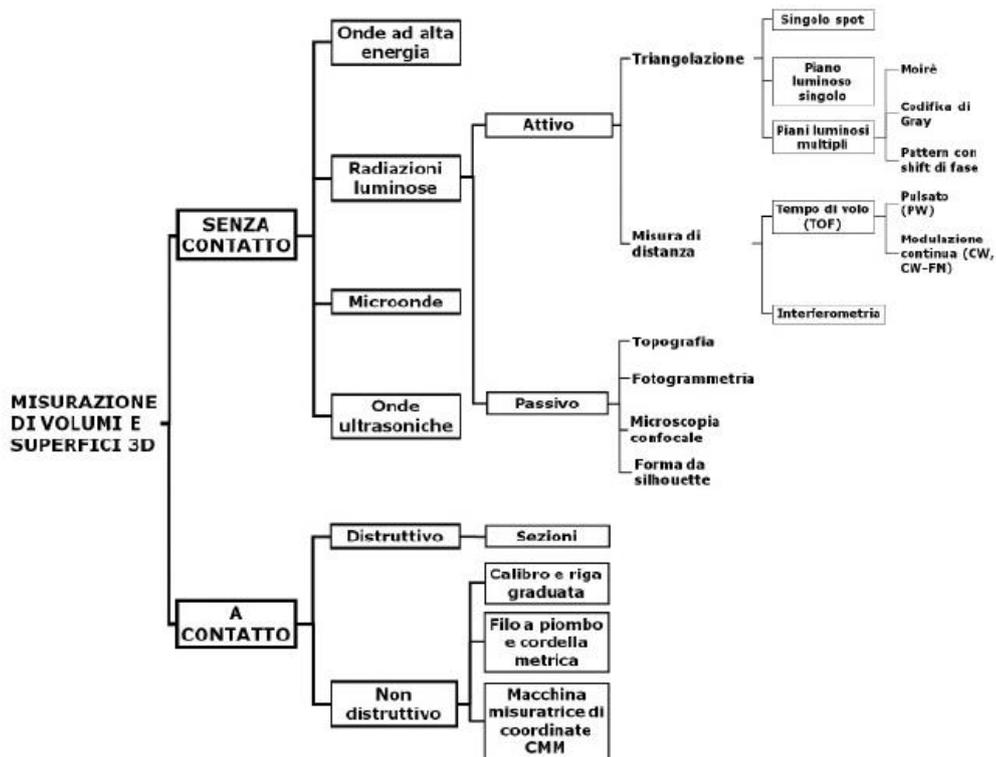


Figura 2.1- Schema di tutti gli strumenti per l'acquisizione tridimensionale - M. Russo et al. 2011

Tabella 2.1- Scale di lavoro e possibili tecniche per il rilevamento 3D digitale - M. Russo et al. 2011

Rilievo	Oggetti da rilevare	Dati e tecniche di rilievo
Scala regionale	Territorio Topografia Sito	Immagini satellitari Immagini aeree a piccola scala Radar Lidar aereo GNSS
Scala Locale	Sito Architetture Scavo Strati	Immagini satellitari ad alta risoluzione Immagini aeree a grande scala Lidar aereo Laser distanziometrici Immagini terrestri Stazione totale GNSS
Scala oggetto	Ritrovamenti Oggetti museali	Immagini terrestri Laser scanner a triangolazione

Le nuove tecniche e tecnologie digitali consentono di ottenere prodotti che possono dare un contributo attivo nella fase interpretativa, nella conservazione e archiviazione dei dati e

nella valorizzazione del bene. Per eseguire un rilievo geometrico attualmente si ricorre al rilevamento tridimensionale digitale, utilizzando prevalentemente tecnologie basate sull'uso di sensori tridimensionali, che consentono la ricostruzione della scena che inquadrano. Queste tecniche di rilievo digitale sono caratterizzate da un livello di complessità maggiore rispetto ai metodi tradizionali. Questo è dovuto all'utilizzo e alla gestione dei dati tridimensionali, che consentono di ottenere informazioni geometriche e colorimetriche complete, con tempistiche minori e accuratezza maggiore.

I sensori tridimensionali si suddividono a seconda della natura della luce che utilizzano per la radiazione luminosa in:

- Sensori **passivi** che adoperano la luce naturale quali ad esempio tecnica fotogrammetrica, teodoliti ecc...
- Sensori **attivi** che sfruttano una luce codificata nel processo di misura e sono *laser scanner, radar, GNSS (Global Navigation Satellite System), stazioni totali* ecc.

Entrambe le tecnologie sopra citate generano dati 3D che possono essere utilizzati per la creazione di modelli tridimensionali *reality-based* di manufatti o siti cittadini.

Il migliore approccio per il rilievo tridimensionale consiste nella combinazione di differenti strumenti e tecniche di modellazione. L'integrazione fra diversi sistemi di acquisizione consente l'ottimizzazione dell'intero processo, dal rilievo alla modellazione tridimensionale, ottenendo il miglior risultato possibile in termini di precisione del singolo dato e di accuratezza globale.

Nello specifico, i sensori attivi consentono di ottenere direttamente la collocazione spaziale della superficie rilevata, infatti, sono in grado di restituire direttamente un gran numero di coordinate 3D della superficie rilevata. I sensori passivi permettono di acquisire immagini che contengono tutte le informazioni necessarie per la ricostruzione della geometria e la *texture* dell'oggetto fotografato. I metodi basati sull'elaborazione metriche delle immagini (*image based*) necessitano di una precisa formulazione matematica per trasformare i dati estratti dalle immagini in coordinate metriche 3D.

In fotogrammetria è necessario effettuare una procedura di orientamento piuttosto complessa prima di ottenere informazioni tridimensionali dai fotogrammi, mentre le scansioni generate dal *laser scanner* possono essere unite in modo semplice e rapido. Un'ulteriore differenza consiste nella durata di acquisizione dati, infatti la tecnica fotogrammetrica è funzione esclusivamente delle dimensioni delle immagini, mentre la tecnica del *laser scanner* è legata alle dimensioni dell'oggetto da rilevare. Ad un aumento di dimensione corrisponde un incremento esponenziale del tempo di acquisizione dei dati. Per tale motivo, la tecnica fotogrammetrica è utilizzata quando si ha una limitata possibilità di permanenza nel luogo del rilievo o esso risulta inaccessibile. Infine, un rilievo fotogrammetrico è molto più flessibile, data la facile portabilità delle camere digitali.

Ogni strumento o metodo di rilievo è definito da caratteristiche che lo rendono unico sia nella modalità di acquisizione sia nel tipo di dati rilevati.

Nella FIGURA 2.2 sono sintetizzate le principali caratteristiche di funzionamento relative alle due tecniche sopra citate. (M. Russo et al. 2011)

Caratteristiche	Fotogrammetria (Image-Based Modeling)	Laser scanner (Range-Based Modeling)
Costo strumentazione (HW e SW)	Contenuto	Elevato
Maneggevolezza	Ottima	Sufficiente
Tempi per l'acquisizione dei dati	Minori	Maggiori
Tempi per la modellazione	Maggiori	Minori
Informazioni 3D	Da derivare	Dirette
Dipendenza dalla distanza	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalle dimensioni	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dal materiale	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalla luce ambientale	Dipendente	In parte/del tutto Indipendente
Dipendenza dalla geometria	Abbastanza dipendente	Indipendente
Dipendenza dalla texture	Dipendente	Indipendente
Scala/metricità	Assente/da fornire	Implicita (1:1 con dato reale)
Volume dei dati	Dipende dalla risoluzione delle immagini e dal tipo di misure	Nuvola di punti densa
Modellazione dei dettagli fini	Buona/ottima	Ottima
Texture	Inclusa	Assente/bassa risoluzione
Rilievo di spigoli	Ottimo	Abbastanza problematico
Analisi quantitative/statistiche	Per ogni punto calcolato	Globale

Figura 2.2- Caratteristiche di funzionamento della tecnica fotogrammetrica e del laser scanner 3D- M. Russo et al. 2011

2.1 La tecnica Laser scanner terrestre

Il termine L.A.S.E.R è l'acronimo di *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*, ed è una tecnica di rilevamento adoperata per l'acquisizione di grandi quantità di dati con tempi di rilievo sensibilmente ridotti e con precisione elevata. Lo *scanner 3D*

può essere paragonato a un occhio che misura tutto ciò che è visibile dalla posizione in cui è collocato.

Questo sensore è in grado di misurare le distanze, di dare informazioni sulla riflettanza, sul colore e sulla direzione normale di ciascun punto rilevato, restituendo nuvole di punti con coordinate tridimensionali X, Y e Z calcolate rispetto al centro dello strumento.

In ambito architettonico e ambientale, si utilizza principalmente il *laser scanner* a tempo di volo (*Time Of Flight*), in grado di misurare distanze fino a 1500 metri con precisione dal millimetro fino a pochi centimetri, rispetto al *laser scanner* triangolari, che sono invece impiegati per oggetti di piccole dimensioni, con precisioni molto più elevate. (Russo et al. 2011)

Il principio base del *laser* a tempo di volo è quello di misurare, mediante orologio con frequenza stabilizzata al quarzo e convertitore tempo tensione, l'intervallo di tempo che intercorre tra l'impulso trasmesso e quello ricevuto. In questo modo, conoscendo la velocità del *laser*, si può determinare la distanza lineare di un punto dal centro dello strumento utilizzando la seguente formula:

$$distanza\ lineare = \frac{intervallo\ di\ tempo \cdot velocità}{2} \quad [2.1]$$

La sola distanza lineare di un punto, non è sufficiente per determinare le coordinate tridimensionali, per tale motivo l'operazione di misura viene ripetuta milioni di volte ruotando il *laser* di piccole porzioni di angoli. Nel *laser scanner* il movimento orizzontale avviene per rotazione di tutto o in parte dello strumento, mentre il movimento verticale è calcolato attraverso la rotazione di uno specchio. (D. Bartolucci 2009)

Il *laser scanner* terrestre può essere paragonato a una stazione totale, in quanto entrambi calcolano le coordinate dei punti nel sistema polare, dove sono noti gli angoli verticali, orizzontali e le distanze. Naturalmente ci sono delle differenze, come ad esempio la capacità di misurare senza un prisma riflettente, perciò ogni oggetto sarà misurabile nel suo stato naturale, e di acquisire dei punti con altissima velocità e in maniera automatizzata. La rilevazione dei punti, a differenza del metodo topografico classico, non è controllata dall'operatore, il quale può solo pianificare, conoscendo la finestra utile di

scansione del *laser* (*FOV*- acronimo di *Field of View*), il numero di scansioni e i punti in cui verranno effettuate. Gli *scanner* a panorama, come quelli utilizzati nel rilievo oggetto di studio, consentono di misurare la quasi totalità di ciò che li circonda; l'unica area in ombra è quella descritta dal treppiede. Infatti, questi *scanner* ruotano sul loro asse verticale a 360° e hanno un ricoprimento quasi sferico. (D. Bartolucci 2009)

I *laser scanner*, oltre a misurare le coordinate dei punti, sono in grado di misurare il valore di riflettanza, il valore del colore e la direzione normale di ogni singolo punto.

La prima informazione, valore di riflettanza, è legata alla misura della qualità di segnale di ritorno allo strumento, tale valore dipenderà dalla natura della superficie stessa, dal suo indice di riflessione e dall'angolo di visione. Infatti, una parte del raggio *laser* viene assorbita, una parte si disperde e la restante viene riflessa e ritorna allo strumento, dove viene registrata dal diodo che gli assegna, in base all'intensità, un tono di grigio compreso tra 1 e 256. Il valore della luminanza risulta essere differente anche se si misura lo stesso materiale, ma con colorazioni differenti o con esposizione alla luce solare. Per tale ragione è impossibile generare una catalogazione dei valori di luminanza, in base ai singoli parametri, ma si possono usare *software* contenenti filtri in modo da selezionare tutti i punti con valori di riflettanza affini.

Il valore del colore RGB (acronimo di *Red Green Blue*), invece, è misurato dal sensore CCD (acronimo di *Charge Coupled Device*). Esso è costituito da una griglia di elementi semiconduttori in grado di accumulare una carica elettrica proporzionata all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce. Questi elementi sono accoppiati e inviano a un dispositivo una sequenza temporizzata d'impulsi. Si ottiene così in uscita un segnale elettrico, grazie al quale si genera la matrice dei *pixel* che compongono l'immagine proiettata sulla superficie del sensore stesso. Per colorare la nuvola di punti, il sensore *laser* e quello CCD devono avere la posizione reciproca nota. Il *laser scanner* utilizzato per il rilevamento, possiede al suo interno la fotocamera; queste posizioni sono note per costruzione ed è semplice attraverso i *software* proiettare le immagini fino al raggiungimento della nube dei punti colorata. Nel caso in cui le immagini vengano acquisite con una fotocamera esterna, queste devono essere orientate manualmente, ovvero

l'operatore deve ricercare punti omologhi tra immagine CCD e nuvola di punti e il programma successivamente determina con precisione il centro di presa dell'immagine.

2.1.1 Acquisizione delle scansioni laser

Una fase molto importante durante l'acquisizione con il *laser scanner* è decidere la posizione della strumentazione rispetto all'oggetto da rilevare. Nella pianificazione si deve fare in modo che il *laser scanner* rilevi l'oggetto da un punto di vista centrale, facendo attenzione alle zone nascoste. Per tale motivo, se l'oggetto da rilevare è particolarmente esteso o presenta elementi distribuiti su più livelli, ovvero vi sono elementi che generano coni d'ombra, si è costretti a spostare lo strumento di misura in un altro punto per effettuare una seconda ripresa. Le due differenti scansioni, opportunamente geo-referenziate tra loro, permettono di avere la nube completa priva di zone non misurate (FIGURA 2.3). (D. Bartolucci 2009)

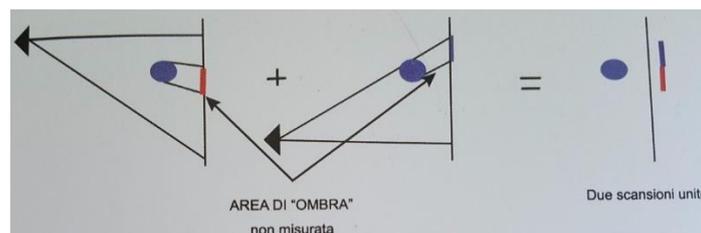


Figura 2.3- Unione di più scansioni per eliminare i coni d'ombra-D. Bartolucci 2009

Ogni modello 3D parziale dell'oggetto è espresso in un particolare e diverso sistema di riferimento cartesiano locale, centrato nello strumento e arbitrariamente orientato, ciò fa sì che i vari modelli che compongono il rilievo risultino indipendenti e senza alcun legame geometrico reciproco noto a priori.

2.1.2 Tecnica di allineamento

Dopo l'acquisizione bisogna effettuare la registrazione delle scansioni, ovvero si devono definire, per via analitica o strumentale, i parametri di spostamento e di rotazione che consentono di riportare le varie scansioni in un unico sistema di riferimento, in modo da ricomporre matematicamente il rilievo dell'oggetto facendo combaciare fra di loro le diverse parti in cui è suddiviso (FIGURA 2.4). La trasformazione fra i sistemi di coordinate è una roto-traslazione rigida nello spazio. La traslazione consiste nel determinare il vettore

di spostamento nell'origine del sistema di riferimento globale, mentre attraverso la rotazione si determinano gli angoli di rotazione attorno ai tre assi. (Dispense A.Piemonte)

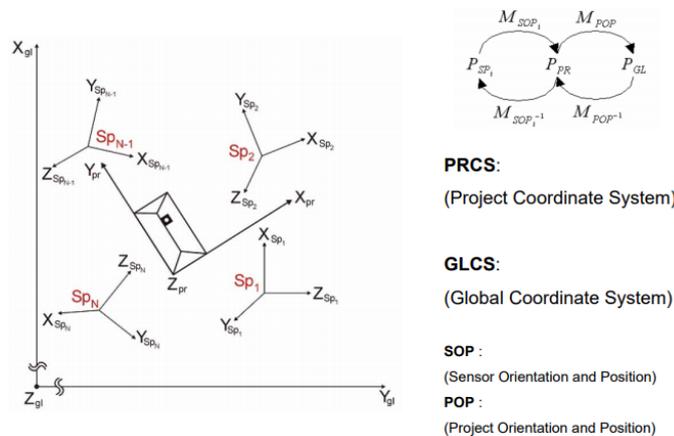


Figura 2.4-Ogni scansione ha un sistema di riferimento proprio, con la registrazione delle scansioni si definisce il sistema di coordinate globali- Dispense A.Piemonte

Il legame geometrico può essere definito con il metodo diretto, durante la fase di acquisizione, oppure con il metodo indiretto, agendo analiticamente sui modelli numerici 3D prodotti. Utilizzando il metodo diretto si devono rilevare gli spostamenti e le variazioni di assetto fra le diverse posizioni del *laser scanner* mediante GNSS accoppiati a sistemi inerziali oppure tramite dispositivi meccanici ausiliari. Mentre con il metodo indiretto si opera a posteriori sulle scansioni andando ad individuare corrispondenze fra coppie di punti o parti in comune a due o più modelli, con procedure automatiche o manuali, e affidare la stima delle relazioni geometriche agli strumenti analitici. Per tale motivo il secondo è il metodo maggiormente utilizzato. (F.Crosilla et al. 2006)

Le tecniche di registrazione adottate nel metodo indiretto sono principalmente due (FIGURA 2.5):

- La tecnica di allineamento per *punti omologhi o di legame*, riconducibile al metodo della Triangolazione Aerea a Modelli Indipendenti;
- La tecnica di allineamento nota ICP (*Iterative Closest Point*) che utilizza direttamente le nuvole di punti

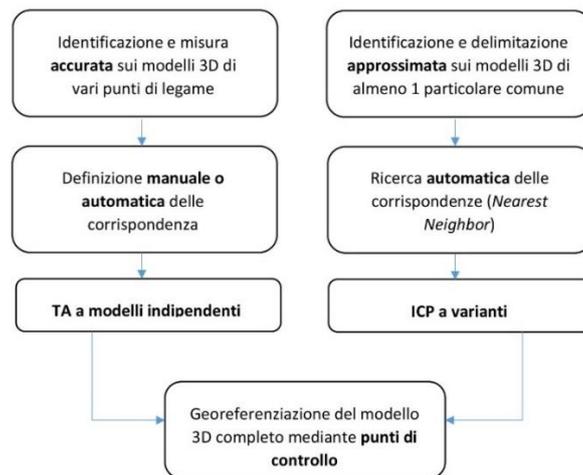


Figura 2.5- Fasi distintive delle due principali tecniche di registrazione scansioni- F.Crosilla et al. 2006

2.1.2.1 Tecnica di allineamento indiretto per punti omologhi

Le nuvole di punti ottenuti dai rilievi *laser scanning* sono analizzate mediante *software* per identificare su ognuno di essi un numero sufficiente di punti caratteristici o di singolarità morfologiche, che compaiono in due o più scansioni. Oltre ai punti di legame possono essere utilizzati, anche in questa prima fase, i punti di controllo o di appoggio che sono vertici di coordinate note.

Dal punto di vista pratico, oltre alla ricerca di dettagli costruttivi univocamente riconoscibili, per facilitare l'operazione di identificazione si ricorre, dove è possibile, all'inserimento manuale sull'elemento oggetto di studio di appositi elementi, denominati *target* o *marker*. Generalmente queste entità puntuali sono misurate tramite la strumentazione topografica.

Questi particolari elementi, possono essere individuati automaticamente da alcuni *software* di elaborazione delle scansioni. Il mancato riconoscimento automatico, comporta l'inserimento manuale da parte dell'operatore.

2.1.2.2 Tecnica di allineamento indiretto mediante congruenza tra superfici campionate- ICP

Il metodo *Iterative Closest Point* non richiede la segnalazione preventiva dell'oggetto da rilevare. Anche il metodo ICP opera per punti omologhi, identificandoli in maniera automatica, considerando criteri di vicinanza geometrica, tra due o più scansioni parzialmente sovrapposte e già grossolanamente pre-allineate. Lo schema iterativo contribuisce a migliorare progressivamente l'allineamento, infatti le coppie di punti

omologhi sono ridefinite e rifinite a ogni sequenza, fino a quando i parametri di traslazione risultano significativi.

L'ICP ha il vantaggio di rendere i punti di legame non necessari, ma richiede un avvicinamento dei modelli 3D effettuato manualmente oppure la definizione grossolana di uno o due particolari comuni.

Questo metodo produce un allineamento molto accurato quando le superfici da allineare risultano singolari, grazie all'elevato numero di corrispondenze che riesce a identificare. Al contrario è inefficiente per superfici regolari prive di variabilità morfologica. (F.Crosilla et al. 2006)

2.2 La tecnica fotogrammetrica

La fotogrammetria è una tecnica che stabilisce una relazione geometrica tra la scena reale e le immagini acquisite con sensori terrestri, aerei o satellitari. Dopo aver ricostruito il modello matematico della collinearità è possibile ottenere da esso informazioni metriche sulla dimensione, forma e posizione di un oggetto reale.

Al giorno d'oggi, la fotogrammetria ha un compito basilare nello studio e nella rappresentazione del territorio, con la finalità di effettuare valutazioni sul patrimonio esistente.

Questa tipologia di rilievo presenta numerosi vantaggi rispetto a quelli topografici classici quali:

- determinazione delle caratteristiche degli oggetti senza aver contatto fisico con essi;
- rilevamento simultaneo di molti punti;
- le misure sono effettuate a posteriori sui fotogrammi, possono essere ripetute in ogni momento;
- rapidità ed economicità nella produzione cartografica di territori di dimensioni medio-grandi;
- uniformità di precisione per tutti i punti.

La fotogrammetria è classificata in funzione del tipo di presa utilizzata, di elaborazione e di fotografia utilizzata. (R.Cannozzo et al. 2012)

- Tipo di presa: *Fotogrammetria terrestre* Le prese avvengono da terra e gli oggetti analizzati si trovano ad una distanza generalmente inferiore a 200 [m], quindi si usa per il rilievo architettonico di edifici. *Fotogrammetria aerea*. Le prese avvengono grazie all'ausilio di mezzi aerei, che permettono il rilievo di oggetti lontani e di intere aree. Si utilizzano per il rilievo territoriale-ambientale;
- Tipo di elaborazione: *Fotogrammetria analogica*, in cui la ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene con dispositivi fisici (bacchette metalliche, raggi luminosi) che riproducono all'inverso il fenomeno della presa. *Fotogrammetria analitica*, dove la ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene elaborando numericamente (con moderni strumenti di calcolo) opportune misure effettuate direttamente sui fotogrammi. *Fotogrammetria digitale*, in cui la ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene con calcolatori, basati su algoritmi della *Structure from Motion*, in grado di gestire una quantità di dati elevati.
- Tipo di fotografia: *Fotogrammetria classica*. Le fotografie sono ottenute dallo sviluppo di emulsioni fotosensibili su pellicola o su lastre di vetro (in negativo e in positivo). *Fotogrammetria digitale*. Le fotografie sono ottenute sotto forma numerica e organizzate in un grigliato di *pixel*. Possono essere ottenute sia da una macchina digitale, sia per scansione di una fotografia tradizionale.

I prodotti finali della fotogrammetria possono essere:

- rappresentazione grafiche, cioè carte topografiche o fotografie elaborate come ortofoto;
- rappresentazione numeriche, cioè coordinate di punti appartenenti a oggetti rilevati.

La fotogrammetria è nata come disciplina analitica e i suoi fondamenti basilari sono le equazioni di collinearità dei punti oggetto-immagine-centro di proiezione, utilizzate per risolvere il problema della prospettiva di presa, ovvero dell'orientamento esterno di una coppia di fotogrammi consecutivi.

Data la difficoltà di risolvere i problemi di calcolo, con la rivoluzione tecnologica, avviata con l'introduzione del computer, le tecniche di rilievo, di ripresa e di elaborazione si sono evolute. Infatti, si sono sviluppati nuovi *software* (commerciali e non), che permettono una maggiore automazione del processo e la visualizzazione di dati digitali. Tuttavia, le nuove strumentazioni come ad esempio le camere digitali di dimensioni compatte e i sistemi GNSS (*Global Navigation Satellite System*) sempre più performanti, hanno permesso di migliorare la qualità del rilievo.

Queste tecniche e tecnologie digitali permettono di utilizzare forme di registrazione e di archiviazione digitale a differenti livelli di scala e risoluzione. Per tale motivo consentono la rappresentazione e la visualizzazione, con una descrizione metrica accurata, del territorio, delle strutture e degli edifici.

Durante l'acquisizione e l'elaborazione dei dati è necessario considerare sia le caratteristiche di ogni tecnica di rilievo, quali la precisione, accuratezza e formato dei dati, sia lo scopo fondamentale di mutua integrazione, infatti i prodotti finali generalmente vengono inseriti in un comune *database* utilizzato per la documentazione, la divulgazione, studi di stabilità delle strutture ecc.

Ad oggi la fotogrammetria può essere divisa in tre differenti classi:

- fotogrammetria aerea/da satellite;
- fotogrammetria UAV;
- fotogrammetria terrestre.

2.2.1 Fasi del rilievo fotogrammetrico

Le principali fasi di un generico rilievo fotogrammetrico sono le seguenti:

- **Progettazione:** operazione relativa alla progettazione della presa dei fotogrammi in funzione della strumentazione, per cui si definiscono la scala di restituzione finale, le caratteristiche del sensore e la distanza di presa;
- **acquisizione:** fase operativa prevede l'acquisizione delle immagini con opportune macchine fotografiche dette camere e opportune tecniche;
- **orientamento interno:** operazioni preliminari per la determinazione dei parametri che consentono di definire la posizione, al momento della presa, dei centri di presa nello spazio, quindi delle stelle di raggi proiettanti. Essi sono uguali per tutti i fotogrammi del rilievo, in quanto strettamente legati alla camera utilizzata nella presa e sono forniti dal produttore nel certificato di calibrazione;
- **orientamento esterno:** definisce la posizione spaziale della camera. Quindi è definito da 6 parametri: tre traslazioni e tre rotazioni. Si distingue "Orientamento esterno relativo", in cui si determina la posizione relativa dei due fotogrammi, realizzando l'intersezione dei raggi proiettanti e "Orientamento esterno assoluto", che prevede la rototraslazione e la variazione della scala del modello, realizzato precedentemente, al fine di ancorarlo a un sistema di riferimento assoluto e nella scala desiderata;
- **restituzione:** operazioni che consentono di effettuare la ricostruzione delle geometrie nelle tre dimensioni, di misurare il modello dell'oggetto ricostruito e di produrre gli *output*

necessari per l'analisi. L'operatore deve eseguire delle operazioni di progettazione e di verifica di ogni singola fase, per evitare errori che possono condizionare le fasi successive, quindi la qualità dell'intero rilievo fotogrammetrico.

2.2.2 I fondamenti analitici: le equazioni di collinearità

La fotogrammetria fonda le sue basi sul principio di collinearità, cioè l'allineamento tra il centro di presa della camera (O), il punto immagine (P') e il punto oggetto (P). Si considera un nuovo sistema terreno X', Y', Z' parallelo al sistema immagine ξ, η, ζ e con origine coincidente al sistema X, Y, Z.

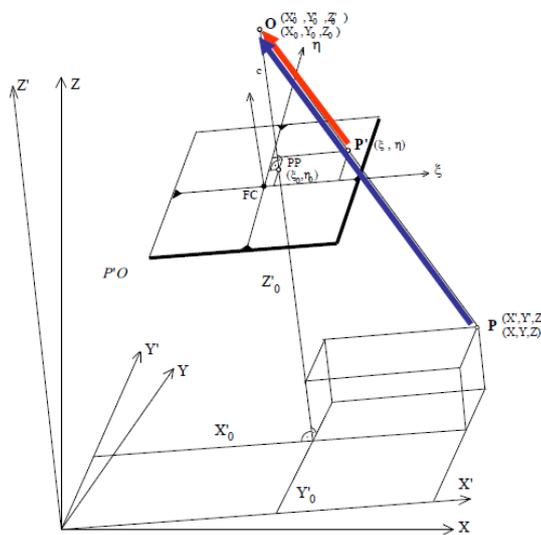


Figura 2.6- Schematizzazione del principio di collinearità; si definiscono camera da presa (O), punto immagine (P') e punto oggetto (P)- Dispense Lingua 2017.

Dal momento che i vettori (P'-O) e (P-O) sono paralleli, per la condizione di parallelismo si può affermare che le loro componenti sono in proporzione. Esplicitando le coordinate del punto immagine e passando dal sistema X', Y', Z' al sistema oggetto X, Y, Z mediante la matrice di rotazione spaziale si ottengono le seguenti equazioni definite "Equazioni di collinearità":

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = \xi_0 - c \cdot \frac{Z_x}{N} \quad [2.2]$$

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = \eta_0 - c \cdot \frac{Z_y}{N} \quad [2.3]$$

E' possibile scrivere l'espressione in funzione delle coordinate immagini:

$$X = X_0 - (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \quad [2.4]$$

$$Y = Y_0 - (Z - Z_0) \cdot \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \quad [2.5]$$

Si può osservare come ad ogni punto oggetto corrisponde un solo punto immagine, mentre per ogni punto immagine esistono infiniti possibili punti oggetto. Queste equazioni costituiscono un modello matematico che mette in relazione le coordinate dei punti del fotogramma con le coordinate tridimensionali dei corrispondenti punti appartenenti al soggetto rappresentato. (G. Bezoari et al. 1993)

2.2.3 Calibrazione delle camere digitali

Negli ultimi anni si sono diffuse tecniche di rilevamento e rappresentazione a basso costo che abbinano alla strumentazione topografica classica le fotocamere digitali. L'utilizzo di queste fotocamere implica un abbassamento dei costi e una riduzione nella qualità dei risultati finali.

L'esecuzione di un progetto fotogrammetrico può avvenire solo se si conoscono i parametri dell'orientamento interno, quali distanza focale (c) e la posizione del punto principale sul fotogramma (x_0, y_0), e i parametri di distorsione delle lenti (K_1, K_2, K_3). Il modello di calibrazione può essere esteso considerando anche gli effetti, modellizzati con P_1 e P_2 , dovuti alla distorsione radiale asimmetrica e tangenziale causati dal decentramento delle lenti rispetto all'asse ottico.

Le distorsioni da considerare sono:

- dell'obiettivo, quelle più comuni sono quella a cuscinetto e a barilotto (FIGURA 2.7-A). Bisogna determinare i valori delle distorsioni radiali ($\Delta\xi_R, \Delta\eta_R$) e tangenziali ($\Delta\xi_T, \Delta\eta_T$);
- del sensore, il *pixel* non è quadrato e inoltre le righe e le colonne non sono perpendicolari fra loro (FIGURA 2.7-B). I parametri da calcolare sono ($\Delta\xi_S, \Delta\eta_S=0$).

Le equazioni di collinearità assumono le seguenti formule:

$$\xi = \xi_0 + \Delta\xi_r + \Delta\xi_t + \Delta\xi_s - c \cdot \frac{Z_x}{N} \quad [2.12]$$

$$\eta = \eta_0 + \Delta\eta_r + \Delta\eta_t - c \cdot \frac{Z_y}{N} \quad [2.13]$$

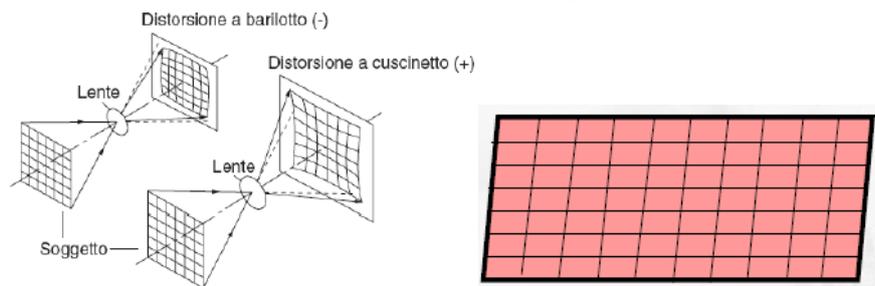


Figura 2.7- A) Distorsioni dell'obiettivo, B) distorsione del sensore

Distorsione radiale

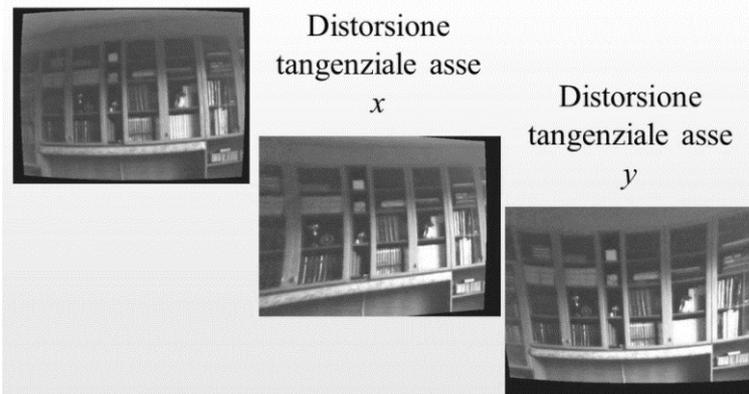


Figura 2.8- Esempi di immagini con distorsioni causate dall'obiettivo- Dispense F. Pirri

Il problema della calibrazione può essere risolto praticamente utilizzando le procedure analitiche, come *on-the-job calibration* e *self-calibration*. Entrambe sono basate sulla soluzione di calcolo di *blunde-adjustment* realizzato considerando incogniti sia i sei parametri di orientamento esterno sia i sei parametri di calibrazione della camera ($c, x_0, y_0, K_1, K_2, K_3$), mentre noti le coordinate oggetto di un certo numero di punti. Il primo metodo si basa sulla determinazione dei parametri specifici per ogni rilievo fotogrammetrico e infatti si utilizzano sia le prese fotogrammetriche dell'oggetto sia i punti di coordinate note. Tale metodo è impiegato soprattutto quando si adoperano camere fotografiche non metriche che presentano una scarsa stabilità dei parametri di calibrazione. L'esecuzione di numerose prese con schemi convergenti migliora la determinazione dei parametri della camera. Il secondo metodo si basa sulla determinazione dei parametri indipendentemente dalla procedura di rilievo fotogrammetrico. La calibrazione è eseguita utilizzando un

reticolo “di calibrazione”, in cui le coordinate dei *target* sono note con estrema precisione. (S. D’Amelio et al. 2007).

2.2.4 Classificazione fotogrammetria

2.2.4.1 Fotogrammetria aerea

La fotogrammetria aerea è stata lo strumento più utilizzato in passato per la produzione cartografica di territori di dimensioni medio-grandi.

Per soddisfare il principio basilare della fotogrammetria, è fondamentale che ogni generico punto del territorio sia ripreso da almeno due fotogrammi consecutivi. Infatti sui fotogrammi vengono registrate le due immagini, omologhe del punto, delle quali si calcolano in fase di restituzione le coordinate immagini che consentono di stabilire il posizionamento del punto. Per tale motivo l’aereo, per la ripresa aerea, segue una traiettoria rettilinea a velocità costante, a una certa altezza dal terreno, in modo da registrare il punto sia nell’istante t_1 attraverso il raggio *forward* sia nell’istante t_2 mediante il raggio *backward*. La necessità di rappresentare il territorio in almeno due fotogrammi consecutivi è garantita dal ricoprimento longitudinale (*overlap*) che in generale 60%, come mostrato in figura (FIGURA 2.9). (R.Cannozzo et al. 2012)

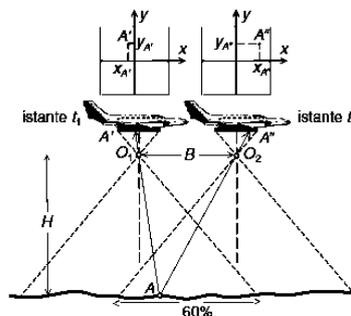


Figura 2.9- Schema della presa aerea nadirale- R.Cannozzo et al. 2012

I fotogrammi registrati lungo lo stesso percorso rettilineo costituiscono una strisciata. L’aeromobile riprende il territorio eseguendo una sequenza di strisciate affiancate lungo direzioni parallele (FIGURA 2.10), con ricoprimento laterale (sovrapposizione presente fra due strisciate adiacenti) del 10-20% dell’abbracciamento del fotogramma.

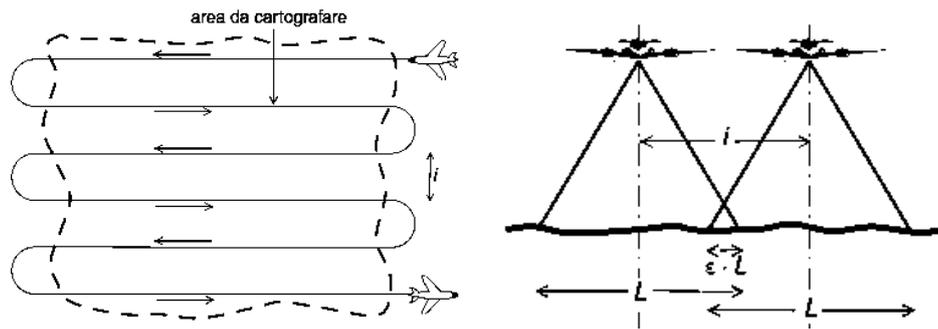


Figura 2.10- Schema di copertura del territorio con volo fotogrammetrico organizzato in traiettorie rettilinee e parallele-
R.Cannozzo et al. 2012

Questa tecnica consente la scomposizione ideale del terreno in diversi modelli stereoscopici che possono essere concatenati fra loro, grazie alla loro sovrapposizione. (R.Cannozzo et al. 2012)

2.2.4.2 Fotogrammetria aerea mediante UAV

I rilievi fotogrammetrici aerei sono generalmente costosi e presentano immagini con una risoluzione non ottimale per il rilievo a scala architettonica, a causa delle quote di volo. Per tale motivo sono state sviluppate piattaforme aeree non convenzionali, che utilizzando sensori e fotocamere digitali compatte a elevata risoluzione, sono in grado di acquisire immagini per tipologie di rilievo da terra o aerea.

La piattaforma aerea non convenzionale maggiormente utilizzata sono gli UAV, dall'inglese *Unmanned Aerial Vehicle*, velivoli in grado di volare senza la presenza di pilota a bordo, che permettono di eseguire riprese aeree programmate con elevata velocità di esecuzione. Questi sistemi sono dotati di camere digitali compatte ad alta risoluzione e possono volare ad un'altezza minore rispetto ai mezzi aerei e per tali motivi sono in grado di acquisire immagini con elevato grado di dettaglio.

Tali sistemi di acquisizione associati alle tecniche di fotogrammetria digitale consentono di ottenere elaborati grafici e cartografici con le precisioni tipiche del rilievo a grandissima scala.

Lo sviluppo di queste piattaforme nasce negli anni '50 per scopi militari, fino ad arrivare ad oggi dove gli UAV sono utilizzati anche in ambito civile per attività di controllo, misure atmosferiche, valutazione dei danni e altri fenomeni per i quali non è possibile un accesso diretto al sito. Si sta verificando un graduale e continuo passaggio dai metodi tradizionali

di rilievo e raccolta dati a sistemi di elevata automazione, come la fotogrammetria digitale tramite l'utilizzo dei sistemi non convenzionali. Infatti, in questi ultimi anni vi è stato un incremento dei sistemi UAV per i rilievi fotogrammetrici, grazie allo sviluppo di camere digitali compatte ad altissima risoluzione, sempre più piccole e sostenibili dal punto di vista dei costi. (F. Chiabrando et al. 2012)

Gli UAV, secondo la classificazione redatta dall'*Unmanned Vehicle System International Association* sono suddivisi in tre categorie principali quali *Tactic*, *Strategic* e *Special Purpose*, a seconda del loro possibile utilizzo e in sottocategorie in base alle loro caratteristiche e prestazioni.

Generalmente i sistemi utilizzati per la documentazione e il rilievo a grandissima scala possono essere considerati appartenenti alla prima categoria *Tactic* (TABELLA 2.2).

Tabella 2.2-Classificazione degli UAVs *Tactic* a cura della *Unmanned Vehicle Systems International Association*

Tactic UAVs Sottocategorie	Acronimo	Capacità di volo [km]	Max quota di volo raggiungibile [m]	Autonomia [ore]	Peso [kg]
Micro	μ(Micro)	<10	250	1	<5
Mini	Mini	<10	150-300	<2	150
Close Range	CR	10-30	3000	2-4	150
Short Range	SR	30-70	3000	3-6	200
Medium Range	MR	70-200	5000	6-10	1250
Medium Range Endurance	MRE	>500	8000	10-18	1250
Low Altitude Deep Penetration	LADP	>250	50-9000	0.5-1	350
Low Altitude Long Endurance	LALE	>500	3000	>24	<30
Medium Altitude Long Endurance	MALE	>500	14000	24-48	1500

Il rilievo da micro UAV o con Drone automatico assicura una misurazione precisa di superfici e volumi, la restituzione di un modello 3D e permette di effettuare indagini multi-temporali attraverso la ripetibilità, in qualsiasi momento, dei voli con identici parametri.

La nuova tecnologia UAV, abbinata alle tecniche di fotogrammetria, può essere di sostegno per la gestione delle emergenze sia in fase di acquisizione speditiva, sia durante la successiva elaborazione.

In particolare si è sperimentato come un'acquisizione tramite video-ripresе da UAV può generare, con buone condizioni di luce, di esposizione e di qualità delle superfici da rilevare, *file* di *output* metricamente corretti con la sola integrazione del rilievo di GCP (*Ground Control Point*) tramite misure topografiche. (Giannangeli et al. 2015)

Il rilievo mediante UAV può essere scomposto in 5 fasi (D.Santarsiero, 2015):

- Gestione delle attività UAV: *software* di *management* delle attività di gestione come pianificazione, gestione dei piani di manutenzione, delle attività e autorizzazione dei piloti;
- Gestione del volo: la gestione del volo avviene utilizzando sistemi che hanno la funzione di tenere aggiornati i dati di navigazione, integrandoli con sistemi di volo come attuatori, motori e sistemi ospiti o *payload*. I *software* di gestione del volo sono legati alla centralina impiegata dal sistema UAV.
La soluzione adottata da Dji è PC *Ground Station (GS)*, che permette di gestire le funzioni avanzate delle *No Fly Zone* e implementare la funzione di sicurezza con un raggio di 8 km dai *waypoints*. GS opera avendo come interfaccia quella di *Google Earth*.
- Pianificazione di volo: generalmente i *software* in dotazione ai sistemi UAV prevedono una procedura di gestione del volo considerando i *waypoint* e l'uso dei sensori a bordi del sistema;
- Post-processing per elaborazione dati: *software* di post-produzione dei dati rilevati con i sistemi UAV;
- 3D modelling e vision digitalizing: *software* per la realizzazione 3D e di visualizzazione avanzati.

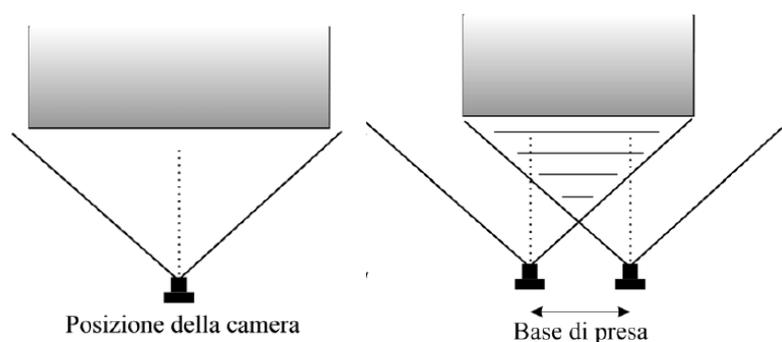
2.2.4.3 Fotogrammetria terrestre

La fotogrammetria terrestre è dedicata al rilievo di monumenti, edifici ed elementi architettonici. Essa viene utilizzata quando le distanze dall'oggetto sono piccole e per tale motivo è anche detta fotogrammetria dei vicini. La camera, a differenza della fotogrammetria aerea, rimane ferma durante la presa e vi è maggior libertà nelle configurazioni delle prese.

La disposizione della camera, nei punti della presa terrestre, non è limitata da vincoli, bisogna prestare attenzione alla realizzazione di una buona geometria dei raggi proiettanti. Praticamente è necessario limitare il dislivello fra i punti di presa entro il 10% della base di presa, per non pregiudicare il ricoprimento laterale.

Gli approcci per il rilievo fotogrammetrico terrestre di un elemento architettonico possono essere i seguenti:

- Approccio a singola immagine (FIGURA 2.11-A), con il procedimento del raddrizzamento si può generare la restituzione dell'oggetto piano;
- Approccio stereoscopico (FIGURA 2.11-B) per ogni lato dell'oggetto vengono eseguite molteplici prese in assetto normale o pseudo normale;
- Metodo dei fasci proiettivi o *bundle solution* (FIGURA 2.11- C, D), quando l'oggetto presenta geometria e dimensioni complicate da rilevare e da restituire con le sole prese stereoscopiche, in questo caso si acquisiscono un gran numero di immagini da diversi punti di vista intorno all'oggetto e con assi convergenti.



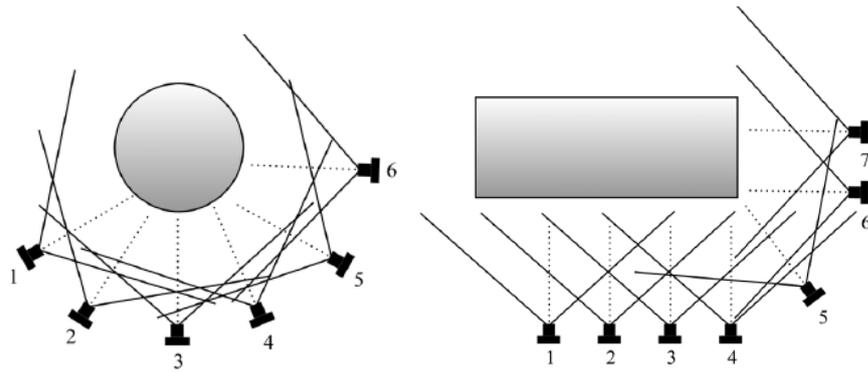


Figura 2.11 A) Approccio a singola immagine B) Prese ad assetto pseudo-normale, C) e D) possibili esempi di configurazione per la bundle solution

Quindi esistono due tipologie di fotogrammetria terrestre quella classica tradizionale (FIGURA 2.11-A E B) e quella non convenzionale (FIGURA 2.11-C E D), che si è sviluppata successivamente per contenere i costi significativi che prevede la prima tecnica sia per le camere metriche sia per i restitutori analitici. Infatti essa utilizzando camere semimetriche e amatoriale rinuncia alla stereoscopia, affidandosi nella restituzione a particolari *software*, come Agisoft PhotoScan o Visual SFM. Questa tecnica presenta una precisione inferiore rispetto a quella consentita dalla fotogrammetria classica, ma in molti contesti risulta ancora attendibile.

2.2.5 Relazione tra scala dei fotogrammi, distanza dall'oggetto rilevato e scala del disegno

I fotogrammi sono caratterizzata da una scala media che varia da punto a punto nella prospettiva, e può essere definita con la seguente formula:

$$scala\ media = \frac{1}{N} = \frac{l}{L} \quad [2.2]$$

con l si intende il lato effettivo utile del fotogramma, mentre L indica il lato del quadrato di oggetto contenuto in esso.

Poiché quest'ultima dimensione non è nota, possiamo sostituire tale rapporto con il rapporto equivalente ricavato da un'assunzione geometrica: valutando lo schema di una generica presa, considerando un'ipotesi approssimata come mostrato nella FIGURA 2.12, si osserva l'uguaglianza tra il rapporto delle parti opposte della sezione di piramide generata dalle stelle proiettiva e il rapporto sopra citato. La scala del fotogramma è funzione esclusivamente dalla distanza dall'oggetto ripreso, non potendo variare distanza principale d . (R. Cannozzo 2012)

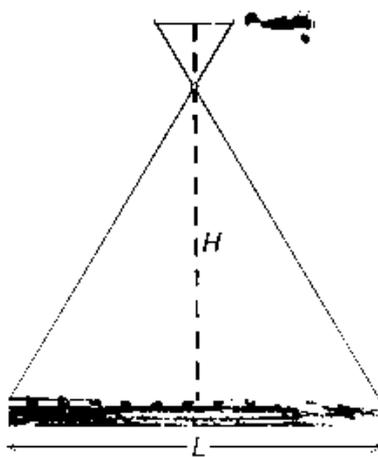


Figura 2.12- Definizione della scala media dei fotogrammi in configurazione di presa aerea- R. Canozzo 2012

$$\frac{1}{N} = \frac{d}{H} \quad [2.3]$$

Nel caso di presa aerea la distanza media tra l'oggetto e il centro di presa della camera corrisponde all'altezza di volo. Questa relazione è utile per determinare tale parametro, considerando il valore di scala dei fotogrammi desiderato.

$$H = d \cdot N \quad [2.4]$$

La scala dei fotogrammi non può essere fissata arbitrariamente, ma dipende strettamente dalla scala di rappresentazione del rilievo. Tanto maggiore è la scala del disegno ($1/N_{dis}$), tanto maggiore è il dettaglio da rappresentare. Per tale motivo si stabilisce inizialmente la scala del disegno, poi l'adeguata scala dei fotogrammi corrispondente ed infine l'altezza di volo o la distanza dall'oggetto.

Con l'esperienza si sono individuate relazioni tra la scala del disegno e la scala dei fotogrammi.

In caso di rilievo cartografico con prese aeree si utilizza la formula sottostante, con coefficiente k pari compreso tra 200 e 300 per scale del disegno inferiori a 1:5000, e tra 150 e 200 per scale superiori a 1:2000 (R. Canozzo 2012)

$$N = k \cdot \sqrt{N_{dis}} \quad [2.5]$$

Un'alternativa è la TABELLA 2.3 elaborata dalla Commissione Geodetica Italiana.

Tabella 2.3- Relazione tra la scala della carta e la scala del fotogramma

Scala Carta	Scala media Fotogramma	Scala minima Fotogramma
1:25000	1:25000	1:30000
1:10000	1:20000	1:23000
1:5000	1:15000	1:18000
1:2000	1:8000	1:10000
1:1000	1:5000	1:5500
1:500	1:3000	1:3500

2.2.6 Il GSD-Ground Sample Distance

Un altro parametro importante da calcolare è il GSD (*Ground Sample Distance*), indice della bontà del rilievo e influenza la scala di rappresentazione dei prodotti finali della fotogrammetria. Esso è utile per la definizione del passo delle nuvole di punti estratte per via fotogrammetrica (Linee guida-Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala) e rappresenta la distanza tra il centro di due *pixel* consecutivi espressa in unità territoriale. Ovvero è la “quantità dell’oggetto” contenuta in un *pixel* dell’ortofoto.

Esiste un rapporto di proporzionalità inversa tra il valore del GSD e la definizione di un’immagine: quanto più grande il *pixel* tanto minore è il grado di dettaglio e viceversa tanto più piccolo è il GSD tanto maggiore è l’informazione contenuta nel rispettivo *pixel*. (3Deffe)

La definizione del GSD può essere definita considerando la geometria dei triangoli simili, come mostrato in FIGURA 2.13 e può essere calcolato con la seguente formula:

$$GSD = \frac{H \cdot d_{pixel}}{c} \quad [2.6]$$

H denota l’altezza di volo media dal terreno, d_{pixel} la dimensione del singolo *pixel* e c la focale della macchina fotografica.

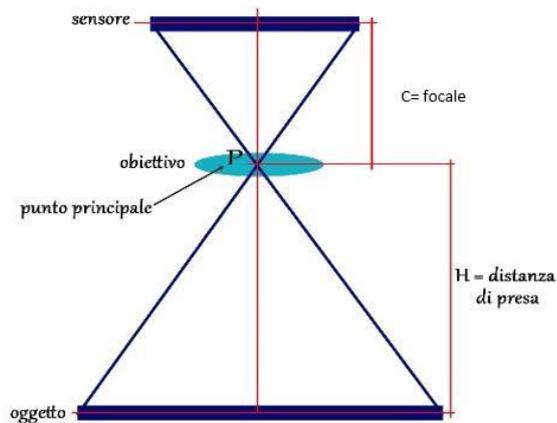


Figura 2.13- Parametri necessari per definire il GSD- 3Deffe

I valori del GSD per camere digitali comuni, in funzione della scala nominale cui tendere, possono essere sintetizzate nella TABELLA 2.4. (Linee Guida-Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala)

Tabella 2.4- Valori del GSD da utilizzare nel caso di prese con camere digitali in funzione della scala nominale

Scala	Precisione in quota [m]	GSD max [m]	GSD medio [m]	GSD minimo [m]
1:5000	1,00	0,32	0,25	0,22
1:2000	0,30	0,17	0,14	0,12
1:1000	0,15	0,11	0,08	0,07
1:500	0,10	0,06	0,05	0,04

2.2.7 La precisione della fotogrammetria

Per determinare gli errori massimi ammissibili in un modello stereoscopico si possono utilizzare differenti regole empiriche.

Le regole empiriche utilizzate nel caso in cui si adoperano camere fotografiche tradizionali sono:

- Punti presegnalizzati
 - Planimetria $\pm 6 \mu\text{m}$ sul fotogramma
 - Altimetria $\pm 0.06\%$ o 0.08% della distanza di presa a seconda della camera
- Punti naturali

$$\sigma_{XY(nat)} = \sqrt{\sigma_{XY(seg)}^2 + \sigma_{XY(def)}^2} \quad [2.7]$$

$$\sigma_{Z(nat)} = \sqrt{\sigma_{Z(segn)}^2 + \sigma_{Z(def)}^2} \quad [2.8]$$

Queste regole empiriche determinate per le camere fotografiche tradizionali sono corrette in XY, infatti sono coerenti con il GSD, mentre in Z sottostimano la precisione soprattutto per piccoli valori della distanza di presa.

Per tale motivo sono state individuate altre regole empiriche utilizzate maggiormente in caso di camere digitali non convenzionali.

- Regole empiriche **EuroSDR**

$$\sigma_{XY} = 1.5 \cdot M \cdot \sigma_{xy} = 1.5 \cdot GSD \quad [2.9]$$

$$\sigma_Z = 2 \cdot M \cdot \sigma_{xy} = 2 \cdot GSD \quad [2.10]$$

- Regole empiriche di **Fraser**

$$\sigma_{XYZ} = \frac{qZ}{c\sqrt{K}} \cdot \sigma_{P\epsilon} \quad [2.11]$$

- K è il numero medio delle immagini che riprendono lo stesso punto
- q è un fattore di forma (0.4-0.8) legato agli angoli tra i raggi omologhi

In questo caso la precisione è simile in tutte le direzioni.

- Regole empiriche di **Lingua**
 - Planimetria \pm dimensione del *pixel* (GSD)
 - Altimetria $\pm 3 \cdot 10^{-4} \cdot H$

Le regole di Fraser sottostimano la precisione, mentre le regole di EuroSDR e di Lingua risultano più coerenti con i nuovi schemi delle prese da drone. (Dispense A. Lingua)

3 *Structure from Motion*

Nel campo della *computer vision* e della percezione visiva, con l'acronimo SfM (*Structure from Motion*) si intende quel processo di individuazione della struttura tridimensionale di un oggetto, analizzando i segnali di movimento locali nel tempo.

La SfM si è sviluppata nel 1990 in seguito alla fotografia digitale. Questi sistemi, infatti, utilizzando il dato fotografico digitale sono in grado di ricostruire i dati geometrici e cromatici. Questa tecnica di calcolo è alla base degli algoritmi dei *software* impiegati per lo sviluppo della seguente tesi.

Structure from Motion è una tecnica della fotogrammetria digitale che permette la ricostruzione della struttura degli oggetti rilevati (*structure*) e determina in maniera automatica la posizione e gli orientamenti della camera da presa (*motion*).

Queste caratteristiche possono essere determinate simultaneamente usando un insieme di fotogrammi, con elevato grado di sovrapposizione, e procedure iterative dette "*Bundle adjustment*", basate su un database di *features* (punti di legame) estratte automaticamente. I punti di legame sono individuati confrontando le immagini e consentono di stimare la posizione iniziale della fotocamera e le coordinate oggetto, affinando le soluzioni algebriche trovate con una minimizzazione non lineare. (Westoby et al. 2012)

La nuvola di punti è generata dapprima nel sistema di coordinate modello e in seguito può essere allineata nel sistema di coordinate oggetto, usando i GCP (*Ground Control Point*) che consentono mediante la rototraslazione spaziale con variazione isotropa di scala di passare da un sistema all'altro. (Westoby et al. 2012)

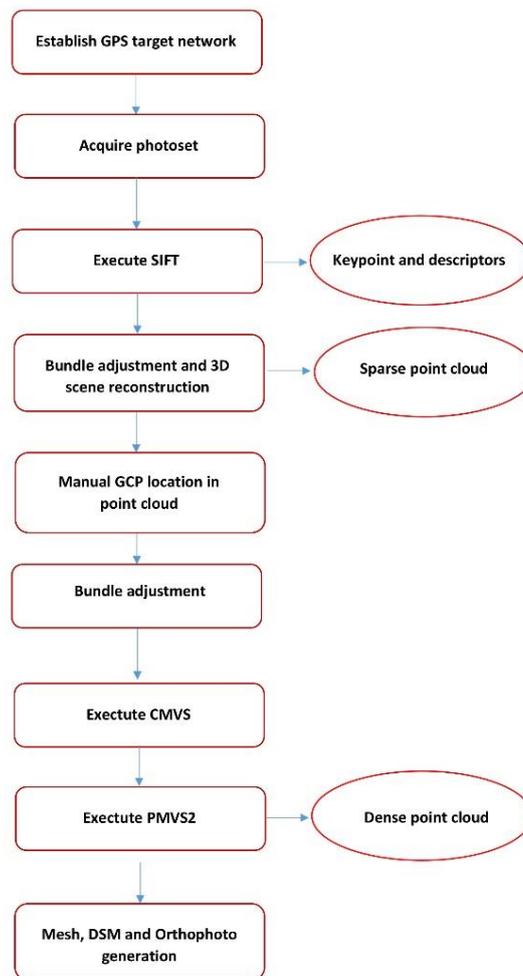


Figura 3.1- Schematizzazione della Structure from Motion dalla fotografie alla nuvola di punti, alla generazione DSM e ortofoto

3.1 Modello della camera

Il principale scopo della SfM è l'estrazione di informazioni della realtà a partire da una coppia di immagini digitali, tale processo è definito anche con il termine stereopsi computazionale. Innanzitutto, è necessario conoscere nel dettaglio il metodo di acquisizione d'immagine prima di poter invertire tale processo per ottenere i dati e le caratteristiche degli oggetti esaminati. Generalmente, un apparato fotografico acquisisce la luce riflessa dagli oggetti della scena e genera un'immagine bidimensionale. (A. Fusiello, 2017)

3.1.1 Geometria della formazione dell'immagine

Il modello geometrico della fotocamera più semplice è la “*fotocamera stenopeica o pinhole camera*” (FIGURA 3.2). Una macchina con foro stenopeico è costituita da una camera oscura e resistente alla luce, con del materiale fotosensibile da un lato e dalla parte opposta da un piccolo foro (foro *stenopeico*). La fotocamera utilizza questo foro che è in grado di proiettare la luce, come un obiettivo, creando un'immagine sul materiale fotosensibile invertita e la cui nitidezza è proporzionale alle dimensioni del foro. Questo procedimento fotografico utilizza lo stesso principio della camera oscura per la riproduzione di immagini.

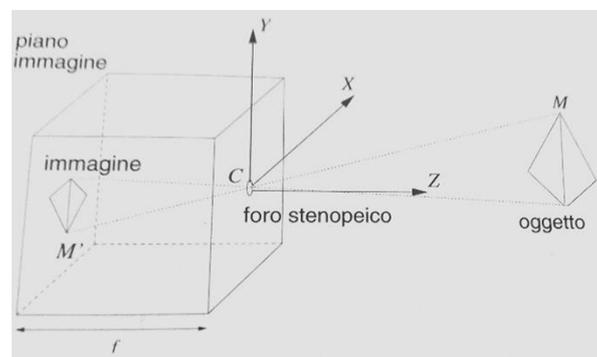


Figura 3.2- Fotocamera stenopeica- A. Fusiello, 2017

Considerando il punto M dell'oggetto di coordinate (X, Y, Z) e il corrispondente punto immagine M' di coordinate (x', Y', Z') , definito come la proiezione del punto oggetto sul quadro dell'immagine distante c (lunghezza focale) dal foro C (punto di vista o centro di proiezione), è possibile scrivere, sfruttando la similitudine dei triangoli, le seguenti formule:

$$\frac{X'}{c} = \frac{X}{Z}; \quad \frac{Y'}{c} = \frac{Y}{Z} \quad [3.1]$$

Da cui si ottengono le equazioni definite “proiezione prospettiche” che spiegano il processo di formazione dell'immagine:

$$X' = \frac{-c \cdot X}{Z}; \quad Y' = \frac{-c \cdot Y}{Z}; \quad Z' = -c \quad [3.2]$$

L'immagine risulta invertita rispetto alla scena, come indicato dal segno negativo; mentre la presenza al denominatore di Z implica che la dimensione dell'immagine varia in funzione della distanza di questo dall'osservatore. (A. Fusiello, 2017)

Le fotocamere o le telecamere sono costituite da diverse lenti di dimensioni maggiori del foro, in grado di raccogliere una quantità di luce maggiore. Per semplicità si approssima

l'ottica del sistema di acquisizione alla lente sottile, dove i raggi paralleli all'asse ottico che passano per il centro della lente sono inalterati, mentre quelli incidenti sulla lente sono rifratti in modo da passare per il punto F (fuoco) dell'asse ottico. La distanza presente tra il punto F e il centro C è definita lunghezza focale della lente (D) e dipende sia dal tipo di lente sia dall'indice di rifrazione del materiale costituente. L'immagine di un punto della scena viene prodotta a una distanza Z' , ed è ottenuta considerando i due raggi particolari sopra citati, che partono dal punto oggetto M (FIGURA 3.3).

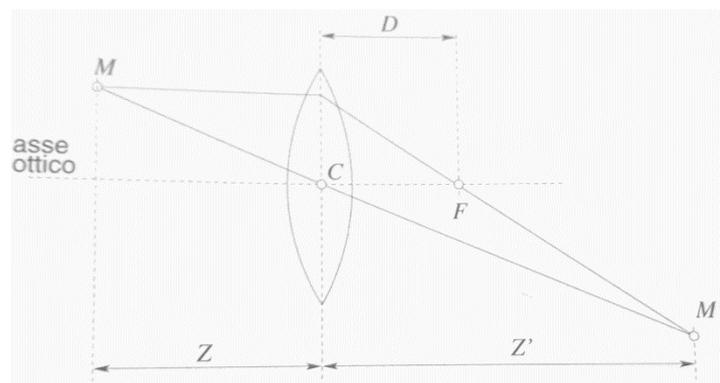


Figura 3.3- Costruzione del punto immagine di un generico punto M - A. Fusiello, 2017

Considerando la similitudine dei triangoli, si può determinare l'equazione [3.3] della lente sottile o formula dei punti coniugati, che evidenzia come un punto della scena viene riprodotto "a fuoco" a distanza Z' dal centro della lente, che è in funzione della profondità Z del punto e della lunghezza focale D . Esiste un intervallo di profondità definito profondità di campo costituito da punti, che soddisfano l'equazione [3.3] e dunque sono riprodotti a fuoco.

$$\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z'} = \frac{1}{D} \quad [3.3]$$

3.1.2 Modello stenopeico della fotocamera

Il modello geometrico di una fotocamera è quello *stenopeico* (FIGURA 3.4), dove C è il centro di proiezione, R è il quadro o piano immagine, che dista c (lunghezza focale) dal piano focale F . La retta passante per C , perpendicolare a R è definita asse ottico e interseca il quadro R nel punto principale o punto centrico. Definiamo, inoltre, due sistemi di riferimento per esprimere le coordinate del punto dello spazio 3D e le coordinate del punto proiettato sul piano immagine. Il primo (X, Y, Z) definito sistema di riferimento standard della fotocamera centrato in C e avente asse Z coincidente con l'asse ottico, per lo spazio

tridimensionale. Il secondo, invece, definito sistema di riferimento (u, v) è centrato nel punto principale con assi orientati come X e Y, per il piano immagine.

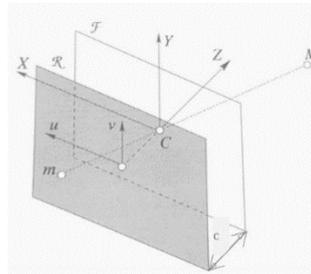


Figura 3.4- Modello geometrico della camera- A. Fusiello, 2017

Considerando la similitudine dei triangoli (FIGURA 3.5) che si generano a partire dal punto dello spazio tridimensionale M di coordinate $[X, Y, Z]^T$ e dalla sua proiezione sul quadro m di coordinate $[u, v]^T$, si può scrivere l'equazione seguente:

$$\frac{c}{Z} = \frac{-u}{X} = \frac{-v}{Y} \quad [3.4]$$

E' possibile riscrivere l'espressione [3.4] in funzione delle coordinate cartesiane del sistema spazio:

$$u = \frac{-c}{Z} \cdot X \quad [3.5]$$

$$v = \frac{-c}{Z} \cdot Y \quad [3.6]$$

Le formule sopra citate permettono di passare dalle coordinate 3D a quelle bidimensionali, ma tale trasformazione non è lineare. Per tale motivo si preferisce utilizzare le coordinate omogenee [3.7] per ottenere una trasformazione lineare [3.8].

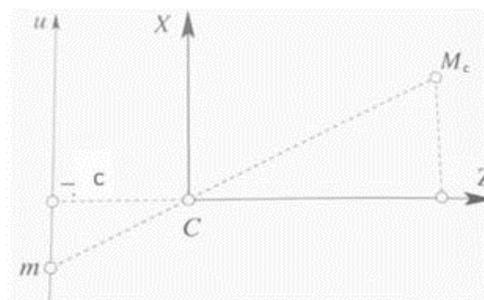


Figura 3.5- Vista in pianta del modello della camera fotografica- A. Fusiello, 2017

$$M_c = [X, Y, Z, 1]^T \quad m = [u, v, 1]^T \quad [3.7]$$

$$Z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} -cX/Z \\ -cY/Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -cX \\ -cY \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}; mZ = P \cdot M_c \Rightarrow \quad [3.8]$$

$$m = \frac{1}{Z} \cdot P \cdot M_c$$

La matrice P è definita matrice della fotocamera o matrice di proiezione prospettica (MPP), in quanto rappresenta il modello geometrico della fotocamera.

Le considerazioni effettuate finora sono valide nel caso in cui il sistema di riferimento standard della telecamera e il sistema di riferimento mondo coincidano, in caso contrario (FIGURA 3.6) è necessario tener conto della trasformazione rigida tra i due sistemi sopra elencati. Inoltre, in un modello realistico che permette il cambio di coordinate da tridimensionali a *pixel* bisogna considerare la pixelizzazione, cioè il passaggio di coordinate da metri nel piano del sensore a *pixel* nell'immagine.

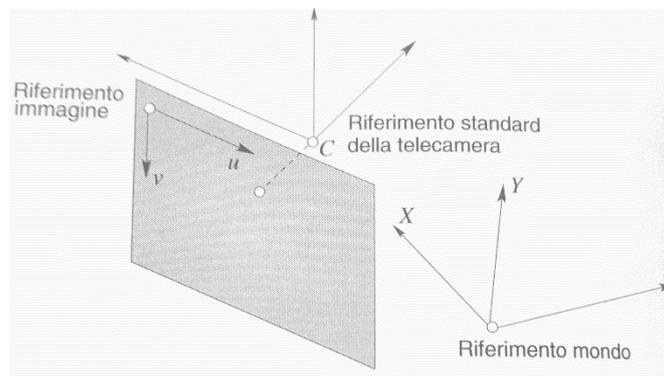


Figura 3.6- Sistemi di riferimento- A. Fusiello, 2017

La pixelizzazione è effettuata mediante una trasformazione affine che considera la traslazione dell'origine in alto a sinistra, la riscalatura dovuta al cambio dell'unità di misura e infine il cambio di direzione degli assi.

Considerando i seguenti parametri è possibile scrivere la matrice V [3.9]:

- (u_0, v_0) coordinate in *pixel* del punto principale;
- K_u (k_v) è l'inverso della dimensione efficace del *pixel* [*pixel* m^{-1}].

$$V = \begin{bmatrix} -k_u & 0 & u_0 \\ 0 & -k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [3.9]$$

A questo punto si utilizza la matrice V per trasformare le coordinate in *pixel* e per tale motivo si moltiplica a sinistra la matrice P ottenendo così la matrice K dei **parametri interni** [3.11] che sono dunque α_u, α_v (lunghezza focale in *pixel* orizzontale e verticale) u_0, v_0 (coordinate punto principale).

$$P = \begin{bmatrix} -k_u & 0 & u_0 \\ 0 & -k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = K \cdot [I/O] \quad [3.10]$$

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [I/O] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad [3.11]$$

Per considerare invece la differenza tra i due sistemi di riferimento, come accennato precedentemente, è necessario una trasformazione rigida. (FIGURA 3.7)

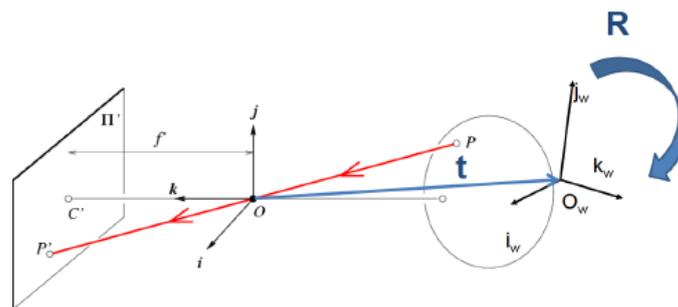


Figura 3.7- Camera nello spazio-Dispense SIFET 2017 Lingua

Gli elementi, che consentono il passaggio dalle coordinate omogenee (M_c) del sistema fotocamera a quelle calcolate rispetto al sistema mondo (M), sono la matrice di rotazione R e la traslazione t , seguendo la formula:

$$M_c = G \cdot M \quad [3.12]$$

$$G = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [3.13]$$

La matrice G , equazione [3.13], che contiene al suo interno la matrice di rotazione e la traslazione, codifica la posa, ovvero la posizione e l'orientamento della camera da presa rispetto al riferimento mondo. Questa matrice può essere scritta in funzione di sei **parametri esterni**, tre di rotazione e tre di traslazione.

Di conseguenza sostituendo all'equazione [3.8] M_c si ottiene:

$$m = \frac{1}{Z} PM_c = \frac{1}{Z} \cdot K \cdot [I/O] \cdot G \cdot M \quad [3.14]$$

Confrontando quest'ultima formula con l'equazione [3.8] è possibile notare come la matrice P è in funzione dei parametri sia interni sia esterni e assume il valore:

$$P = K \cdot [I/O] \cdot G = K [R/t] \quad [3.15]$$

$$t = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} r_1^T \\ r_2^T \\ r_3^T \end{bmatrix} \quad [3.16]$$

Si può osservare dall'equazione [3.6] come P sia definita a meno di un fattore di scala arbitrario, infatti il rapporto $1/Z$ fa sì che se si sostituisce tale matrice con un suo multiplo si ottiene sempre la medesima proiezione.

Possiamo quindi scrivere la matrice P in forma cartesiana secondo le sue righe:

$$P = \begin{bmatrix} P_1^T \\ P_2^T \\ P_3^T \end{bmatrix} \quad [3.17]$$

Riscriviamo alla luce di questa nuova equazione la [3.8] per ottenere così le equazioni di collinearità [3.19]:

$$m = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} P_1^T \\ P_2^T \\ P_3^T \end{bmatrix} M \quad [3.18]$$

$$\begin{cases} u = \frac{P_1^T \cdot M}{P_3^T \cdot M} \\ v = \frac{P_2^T \cdot M}{P_3^T \cdot M} \end{cases} \quad [3.19]$$

A questo punto, dopo aver determinato i parametri interni, esterni e le equazioni di collinearità, si può procedere con la definizione del raggio ottico del generico punto del piano immagine m, ovvero della retta passante per m e per il punto di vista C.

Per determinare il punto di vista C, è necessario considerare sia l'equazione [3.18] sia i piani che contengono tale punto, ovvero i piani di equazione $P_1^T \cdot M=0$ e $P_2^T \cdot M=0$ che si proiettano nell'immagine sugli assi $u=0$ e $v=0$, e il piano $P_3^T \cdot M=0$ che invece contiene punti che si proiettano all'infinito. Di conseguenza il punto è definito dall'intersezione di questi:

$$\begin{cases} P_1^T \cdot C = 0 \\ P_2^T \cdot C = 0 \\ P_3^T \cdot C = 0 \end{cases} \quad [3.19]$$

Il centro ottico o punto di vista ha coordinate [3.20]

$$\begin{bmatrix} -Q^{-1} \cdot m \\ 1 \end{bmatrix} \quad [3.20]$$

Con Q una sottomatrice 3x3 di P tale per cui $P=[Q/q]$. Per scrivere l'equazione della retta si considera un ulteriore punto ideale di coordinate [3.21]:

$$\begin{bmatrix} -Q^{-1} \cdot m \\ 0 \end{bmatrix} \quad [3.21]$$

L'equazione parametrica della retta del raggio ottico di m è:

$$M = C + \lambda \cdot \begin{bmatrix} -Q^{-1} \cdot m \\ 0 \end{bmatrix} \quad \lambda \in R \cup \{\infty\} \quad [3.22]$$

L'equazione appena calcolata sarà utilizzata per determinare la retta epipolare, PARAGRAFO 3.3.

3.2 Calibrazione della fotocamera

Negli ultimi anni si sono diffuse tecniche di rilevamento a basso costo che abbinano alla strumentazione topografica classica le fotocamere amatoriali. In questa tipologia di camera non sono noti né i parametri interni né quelli esterni. Per tale motivo, è necessario misurarli con precisione e accuratezza mediante la calibrazione in modo da poter poi effettuare un progetto fotogrammetrico. Infatti, il modo in cui i punti dello spazio si proiettano sul piano immagine dipende da questi parametri. Dunque in *computer vision* il processo di calibrazione assume un significato differente rispetto alla fotogrammetria tradizionale, in cui si calcolano i parametri di orientamento interno e le distorsioni causate dall'obiettivo. Ci sono differenti metodi di calibrazione che calcolano i parametri incogniti a partire da punti tridimensionali di coordinate note.

Il metodo di calibrazione DLT, *Direct Linear Transform*, considera n punti di coordinate note per costruzione non coplanari, in FIGURA 3.8, che corrispondono agli angoli dei quadrati della scacchiera, e il sistema di riferimento posizionato in modo concorde con l'oggetto. Le

coordinate immagini di tali punti, invece, si calcolano con i metodi classici della elaborazione di immagini.

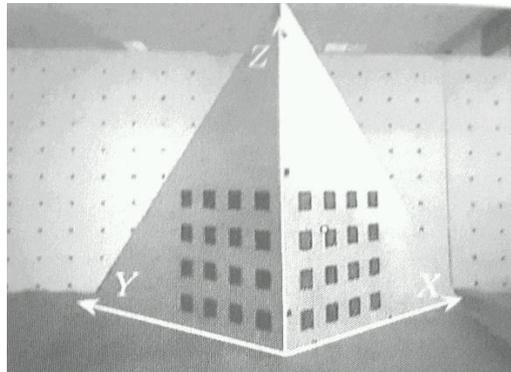


Figura 3.8- Oggetto di calibrazione con sistema di riferimento mondo concorde- A. Fusiello, 2017

Per ciascun punto di calibrazione si può definire attraverso le equazioni di collinearità [3.18] una corrispondenza, equazioni [3.23], tra il punto immagine $m_i = [u_i, v_i, 1]^T$ e il corrispettivo punto dello spazio M_i .

$$\begin{cases} P_1^T \cdot M_i - u_i P_3^T \cdot M_i = 0 \\ P_2^T \cdot M_i - v_i P_3^T \cdot M_i = 0 \end{cases} \quad [3.23]$$

Quindi per n punti si possono scrivere $2n$ equazioni lineari omogenee in 12 incognite. Per risolvere tale sistema sono necessari, in teoria almeno 6 punti di coordinate note, in pratica sono utilizzati molti più punti per ridurre l'influenza degli errori accidentali.

Durante il processo di calibrazione bisogna considerare le distorsioni radiali, FIGURA 3.9, e tangenziali, Figura 3.10, provocate dalle lenti. Per tale motivo, è necessario definire una trasformazione [3.24] per passare dalle coordinate ideali (u,v) a quelle reali distorte osservabili (u',v') .

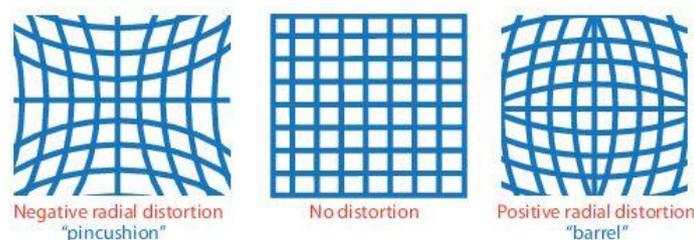


Figura 3.9- Distorsione radiali

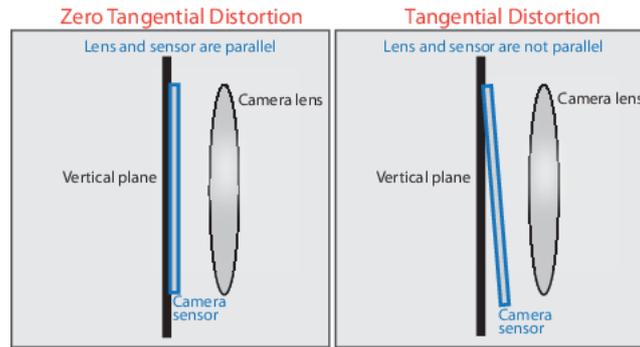


Figura 3.10- Distorsione tangenziale

$$\begin{cases} u' = (1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) \cdot u + 2p_1 \cdot u \cdot v + p_2 (r_d^2 + 2u^2) \\ v' = (1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) \cdot v + 2p_2 \cdot u \cdot v + p_1 (r_d^2 + 2v^2) \end{cases} \quad [3.24]$$

con u_0, v_0 e $r_d^2 = \left(\frac{u-u_0}{\alpha_u}\right)^2 + \left(\frac{v-v_0}{\alpha_v}\right)^2$ coordinate del punto principale, k_1 , k_2 e k_3 distorsioni radiali e p_1 e p_2 distorsioni tangenziali.

Dalla equazione 3.24 si può osservare come la distorsione k_1 ha un'influenza maggiore rispetto alle altre poiché moltiplicata per r_d^2 , superiore di due o tre ordini di grandezza.

3.3 Stereopsi: Triangolazione

Con il termine stereopsi computazionale si definisce il processo con il quale è possibile estrarre informazioni della realtà rilevata da una coppia di immagini. Dopo aver individuato su ciascuna immagine i punti coniugati, ovvero un punto presente in entrambe le fotografie, nota la posizione reciproca delle fotocamere e i parametri interni si può determinare la posizione spaziale dei punti proiettati sulle due immagini, mediante la tecnica di triangolazione.

Consideriamo la triangolazione nel caso generale (FIGURA 3.11), in cui sono note le coordinate in *pixel* di due punti coniugati m e m' , le matrici di proiezione prospettica P di entrambe le fotocamere.

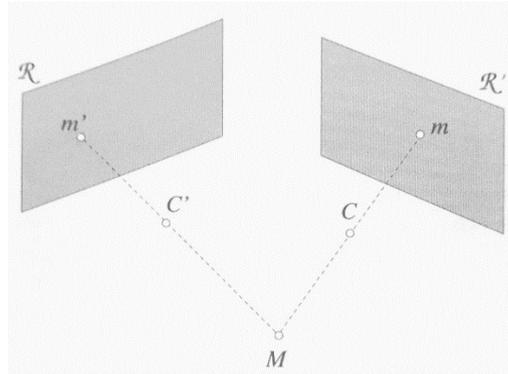


Figura 3.11- Determinazione punto tridimensionale mediante la triangolazione- A. Fusiello, 2017

Per ogni punto, m di coordinate $[u, v, 1]^T$ e m' $[u', v', 1]^T$, si scrivono le due equazioni di collinearità [3.18], ottenendo così un sistema [3.26] lineare omogeneo di 4 equazioni in quattro incognite.

$$\begin{bmatrix} (p_1 - up_3)^T \\ (p_2 - vp_3)^T \\ (p'_1 - u'p'_3)^T \\ (p'_2 - v'p'_3)^T \end{bmatrix} M = 0_{4 \times 1} \quad [3.26]$$

Per ottenere una stima migliore considerando la precisione e accuratezza, è necessario minimizzare il residuo geometrico dato dalla sommatoria dei quadrati degli errori in *pixel* nel piano immagine della j -esima fotocamera.

Il punto m' , coniugato di m , deve giacere su una retta denominata retta epipolare di m . La retta CC' è denominata linea di base o baseline. (FIGURA 3.12)

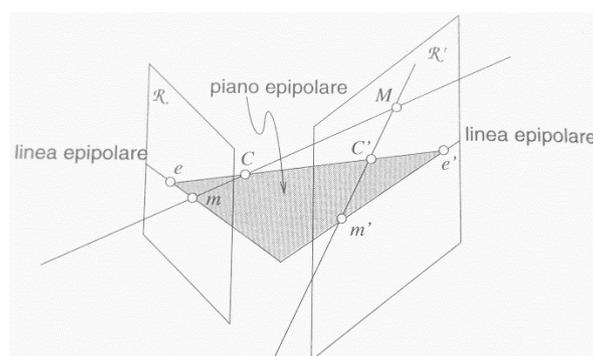


Figura 3.12- Geometria epipolare- A. Fusiello, 2017

A questo punto si definisce il sistema di riferimento assoluto e le matrici $P=[Q/q]$ e $P'=[Q'/q']$.

$$\begin{cases} m \approx PM \\ m' \approx P'M \end{cases} \quad [3.27]$$

La retta epipolare (FIGURA 3.13) corrispondente a m è la proiezione secondo P' del raggio ottico di m che ha equazione [3.22].

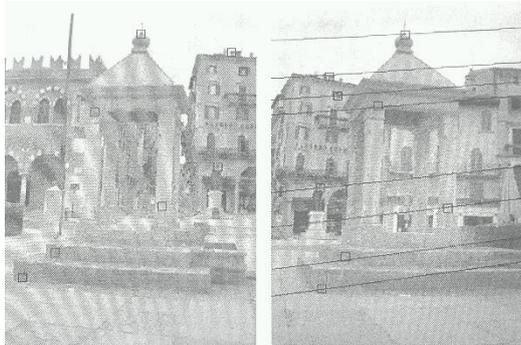


Figura 3.13- Coppia di immagine stereo, a sinistra sono evidenziati i punti mentre a destra sono tracciate le rette epipolari corrispondenti a tali punti- A. Fusiello, 2017

Sostituendo le matrici P' e le coordinate del punto di proiezione all'infinito si può ottenere l'equazione della retta in coordinate omogenee passante per l'epipolo e' e per il punto sostituito:

$$m' \approx \lambda Q' Q^{-1} m + e' \quad [3.28]$$

Moltiplichiamo entrambi i membri dell'equazione [3.28] per la matrice $[e']_x$ antisimmetrica e per m'^T ottenendo:

$$m'^T [e']_x m' \approx m'^T \lambda [e']_x Q' Q^{-1} m \quad [3.29]$$

Il termine di sinistra è nullo in quanto vi è una forma quadratica moltiplicata per una matrice antisimmetrica. L'equazione che si ottiene è denominata *Longuet-Higgins* ed è una forma bilineare in m ed m' . La matrice che contiene i coefficienti della forma bilineare e le informazioni della geometria epipolare, ovvero $[e']_x Q' Q^{-1}$, è denominata fondamentale F .

Una configurazione favorevole per il calcolo della corrispondenza è caratterizzata da piani immagine paralleli alla linea di base e da epipoli collocati all'infinito. In questa condizione i punti corrispondenti giacciono sulla stessa riga dell'immagine e possiedono la stessa coordinata verticale. Ogni coppia di fotogrammi può essere ricondotta a tale situazione mediante il processo di rettificazione epipolare. (FIGURA 3.14)

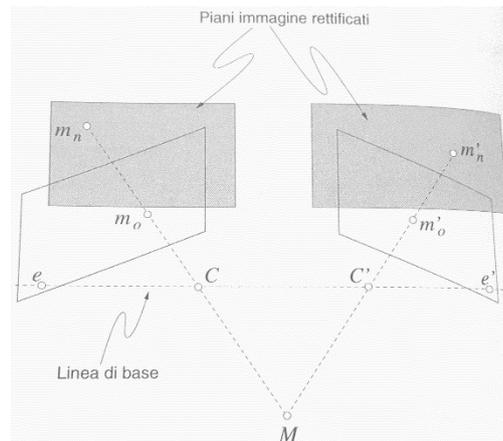


Figura 3.14- Rettificazione delle immagini, i piani immagine risultano paralleli alla linea di base- A. Fusiello, 2017

Per ottenere i nuovi piani immagine rettificati, come mostrati nella figura sovrastante, si impostano alle due fotocamere gli stessi parametri interni definendo così due differenti rotazioni, mentre i punti di vista rimangono gli stessi. La trasformazione applicata all'immagine è l'omografia. Si può semplificare il discorso pensando a una fotocamera che si sposta lungo l'asse X del sistema di riferimento.

Utilizzando il vincolo della geometria epipolare si riduce notevolmente lo spazio di ricerca della corrispondenza dei punti coniugati e infatti si passa da uno spazio bidimensionale a uno unidimensionale. (A. Fusiello, 2017)

3.4 Posa della fotocamera

A questo punto si può procedere con la definizione della posizione spaziale della camera fotografica. Questo problema si risolve in due fasi denominate posa relativa e posa esterna assoluta, ovvero si determina la posizione e orientamento di una fotocamera in un primo momento rispetto all'altra, successivamente rispetto al riferimento mondo.

3.4.1 Posa relativa

Il problema della posa relativa in fotogrammetria è anche chiamato orientamento relativo. In questo caso si vuole determinare il moto rigido di un'unica fotocamera, con parametri interni noti, in movimento. Una tecnica di soluzione può essere quella proposta da *Longuet-Higgins* che si basa sulla matrice essenziale che racchiude informazioni relative alla geometria epipolare (descritta nel PARAGRAFO 3.3) di due immagini prospettiche con parametri interni noti. La matrice essenziale si può calcolare considerando punti corrispondenti tra le due immagini, in coordinate normalizzate, prese dalla fotocamera in

due istanti di tempo differenti e sostituendo le matrici P relative ai due momenti temporali nell'equazione [3.29]:

$$p'^T [t]_x R p = 0 \quad [3.30]$$

La matrice essenziale:

$$E = [t]_x R \quad [3.31]$$

La matrice è omogenea rispetto al tempo e dipende per la traslazione da due parametri, mentre per la rotazione da tre. L'omogeneità rispetto a t si riflette sull'impossibilità di ricavare la scala assoluta dell'oggetto rilevato e infatti è impossibile determinare se il moto della fotocamera è relativo a un oggetto vicino con camera che si muove lentamente o di un oggetto lontano con camera che si muove più velocemente. Per determinare la scala è necessario conoscere la distanza tra due punti.

La matrice E 3×3 può essere fattorizzata in rotazione e traslazione e si può calcolare considerando un insieme di corrispondenze di punti che generano equazioni lineari in nove incognite. (A. Fusiello, 2017)

3.4.2 Posa esterna

Una volta calcolata la posa relativa si può procedere con la triangolazione e successivamente con la posa esterna che come accennato precedentemente consente la trasformazione tra il sistema di riferimento della fotocamera ed il sistema di riferimento nel quale sono espressi i punti d'appoggio.

Per risolvere la posa esterna esistono diversi metodi; quello esposto di seguito è proposto da Fiore nel 2001, il quale riconduce il problema a quello della posa assoluta costruendo una matrice di rotazione. Infatti se consideriamo i punti oggetto $M_1 \dots M_n$ espressi nel sistema di riferimento tridimensionale e i corrispettivi punti proiettati sulle immagini $m_1 \dots m_n$ si può determinare la seguente relazione:

$$p_i \cong [R/t] M_i \quad [3.32]$$

La matrice R che si ottiene considerando almeno sei punti non è necessariamente di rotazione a causa del rumore presente nei dati e per tale motivo deve essere forzata a posteriori.

L'equazione [3.32] può essere riscritta nella seguente formula esplicitando il fattore di scala ζ per poi ricondurci alla posa assoluta:

$$\zeta_i K^{-1} m_i = [R/t] M_i = R M_i + t \quad [3.33]$$

Supponiamo di avere un insieme di punti tridimensionali espressi in due sistemi di riferimento X e Y. Mediante la posa assoluta si vuole determinare la trasformazione rigida da applicare a Y in modo da farlo coincidere con X o al massimo se vi è rumore nei dati la distanza tra i due sistemi deve essere la minima possibile.

Quindi considerando una relazione generale:

$$X_i = s(RY_i + t) \quad [3.34]$$

L'obiettivo della registrazione è risolvere la seguente equazione (A. Fusiello, 2017):

$$\min_{R,t} \sum_{i=1}^n \|X_i - s(RY_i + t)\|^2 \quad [3.35]$$

3.5 Dense Image Matching

Terminata la fase del *Bundle adjustment* si ottiene una nuvola sparsa di punti costituita dalle *features*, che sono posizionate rispetto alle prese fotografiche e che contengono i corrispondenti dati cromatici. Queste informazioni vengono utilizzate da algoritmi di *dense image matching* per la ricostruzione densa della scena tridimensionale. Il *matching* è più difficile quando vi è una bassa o ripetitiva *texture* e differente illuminazione.

I principali metodi di “*stereo matching*” eseguono quattro fasi (H. Hirschmuller, 2007):

- *matching cost computation*;
- *cost aggregation*;
- *disparity computation and optimization*;
- *disparity refinement*.

Generalmente gli algoritmi locali basano il *matching* sulla correlazione fra matrici di due immagini, mentre gli algoritmi globali definiscono al posto del *cost aggregation* una funzione “*global energy function*” che include i vincoli di “*pixelwise cost e smoothness*”,

con la quale si può stimare la disparità binoculare dell'immagine, ovvero la differenza vettoriale tra due punti coniugati (due punti in due immagini differenti che sono proiezione dello stesso punto).

Il SGM (*Semi Global Matching*) è uno tra gli algoritmi, presenti attualmente, migliori se si considera la precisione ed è un metodo che si basa sull'idea del "pixelwise matching" del Mutual Information.

Cost aggregation

Il *cost calculation* può risultare a causa del rumore presente nell'immagine inferiore rispetto a quello corretto e per tale motivo si aggiungono vincoli che favoriscono la regolarità penalizzando i cambi di disparità vicine. Il *pixelwise cost* e il vincolo di regolarità sono espressi nella funzione "global energy function $E(D)$ " che dipende dalla disparità D dell'immagine ed ha la seguente equazione:

$$E(D) = \sum_p (C(p, D_p)) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \quad [3.36]$$

Il primo termine è la somma di tutti i *cost matching pixel* per la disparità D , il secondo è una costante ed è la penalità P_1 per tutti i *pixel* q nella zona N_p di p per cui la disparità cambia in maniera lieve, infine il terzo termine rappresenta una costante maggiore che corrisponde alla penalità causata da cambi di disparità maggiori.

Il calcolo della disparità si effettua minimizzando la funzione $E(D)$. Il problema che sussiste a questo punto è che i vincoli molto forti lungo una direzione sono combinati con nessun vincolo nell'altra direzione. Per tale motivo è necessario introdurre una nuova idea di aggregazione, in cui si definisce il *cost* $S(p,d)$ come la somma dei costi di tutte i percorsi che terminano nel *pixel* p (FIGURA 3.15)

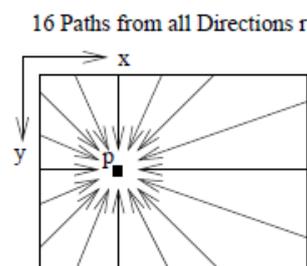


Figura 3.15- Aggregazione dei costi-H. Hirschmuller, 2007

Il cost $L'_r(p,d)$ lungo un percorso in direzione r del *pixel* p è definito dalla seguente equazione:

$$L'_r(p, d) = C(p, d) + \min(L'_r(p - r, d), L'_r(p - r, d - 1) + P_1, \quad [3.37] \\ L'_r(p - r, d + 1) + P_1, \min_i L'_r(p - r, i) + P_2)$$

Il costo di corrispondenza può essere C_{BT} o C_{MI} . Il resto dell'equazione aggiunge il costo più basso del precedente percorso *Pixel* $p - r$, comprendendo la penalità per le discontinuità.

Il valore di L'_r aumenta costantemente lungo il percorso e per tale motivo tale valore può essere corretto sottraendo il costo del percorso minimo ottenendo così la seguente espressione:

$$L'_r(p, d) = C(p, d) + \min(L'_r(p - r, d), L'_r(p - r, d - 1) + P_1, \quad [3.38] \\ L'_r(p - r, d + 1) + P_1, \min_i L'_r(p - r, i) + P_2) \\ - \min_k L'_r(p - r, k)$$

Il numero minimo di percorsi è 8, ma per avere una buona copertura dell'immagine bidimensionale sono necessari 16 percorsi. (H. Hirschmuller, 2007)

3.6 Sistemi di Structure from Motion workflow

Negli ultimi anni si sono sviluppati *software* commerciali e non (*open source*) che combinando la strategia della SfM e gli algoritmi di *dense matching* consentono la ricostruzione tridimensionale della scena senza le informazioni relative all'orientamento né interno né esterno. Questo approccio innovativo si concentra principalmente sull'estrazione di punti definiti punti di legame o di interesse (*keypoints*) su ciascuna immagine.

I sistemi basati sulla *structure from motion* operano secondo una serie di fasi schematizzate in FIGURA 3.1. Partendo dalle prese fotografiche, si passa alla fase più importante del flusso di lavoro di questi programmi che influenza tutte le altre successive, ovvero all'individuazione delle *features* in ogni singola foto e alla loro registrazione in un *database*. Il riconoscimento dei punti di interesse si effettua considerando non solo un punto dell'immagine, ma anche l'area ad essi circostante. Il disturbo indotto dal sensore o parti

dell'immagine fuori fuoco sono tutti elementi che pregiudicano la buona riuscita dell'individuazione, e perciò devono essere eliminati usando filtri di convoluzione.

La fase successiva è il *matching* fra le immagini, che vengono accoppiate utilizzando le *features* in comune. I dati relativi al *matching* sono elaborati da un *software* di *bundle adjustment* che determina i parametri di orientamento esterno ed interno delle camere e mediante autocalibrazione determina i parametri relativi alle distorsioni radiali degli apparecchi fotografici (k_1 e k_2) e le posizioni relative delle *features*. Terminata questa fase si può già osservare un modello discreto costituito da una nuvola di punti "sparsa" spazialmente relazionata alle posizioni e agli orientamenti delle fotocamere. Queste sono *features* che oltre alle coordinate spaziali, possiedono dati cromatici derivati dalle immagini utilizzate.

Le fasi finora descritte fanno parte delle *Structure from Motion*, ma i *software* adoperati per questa tesi utilizzano gli algoritmi *dense image matching*, ovvero attraverso la comparazione a coppie o multipla delle prese fotogrammetriche consentono l'estrazione di una nuvola di punti più densa della precedente. La geometria viene successivamente mappata con la *texture* ottenuta considerando i molteplici fotogrammi.

Si possono generare, infine, una serie di viste prospettiche, renderizzate e ortografiche dell'oggetto rilevato. (Westoby et al. 2012)

3.6.1 Individuazione dei *keypoint*

La prima fase consiste nell'individuazione di punti di interesse o di legame (*keypoint*), ovvero elementi puntuali facilmente riconoscibili nei singoli fotogrammi, che possono essere utilizzati per la corrispondenza (*matching*) delle immagini, anche in presenza di distorsioni, differente scala e orientamento. Dopo aver individuato i punti caratteristici si effettua il *matching* risolvendo così il problema della corrispondenza tra punti delle diverse immagini. (Westoby et al. 2012)

Il numero di *keypoints* in un'immagine dipende soprattutto dalla *texture* e dalla risoluzione dei fotogrammi. La densità, la nitidezza e la risoluzione delle immagini, combinate con la *texture* degli scenari naturali, determinano, in un primo momento, la qualità della nuvola di punti. È perciò difficile specificare il numero minimo di fotogrammi utili per una buona

ricostruzione della scena rilevata. Le *features*, individuate per la corrispondenza, devono essere ben visibili in almeno 3 immagini. Per tale motivo, durante la fase di acquisizione delle foto, si deve porre particolare attenzione al grado di sovrapposizione delle immagini, soprattutto in corrispondenza dell'oggetto da rilevare, in modo da avere una copertura uniforme di *features*.

Un aspetto fondamentale è l'introduzione di tecniche automatiche per l'estrazione delle *features*, per tale motivo si utilizzano gli "operatori d'interesse". (Westoby et al. 2012)

Ci sono due principali approcci per ricercarli:

- Il primo consiste nel trovare *features* in un'immagine che può essere confrontata con le altre usando una tecnica di ricerca locale come ABM (*Area Based Matching*) auto-correlazione o minimi quadrati. Questo approccio è molto affidabile quando le immagini sono scattate in successione.
- Il secondo è quello di individuare in modo indipendente i punti in tutte le immagini e poi analizzare la corrispondenza, basata sul loro aspetto locale (*feature descriptor*). Questo viene impiegato quando i fotogrammi presentano forti variazioni geometriche e radiometriche. (R. Szeliski, 2010)

Gli operatori adottati sono principalmente Harris, Forstner e SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*, Lowe 2004). Il primo si basa sul fatto che i punti di interesse possiedono alto valore del gradiente in maniera isotropica. Il rilevatore parte dalla formulazione delle derivate prime parziali di un'immagine lungo le direzioni orizzontali e verticali. Ciascun elemento, dopo essere trattato singolarmente con un filtro Gaussiano costituisce una nuova matrice della quale si determinano gli autovalori, che contengono informazioni sulla struttura dell'immagine e codificano l'importanza di un *pixel*.

L'operatore di Forstner, invece, pur partendo da presupposti differenti rispetto a quelli di Harris, giunge a un risultato simile. Si serve della matrice di varianza e covarianza del sistema del LSM (*Least Square Matching*), per calcolare la matrice di autocorrelazione utile a determinare la forma e la dimensione dell'ellisse standard di errore. Il calcolo è effettuato per tutti i *pixel* dell'immagine e successivamente vengono classificati i punti di interesse.

L'operatore più efficiente nel determinare *features* su immagini stereoscopiche è quello denominato SIFT. A differenza degli operatori sopra citati che ricercano punti omologhi su spigoli o discontinuità radiometriche, l'operatore SIFT ricerca i *keypoint* su regioni dell'immagine (*region detector*), risolvendo i problemi di deformazioni prospettiche e occlusione. In un primo momento si filtrano le immagini mediante convoluzioni gaussiane, formando così uno spazio delle "scale". Per ognuna di queste sono calcolate le differenze fra gaussiane adiacenti (DoG) e i massimi sono considerati punti di interesse. Per ogni *keypoint* individuato, si definisce un vettore n-dimensionale (128), denominato descrittore, capace di descrivere le caratteristiche radiometriche dell'intorno del punto, indipendentemente da rotazioni, variazioni di scale e cambiamenti di illuminazione. Il *matching* avviene valutando il grado di similarità tra i descrittori e i punti candidati sono definiti punti omologhi se la distanza euclidea tra i due descrittori è minima. Infatti, considerato un punto nella prima immagine avente come descrittore d_1 , il corrispondente punto nell'altro fotogramma è quello che ha il descrittore più vicino a d_1 . Se vi sono un elevato numero di immagini acquisite, il corrispondente punto omologo può trovarsi in molteplici fotogrammi e di conseguenza ciascuna immagine è abbinata ai più vicini.

Nell'operazione di *matching* proposta da Lowe possono esserci dei problemi legati a possibili accoppiamenti di punti omologhi errati "*outlier*" a causa della non robustezza del metodo. Per tale motivo, prima di procedere alla fase di *bundle block adjustment*, si aggiungono altre ipotesi come l'appartenenza dei punti alla rette epipolare e inoltre si deve ricorrere a tecniche di stime robuste, come LMS (*Least Median Square*) per il calcolo dell'orientamento relativo tra coppie di immagini omologhe (A. Lingua et al. 2008)

Presso il Politecnico di Torino si è condotto un'analisi del rendimento della tecnica SIFT, applicato al caso di fotogrammetria aerea e *close-range*. Si è potuto constatare come aree caratterizzate da una copertura del territorio omogenea, pregiudicassero la stabilità della procedura. Infatti, nelle ricerche sull'algoritmo SIFT si sono affrontate le condizioni geometriche e di illuminazione delle immagini, non la distribuzione della *texture*. Questo aspetto, ovvero la soglia di contrasto, influenza la *performance* del rilevatore SIFT, specialmente nelle applicazioni aeree di aree non urbane. Per tale motivo, sono state apportate alcune modifiche all'algoritmo SIFT, che consentono di determinare in modo

automatico un parametro soglia per la regione attorno al punto estratto, considerando la texturizzazione locale. Ogni *feature* è caratterizzato da un valore di soglia differente, in accordo con il contenuto radiometrico dei punti vicini. Questo nuovo algoritmo è denominando A² SIFT (*Auto Adaptive SIFT*). (A. Lingua et al. 2009)

Il SIFT presenta un descrittore di grandi dimensioni e ciò rallenta notevolmente la fase di *matching*. Per questo si sono sviluppati altri algoritmi come PCA (*Principal Components Analysis*) e SURF (*Speeded Up Robust Feature*).

L'algoritmo PCA proposto da Ke e Sukthankar (2004) è una tecnica standard per la riduzione di dimensione, ed è adatto a rappresentare *keypoint*. Il vettore, utilizzato da PCA-SIFT, è notevolmente più piccolo rispetto a quello di SIFT, mentre l'algoritmo utilizzato per il *matching* è il medesimo. Infatti, anche PCA-SIFT utilizza la distanza euclidea per determinare i punti omologhi fra le due immagini. L'algoritmo SURF, invece, sfrutta il concetto di immagine integrale e impiega la computazione con filtro di tipo *box*, che può essere approssimato a matrice con derivate parziali gaussiane di secondo ordine. (L. Juan e O. Gwun 2009)

3.6.2 Validazione delle corrispondenze

Una volta estratti i punti salienti nelle diverse immagini si possono accoppiare considerando la posizione o la similarità. La prima procedura da effettuare è il calcolo della relazione geometrica tra immagini accoppiate mediante la matrice essenziale a partire da un insieme di punti. Si sono sviluppate tecniche statistiche di regressione robusta che consentono di ottenere risultati attendibili anche in presenza di *outliers* o errori causati da rumore. (A. Fusiello, 2017)

I *keypoints* nelle immagini multiple sono accoppiati usando algoritmi come *nearest neighbour* (Arya et al,2008) e RANSAC (Random Sample Consensus, Frischler and Bolles, 1987) e i "tracciati" usati per la ricostruzione 3D includono almeno due *keypoints* e tre immagini. Tutti quelli che non presentano questi criteri sono automaticamente scartati e per tale motivo le caratteristiche che transitano quali ad esempio persone che si muovono nell'area di rilievo sono automaticamente rimosse dal set di dati prima della ricostruzione 3D.

3.6.3 Stima dei parametri della camera

Dopo aver individuato *keypoint*, determinato il *descriptor* e realizzato il *matching* si adopera il sistema *Bundle adjustment* per stimare correttamente la posizione della camera, applicato per evitare l'accumulo di errori ad ogni iterazione e migliorare la generazione della nuvola di punti "sparsa". Le corrispondenze fra i *keypoints* individuano i vincoli per l'orientamento e la posizione della fotocamera.

Bundle adjustment è il problema di affinare una ricostruzione visiva per generare congiuntamente una struttura 3D e stimare i parametri (posizione e orientamento della camera). Il nome si riferisce a "*bundles*", cioè al fascio di luce che attraversa ogni *feature* 3D e converge nel centro della camera. Questi sono ottimamente "*adjusted*" nel rispetto sia delle *features* che della posizione della camera. (B.Triggs 2000).

Dal punto di vista applicativo è di fondamentale importanza la scelta dei due fotogrammi da cui far iniziare il processo di ricostruzione incrementale. I requisiti da rispettare sono principalmente due:

- elevato numero di punti accoppiati;
- sufficiente distanza tra le due fotocamere per ottenere una buona triangolazione.

Dunque, si considerano inizialmente due immagini con matrici MPP P_1 e P_2 , il sistema di riferimento mondo coincidente con il punto di vista della prima fotocamera, mentre la seconda è scelta in modo da rispettare la geometria epipolare. Rispettate queste condizioni si può procedere con la triangolazione per determinare i punti tridimensionali a partire dai punti accoppiati. Successivamente se le immagini acquisite sono maggiori si aggiunge un'ulteriore immagine che presenta la massima sovrapposizione con i fotogrammi precedenti. A questo punto è possibile stimare la posa di questa fotocamera rispetto alla ricostruzione esistente. Infatti, si ri-effettua la triangolazione dei punti tridimensionali determinati precedentemente, affinando così la loro posizione, e sono triangolati nuovi punti relativi alle corrispondenze disponibili con l'aggiunta dell'immagine. Il ciclo termina quando tutte le immagini sono state considerate per la ricostruzione tridimensionale.

Poiché il numero delle immagini acquisite nella maggior parte dei casi è elevato, il metodo sopra citato può presentare un'accumulazione di errori; infatti un errore nella stima dei

parametri delle prime immagini o dei punti tridimensionali si ripercuote sugli elementi aggiunti successivamente. Per risolvere questo problema si deve cercare di aggiustare sia le N fotocamere sia gli n punti tridimensionali, minimizzando mediante la procedura del *Bundle adjustment* “la somma delle distanze al quadrato tra la il punto j -esimo riproiettato tramite la fotocamera i -esima $P_i M^j$ ed il punto m_i^j ” (A. Fusiello, 2017):

$$\min_{R,t} \sum_{i=1}^n \|X_i - s(RY_i + t)\|^2 \quad [3.35]$$

La completa informatizzazione di questo processo, dall’individuazione e estrazione dei *keypoints* alla ricostruzione accurata della geometria dell’oggetto, è un vantaggio del metodo di *SfM* rispetto al tradizionale approccio della fotogrammetria.

3.7 Risultati finali: DEM, Raddrizzamento e Ortofoto

Dopo le fasi di orientamento, si possono determinare in maniera automatica le coordinate tridimensionali dei punti del modello stereoscopico.

Il DEM (*Digital Elevation Model*) è stato uno dei primi prodotti ad essere generato in maniera automatica con lo sviluppo delle tecniche digitali. Il modello altimetrico è costituito da un insieme di dati che consentono mediante interpolazione il calcolo della quota ortometrica (il geoide è assunto come riferimento) di un punto arbitrario del terreno che è descritto con accuratezza assegnata. I modelli altimetrici rappresentano un’alternativa alle tradizionali curve di livello. Quest’ultime sono utilizzate per visualizzare la morfologia del terreno, mentre i dati relativi a un modello altimetrico forniscono informazioni di quota sul territorio con tutti gli oggetti su di esso. (Linee guida-Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala)

I modelli altimetrici possono essere classificati in funzione del contenuto (FIGURA 3.16):

- DEM (*Digital Elevation Model*) o DTM (*Digital Terrain Model*) in cui si descrive la superficie del terreno;
- DSM (*Digital Surface Model*) in cui si descrive la superficie fisica del terreno compresi le strutture artificiali che su di esso sono presenti, alberi e oggetti presenti.

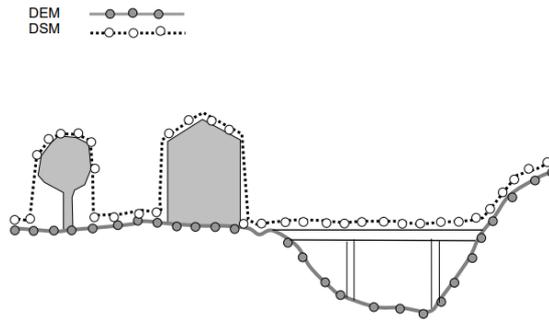


Figura 3.16- DEM e DSM- Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala

Un modello altimetrico deve contenere le seguenti informazioni (Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala):

- Un seminato di punti di coordinate note e disposti in modo regolare o irregolare;
- Le linee “*breakline*”, cioè linee unenti punti caratterizzate da brusche variazioni di pendenza;
- Le linee e i punti di descrizione di elementi corografici;
- Le delimitazioni di aree non incluse le “zone morte”;
- I limiti dell’area rappresentata.

A seconda della distribuzione del seminato di punti si può parlare di modello *Triangulated Irregular Network* (TIN) oppure di modello con disposizione regolare, FIGURA 3.17.

Il primo è costituito da punti collegati mediante una serie di triangoli, che non devono attraversare le linee *breakline*, che possono costituire i lati dei triangoli, e inoltre non devono contenere al loro interno punti. Infatti la superficie racchiusa dai lati del triangolo è considerata piana. La maglia di triangoli non è univoca ed è in funzione del primo triangolo definito e dalle regole della triangolazione adottate.

Il secondo è costituito da punti disposti ai vertici di una griglia con passo costante sufficientemente ridotta per poter applicare l’interpolazione lineare.

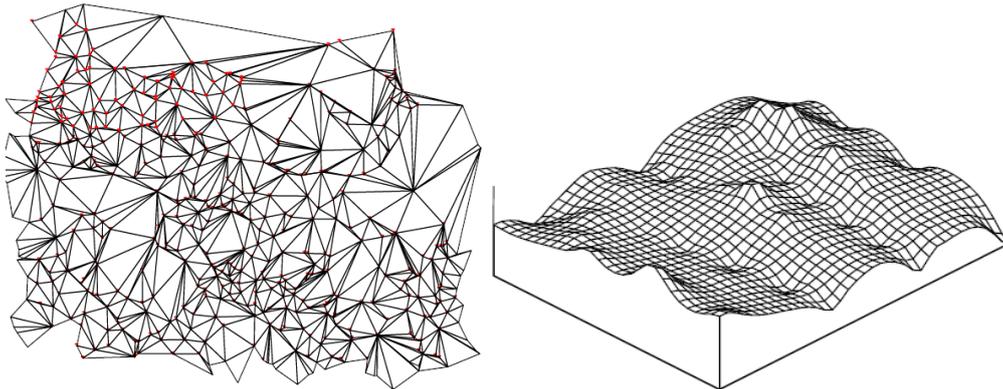


Figura 3.17- A sinistra modello altimetrico con disposizione TIN, a destra modello altimetrico con disposizione regolare-
Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala

La restituzione, ovvero la determinazione delle coordinate di un punto può essere eseguito con un unico fotogramma, quando si utilizzano la tecnica del raddrizzamento o dell'ortofoto. La tecnica del raddrizzamento è utilizzata principalmente nel rilievo fotogrammetrico architettonico delle facciate degli edifici, mentre l'ortofoto è ampiamente impiegata in fotogrammetria aerea.

Il **raddrizzamento** è una tecnica che consente la trasformazione di una fotografia, relativa a un oggetto piano con presa qualsiasi in una proiezione ortogonale dell'oggetto stesso. La fotografia rappresenta la realtà in forma bidimensionale, in cui i punti possono essere considerati in un sistema piano denominato sistema immagine. L'oggetto rappresentato è anch'esso piano e i punti che lo compongono si definiscono in un sistema di riferimento piano detto sistema oggetto. Il modello matematico utilizzato per passare dalle coordinate immagini alle coordinate reali è l'omografia, trasformazione piana a 8 parametri. Per determinarli si misurano almeno 4 punti di cui si conoscono le coordinate oggetto.

La tecnica illustrata precedentemente è valida solo se l'oggetto raffigurato può essere approssimato con un piano. Una volta determinata la scala di rappresentazione si può determinare il valore di altezza massima che l'oggetto può avere per essere considerato piano. Infatti un punto p dell'oggetto posto a una distanza H dal piano di raddrizzamento, come mostrato nella FIGURA 3.18, è rappresentato da un punto immagine che non è proiettato correttamente, ma risulterà spostato di una certa quantità che è direttamente proporzionale all'altezza del punto e alla distanza tra p e il punto principale sull'immagine,

mentre inversamente proporzionale alla distanza principale. Il valore di altezza massima ammissibile è determinato affinché l'errore grafico risulti accettabile. (M. Lo Brutto 2005)

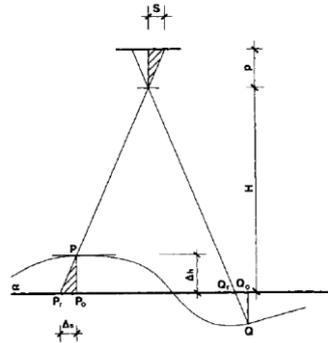


Figura 3.18- Relazione tra l'altezza di un punto e l'errore di altezza- M. Lo Brutto 2005

In caso contrario, se l'oggetto rappresentato non è piano o non può essere paragonato a un piano, si utilizza la tecnica dell'**ortofoto** o ortoproiezione. Attraverso tale tecnica si ottiene una riproduzione planimetrica a scala costante. Poiché un oggetto non piano presenta una scala variabile da punto a punto, in quanto cambia la distanza tra il punto e il centro di proiezione, si considera non l'intera immagine, ma una piccola porzione alla volta. In questo modo la porzione di oggetto rappresentato risulta piano e si può eseguire la tecnica precedentemente descritta. Ogni immagine raddrizzata può essere successivamente legata alle altre creando un'unica immagine che rappresenta una proiezione ortogonale dell'oggetto stesso. L'ortofoto è una rappresentazione cartografica in forma di immagine digitale georeferenziata.

Per ogni *pixel* dell'ortofoto si determinano le coordinate (E,N), mediante un modello altimetrico si interpola la quota(Z) ed infine si proietta il punto (ξ, η) tridimensionale sull'immagine utilizzando un modello matematico basato sulle equazioni di collinearità. Si determina in questo modo il punto DN da associare alla posizione immagine e lo si associa al *pixel* dell'ortofoto, come mostrato in FIGURA 3.19. (Dispense A. Lingua)

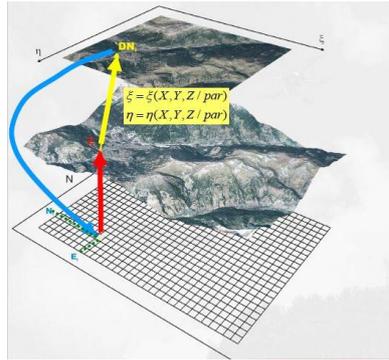


Figura 3.19-Procedura per la generazione dell'ortofoto- Dispense A. Lingua

Il limite dell'ortofoto risiede nel contenuto metrico bidimensionale. Per superare a tale limitazione si è sviluppata l'**ortofoto solida di precisione (OSP)**, costituita da punti tridimensionali. Infatti, questa rappresentazione si ottiene combinando il contenuto cromatico e metrico bidimensionale dell'ortofoto con il contenuto tridimensionale del *DSM* dell'oggetto rappresentato. L'OSP è costituita da matrici con *pixel* della stessa dimensione. Per ogni *pixel* (FIGURA 3.20-A) è necessario memorizzare (Linee guida-Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala):

- i tre valori di intensità delle componenti cromatiche fondamentali (RGB, Red, Green, Blue), quantizzati da 0 a 255, per un totale di 3 *byte*;
- un valore di quota derivato dal DSM associato(FIGURA 3.20-B), per un totale di 2/4 *byte*;
- un valore relativo ad altre bande aggiuntive, relative ad esempio ad un eventuale modello altimetrico aggiuntivo o informazioni multi/iperspettrali, per un totale di 1 *byte*.

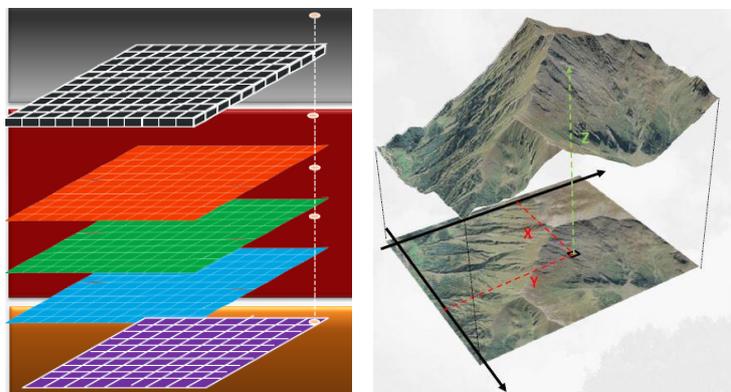


Figura 3.20- a) Struttura dell'ortofoto solida di precisione, b) DEM associato a un ortofoto- Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala

3.8 Software utilizzati

I *software* e i sistemi di *Structure from Motion* sono numerosi. Di seguito saranno descritte le caratteristiche di quelli impiegati nella seguente tesi.

Photoscan è un programma che oltre a coprire tutte le fasi dello *Structure from Motion*, è in grado di generare anche il DSM (*Digital Surface Model*) e ortofoto.

Le principali fasi sono:

- Calibrazione della macchina fotografica
- Allineamento dei fotogrammi
- Generazione della *mesh*
- Proiezione della *texture*

Inseguito all'inserimento delle immagini fotografiche il *software* riconosce già in un primo momento il modello della camera da presa, determinando i parametri interni (dimensione del *pixel* e della focale). Lo *step* successivo è l'allineamento. Durante questa fase l'algoritmo utilizzato da "Agisoft PhotoScan" estrae da ogni fotogramma le *features*, senza considerare le variazioni di rotazione, scala e distorsioni radiometriche. Questi punti vengono successivamente raccolte in un *database*, individuate le possibili coppie in relazione alla loro similarità, eliminando gli accoppiamenti errati. Per evitare queste false corrispondenze e *Outlier*, la fase di elaborazione richiede un algoritmo di calcolo robusto. L'algoritmo utilizzato per estrarre le *features* è simile al SIFT, ma permette un orientamento più accurato delle immagini. Per determinare approssimativamente i parametri di orientamento interno ed esterno, il programma utilizza l'algoritmo *greedy*. Questa stima viene poi affinata, mediante l'algoritmo di *bundle-adjustment*.

Terminate queste prime fasi, si può generare il modello tridimensionale dell'oggetto rilevato. I metodi implementati in "Photoscan" hanno un approccio *multi-view*. La nuvola densa ottenuta è collocata in un sistema relativo, ovvero è orientata rispetto alla posizione delle camere da prese. Per poterla collocare nel sistema oggetto, ovvero nella corretta posizione si utilizzano punti di coordinate oggetto note, denominati *marker*. (Agisoft PhotoScan)

Pix4D è un programma che utilizza tutte le fasi dello *Structure from Motion* per generare il modello tridimensionale, ma è anche in grado di produrre il DSM (*Digital Surface Model*) e ortofoto. Le fasi di elaborazione sono molto simili a quelle del programma sopra citato.

Il primo *step* consiste nel caricamento delle immagini da elaborare. Il *software* riconosce il modello della camera fotografica utilizzata durante il rilievo, in caso di errore si cambiano i parametri.

A seconda di cosa si vuole generare si seleziona la tipologia di modello (*3D Maps, 3D Models, Agriculture* et). Le immagini vengono allineate utilizzando un algoritmo simile al SIFT, estraendo le *features* per ogni fotogramma utilizzate successivamente per il *matching*. Nel *report* sono riportate sia la media dei *keypoints* per immagine sia la media dei *matches* utilizzati per la calibrazione dei fotogrammi. Durante questa fase, i parametri della camera fotografica identificati precedentemente vengono affinati con il metodo del *Bundle adjustment*. Il risultato finale di questa prima fase è costituito da una nuvola “sparsa”. Il *software* consente una densificazione della nuvola precedentemente generata per ottenere prodotti finali con qualità e precisione maggiore.

Visual Structure from Motion è un programma sviluppato da Changchang Wu. Il *software* copre le prime fasi dello *Structure from Motion*, ovvero l'estrazione automatica delle *features*, mediante l'algoritmo SIFT, con relativo *matching* e orientamento. Per generare la nuvola densa il programma viene integrato con il *plugin* PMVS/CMVS. Il programma ha un sistema estremamente rapido per l'estrazione e il *matching* delle *features* e consente la visualizzazione dinamica, in tempo reale, delle operazioni di orientamento. Durante la fase di autocalibrazione, il programma individua solo un parametro K delle distorsioni radiale e per tale motivo il *software* non è funzionale quando le fotografie presentano distorsioni importanti. VisualSFM consente delle elaborazioni più rapide a svantaggio delle precisioni e della completezza.

Nel PARAGRAFO 7.1 si individueranno i vantaggi e gli svantaggi, relativi ai tre *software* utilizzati, effettuando un confronto tra le nuvole dense di punti (*Dense Cloud*) generate.

4 Chiostro di San Nicola da Tolentino

Il chiostro di San Nicola da Tolentino, ubicato a Tolentino in provincia di Macerata (FIGURA 4.1), è il più antico esempio di chiostro mendicante italiano ed è il fulcro centrale del complesso architettonico del Santuario di S. Nicola.



Figura 4.1- Basilica di San Nicola a Tolentino, Macerata- Google Earth Pro

L'ordine degli Agostiniani si insediò nel paese nel 1256 e realizzò un convento detto di "S. Agostino" costituito da un edificio adibito ad abitazione per i religiosi e da un oratorio per poter esercitare l'apostolato liturgico. Solo nel 1275 i Superiori dell'ordine mendicante invitarono nel convento il frate Nicola da Castel Sant'Angelo, che promosse lo sviluppo del complesso conventuale e chiesastico. Il frate era ritenuto un santo già in vita, ma solo dopo la sua morte si aprì ufficialmente il processo di canonizzazione. Il convento e la chiesa furono nominati in onore a S. Nicola nel 1450, anno in cui ci fu un gesto di profanazione della salma tramite il taglio delle braccia riposizionate successivamente nell'antica sacrestia, mentre la salma fu interrata e nascosta per evitare ulteriori tentativi simili. La storia del convento si è sviluppata intorno alla devozione del santo.

Nel 1485 i religiosi della Congregazione di Lombardia presero il posto degli Agostiniani, e ci abitarono fino al 1810. Durante questo periodo ci fu un ampliamento e abbellimento del complesso architettonico e infatti con l'aiuto di artigiani lombardi fu realizzato il soffitto in

legno dorato e la facciata fu rivestita con il travertino. Successivamente con le soppressioni napoleoniche e del Regno d'Italia i soldati occuparono il convento.

Nel 1926, in seguito alla ricostruzione attuata da padre Nicola Fusconi, è stata ritrovata la salma di S. Nicola, restituendo lustro al Santuario. (Centro studi Agostino Trapè, 2008)

4.1 Stile architettonico del chiostro di San Nicola

Il complesso architettonico (FIGURA 4.2) risulta architettonicamente e strutturalmente unitaria, nonostante sia stato realizzato in fasi successive in tempi lunghissimi.

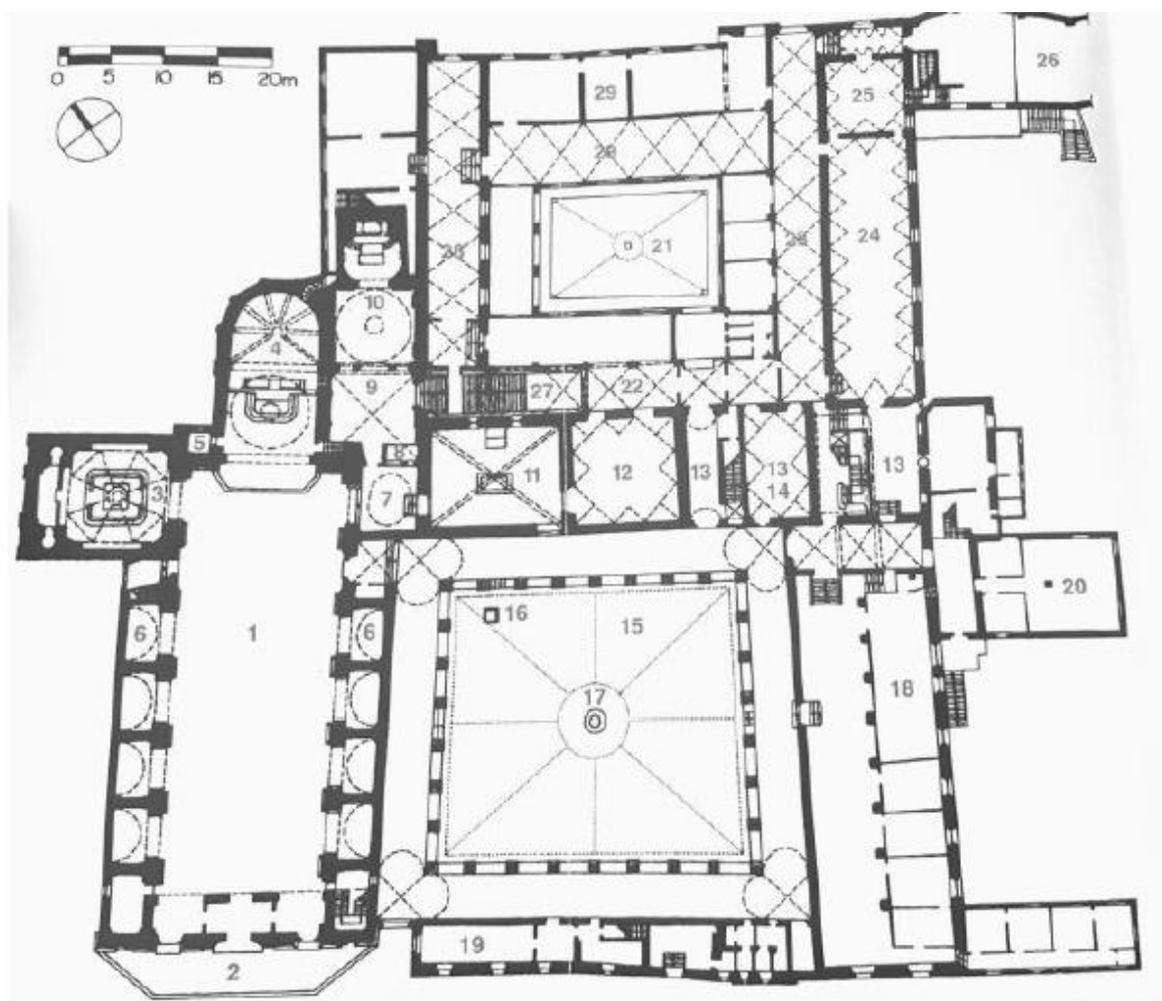


Figura 4.2- Pianta del complesso architettonico di San Nicola da Tolentino- disegno di F. Mariano

L'inizio dei lavori risale al 1284 quando l'ordine Agostiniano decise di modificare la struttura preesistente di prima accoglienza, in seguito a una cospicua donazione da parte di una nobildonna. Della struttura originaria si è salvaguardato la sala seminterrata dell'ala meridionale del convento e la camera collocata tra il Cappellone, cappella delle Sante

Braccia e la chiesa (numero 8 in FIGURA). Il nucleo iniziale si estendeva lungo il braccio orientale ed era costituito dalla chiesa, dalla sacrestia, dal cappellone, dal capitolo e dalla sala refettorio al pian terreno, mentre al piano superiore dai dormitori.

Nella seconda metà del '200 si iniziò la costruzione del chiostro circondato da ambulacri con lo scopo di creare percorsi di pellegrinaggio verso il cappellone e la chiesa. La realizzazione in fasi successive è testimoniata dall'eterogeneità dello stile degli elementi scultorei. Ad esempio, il chiostro è composto da 30 capitelli decorati con motivi vegetali e di questi i sei collocati nel lato meridionale presentano caratteri più tardogotici rispetto ai restanti. Invece, sul lato settentrionale del quadriportico sono presenti ulteriori differenze, quali archeggiature ellittiche e assenza del fregio medievale in cotto ad archetti pensili. Questa filare presenta un numero di pilastri inferiore rispetto a quelli collocati lungo il lato orientale e occidentale, i quali sono stati traslati verso il centro del chiostro in seguito alla realizzazione delle cappelle lungo il lato destro della basilica, compromettendo la solidità del complesso in laterizio. Le colonne dall'aspetto trecentesco sono costruite in cotto e differiscono fra loro per forma, alcune lobate, altre cilindriche e altre ancora poliedriche.

La costruzione del chiostro si concluse con la realizzazione del piano superiore anche lungo la parete settentrionale, creando un loggiato di 16 colonne di stile rinascimentale con le 2 terminali murate. Tale intervento fu concretizzato sia per pareggiare l'altezza della filare rispetto alle altre tre, realizzate precedentemente, sia per ampliare lo spazio destinato ai dormitori e ai servizi residenziali per ospiti illustri.

Nel 1502 fu realizzata una ristrutturazione durante la quale le originarie transannae, ovvero tralicci in legno che avevano il compito di sostenere le tettoie degli ambulacri, vennero sostituite da volte a botte con lo scopo di ottenere al piano superiore un maggiore spazio.

Successivamente i decoratori Anastasi e Orsini affrescarono le gallerie, compiendo un tributo di riconoscimento e di onore al Santo da parte di varie città delle Marche e di famiglie gentilizie, testimoniato dalla presenza di stemmi e blasoni (FIGURA 4.3) nella parte superiore di esse. (Centro studi Agostino Trapè, 2008)



Figura 4.3- Blasone nobiliare

4.2 Evento sismico del 2016

Tolentino, località in provincia di Macerata, è uno dei comuni in cui si sono avvertite le scosse sismiche che si sono susseguite dal 24 agosto 2016. La città è collocata al centro della vallata di Chienti, rappresentando un punto di collegamento fra la costa e la zona montana e per tale motivo nei secoli ha assunto un importante ruolo storico, culturale ed economico.

Secondo la nuova classificazione sismica del territorio emanata nel 2003, la provincia di Macerata (FIGURA 4.4) è assegnata alla Zona 2, in cui possono verificarsi forti terremoti.

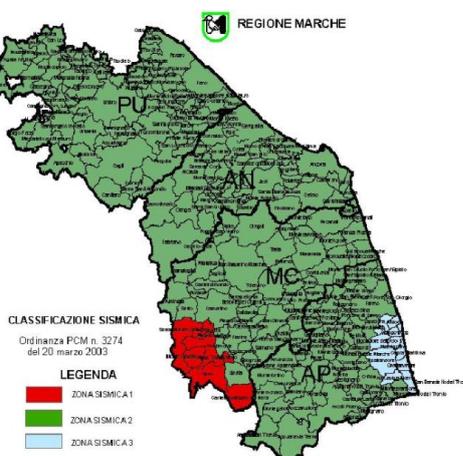


Figura 4.4- Classificazione zone sismiche Regione Marche-picchionews

La basilica di San Nicola, già precedentemente danneggiata dal terremoto del 1703, è stata nuovamente interessata dal sisma del 2016 che ha causato l'inagibilità della zona del convento e dell'abside, mentre gli affreschi del chiostro e dal cappellone hanno subito piccoli distacchi.

Per tale motivo il comune di Tolentino ha promosso un accordo di cooperazione strategica con il Politecnico di Torino e l'università di Nagoya per monitorare con tecniche non-invasive lo stato della basilica. È stata effettuata una campagna di misura dal 20 al 25 febbraio 2017 per acquisire le informazioni relative al complesso architettonico mediante tecnica *laser scanner* e fotogrammetrica sia da drone sia terrestre, con lo scopo di generare un modello tridimensionale utilizzabile per eventuali studi strutturali o di restauro.

5 Acquisizione dati

Per studiare e analizzare correttamente e completamente un bene culturale non si deve esaminare solo la singola entità, ma si deve considerare anche il contesto territoriale in cui è collocato. Per tale motivo inizialmente si è effettuato un'analisi a livello urbano e successivamente si è esaminato nel dettaglio l'oggetto di studio, il chiostro di San Nicola.

5.1 Rilievo topografico

La fotogrammetria rappresenta attualmente il metodo maggiormente utilizzato per il rilievo di dettaglio di ampie aree del territorio. Per adoperare questa tecnica, il modello stereoscopico che si genera a partire da due fotogrammi consecutivi deve essere georiferito. Per tale motivo, si devono individuare almeno quattro punti comuni ai fotogrammi dei quali è necessario calcolare le coordinate plano-altimetriche nel sistema di riferimento della carta che si vuole generare. Tali punti sono denominati "punti d'appoggio" e sono misurati mediante metodi di rilevamento in loco durante la campagna di rilievo.

A questo punto è fondamentale illustrare come si è organizzato il progetto di rilievo e i metodi eseguiti.

Il rilievo topografico è l'insieme delle operazioni di misure angolari e lineari, con le quali si determinano gli elementi sul territorio necessari alla restituzione in scala dell'oggetto rilevato. I punti necessari per una rappresentazione cartografica si suddividono in due categorie (L. Mussio-DICA):

- I punti d'inquadramento o capisaldi principali rappresentano la struttura portante del rilievo. Essi sono materializzati con segnali, in modo da permanere nel tempo, e sono rilevati con tecniche raffinate di misura e di calcolo. La precisione con cui vengono calcolate le coordinate di questi punti eccede quella richiesta dalla rappresentazione grafica.
- i punti di dettaglio delineano la particolarità del terreno o dei manufatti, per tale motivo i punti rilevati sono nettamente superiori rispetto a quelli sopra citati. La loro posizione è determinata con riferimento a uno o più punti d'inquadramento

con metodi più veloci e meno raffinati, rispettando la precisione richiesta dalla scala della rappresentazione.

La precisione del rilievo dipende dalla scala finale di rappresentazione degli elaborati e dall'errore di graficismo. L'errore ammesso (σ_G) nel calcolo delle coordinate di un punto deve essere:

$$\sigma_G = 0.2[mm] \cdot n \quad [5.1]$$

dove n è il denominatore della scala della rappresentazione.

Per tale motivo i punti sopra citati si misurano con tecniche differenti, in quanto la precisione della misura diminuisce passando dalla fase d'inquadramento a quella di dettaglio.

Il rilievo topografico si articola in tre fasi:

- Realizzazione rete di inquadramento (appoggio), che generalmente è la rete di maggior dimensione e per tale motivo è misurata con osservazioni in GPS. I punti devono essere posizionati in modo che ci sia visibilità e buona ricezione della costellazione satellitare;
- realizzazione del raffittimento della rete di appoggio, che ricopre omogeneamente la zona da rilevare ed è costituita da punti misurati con GPS o stazioni totali e in quest'ultimo caso è importante l'intervisibilità tra gli stessi;
- rilievo dei particolari(dettaglio).

5.1.1 Rete d'inquadramento

Dato che in loco non erano presenti vertici già utilizzati in rilievi precedenti, sono stati individuati e materializzati al momento. I punti della rete sono stati rilevati con tecnica GNSS in modalità statica e nominati con un numero progressivo a partire da 100 anteceduto dalla lettera "T" (FIGURA 5.3).

La modalità statica si basa sulla misura dell'intervallo di tempo che intercorre tra la trasmissione del segnale da parte del satellite e la sua ricezione nel ricevitore. Il ricevitore è in grado di emettere lo stesso segnale del satellite. Al momento della ricezione i due

segnali (FIGURA 5.1) risultano sfalsati nel tempo, in quanto il segnale del satellite ha percorso la distanza terra-satellite.

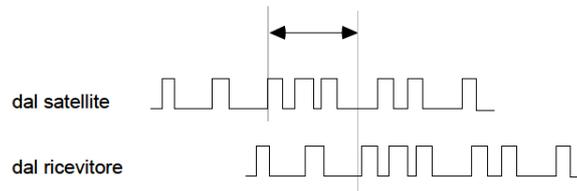


Figura 5.1-Configurazione del segnale ricevuto ed emesso dal ricevitore

Quindi la distanza tra il generico satellite(j) e il ricevitore (i) può essere espressa dalla seguente equazione:

$$R_i^j(t) = c \cdot \Delta t = \sqrt{(X^j(t) - X_i)^2 + (Y^j(t) - Y_i)^2 + (Z^j(t) - Z_i)^2} \quad [5.2]$$

c è la velocità di propagazione nel vuoto.

Per risolvere l'equazione sopra citata si utilizzano i segnali ricevuti da almeno quattro satelliti: il quarto è necessario per risolvere lo sfasamento temporale fra gli orologi atomici del satellite e quello a quarzo del ricevitore.

La precisione di ogni punto è funzione solo degli errori di misura, degli errori sistematici o errori vari di osservazione.

Questa modalità di calcolo è la più precisa in quanto si possono ottenere precisioni subcentimetriche, ma anche la più lenta a causa dei lunghi periodi in cui i ricevitori sono lasciati in acquisizione, generalmente un'ora e. Infatti, su ciascun vertice è collocato un ricevitore che memorizza le osservazioni continue con un intervallo di campionamento fissato. La sessione di misura, ovvero il periodo di tempo per registrare i satelliti, dipende dalla precisione finale richiesta, dalla configurazione satellitare e dalla qualità di ricezione. Maggiore è il periodo di acquisizione dei dati, maggiore è la precisione che si riesce a raggiungere. (M. Lo Brutto et al. 2004 -Dispense)

Lo strumento utilizzato è un GeoMax Zenith 35 Series (FIGURA 5.2) e può essere montato su una palina o su una base.



Figura 5.2- Strumento GeoMax, palina e base

5.1.2 Rete di raffittimento

Successivamente è stato necessario inserire altri punti (FIGURA 5.3) per il rilevamento dell'interno della chiesa, del cappellone e del chiostro. Questi, a causa della scarsa o assente copertura, non sono stati calcolati con il metodo GNSS, ma con la tecnica topografica classica a partire dalla stazione di vertice noto calcolata precedentemente, come T100 e T200.

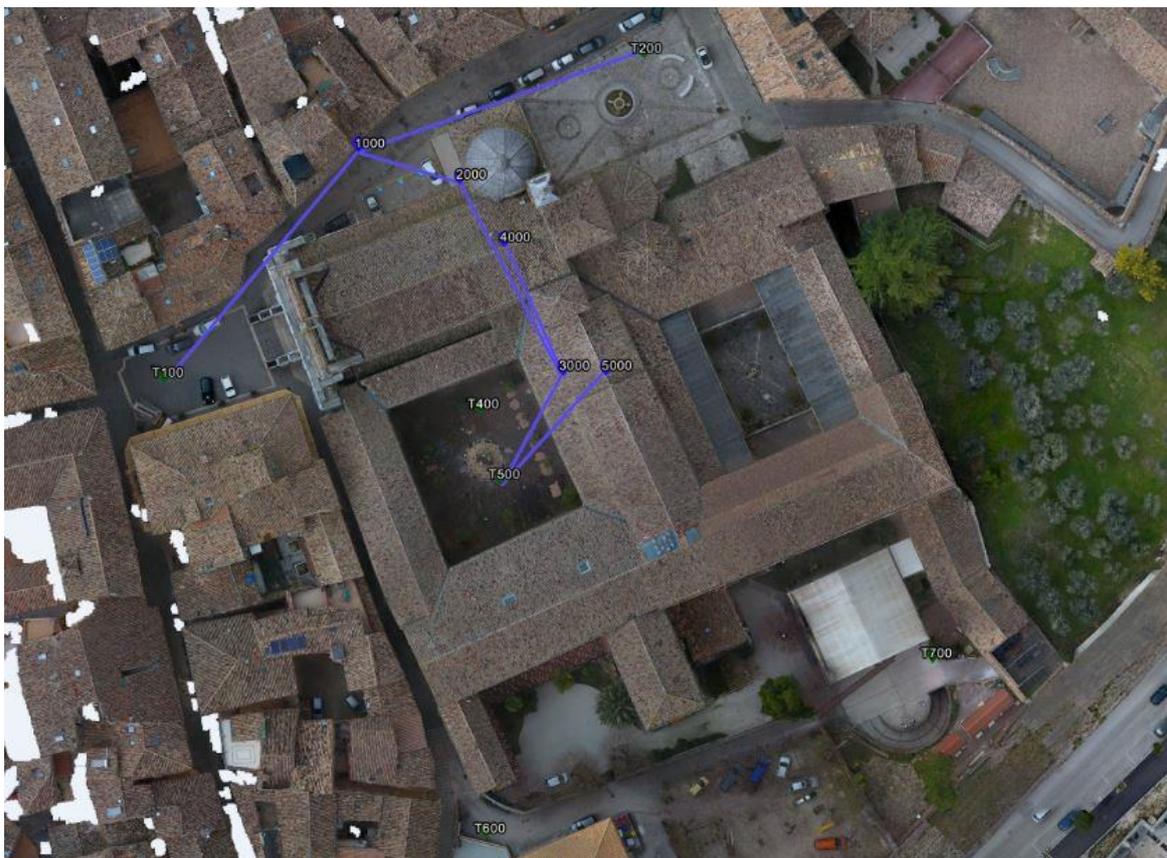


Figura 5.3- Rete d'inquadramento con vertici GNSS (colore verde), rete di raffittimento con vertici poligonali e poligonale (colore blu)

5.1.3 Rete di dettaglio

Il rilievo dei particolari (FIGURA 5.4) topografici rappresenta la terza e ultima fase del procedimento finora illustrato. Mediante una stazione totale posizionata su un vertice noto e orientata sul punto da registrare, è stato possibile misurare i punti naturali significativi, i marker a terra (punti d'appoggio) e quelli collocati sulle facciate del bene architettonico oggetto di studio.



Figura 5.4- Rete di dettaglio (colore rosso)

Il numero minimo di punti d'appoggio da prevedere in questa fase è legato alla qualità dei risultati che si vuole raggiungere, alla modalità di misurazione e al valore di ricoprimento longitudinale definito durante la pianificazione del rilievo. Queste differenti tecniche determinano la posizione e il numero minimo di GCP (FIGURA 5.5). Inoltre, per verificare la qualità del rilievo e del prodotto finale durante la fase di collimazione si trasformano alcuni GCP in CP (*Control Point*), punti di legame di coordinate non note. Per tale motivo bisogna incrementato del 10-20% il numero minimo di GCP. (Dispense A. Lingua)

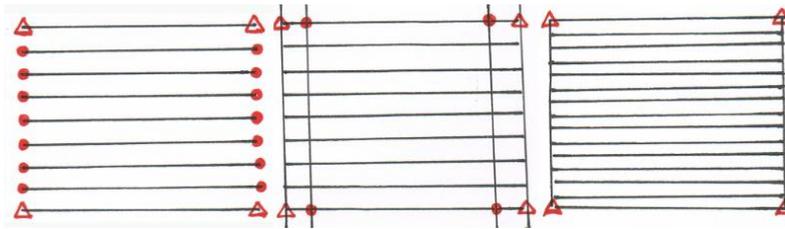


Figura 5.5- Numero minimo di GCP (triangolo- XYZ control point, cerchio-Z control point) a seconda del tipo di tecnica. A) GNSS e IMU e ric. trasversale del 20%, B) GPS e IMU, ric. trasversale del 20% e strisciate di bordo, C) GPS e IMU e ric. trasversale del 60%- Dispense A. Lingua

5.1.4 Monografia dei vertici e eidotipi dei punti di dettaglio

Per ogni vertice di stazione materializzato in loco è stato realizzato una monografia (FIGURA 5.6), in cui si è specificato la localizzazione e il tipo di materializzazione del punto, l'eidotipo del vertice, lo strumento di rilievo, la sua altezza strumentale, lo strumento di misura, tipo di antenna, la data, l'ora di inizio e di fine acquisizione, l'operatore e il sistema di riferimento in cui sono stati acquisiti i dati. Queste monografie possono essere di fondamentale importanza per il loro riconoscimento durante un successivo rilievo.

Figura 5.6- Esempio di Monografia realizzata in loco

Per i punti di dettaglio si sono realizzati esclusivamente gli eidotipi (FIGURA 5.7), sui quali sono stati trascritti i codici identificativi di ciascun punto. Per tale motivo questi eidotipi sono necessari al momento dell'elaborazione dei dati, durante la fase di collimazione.

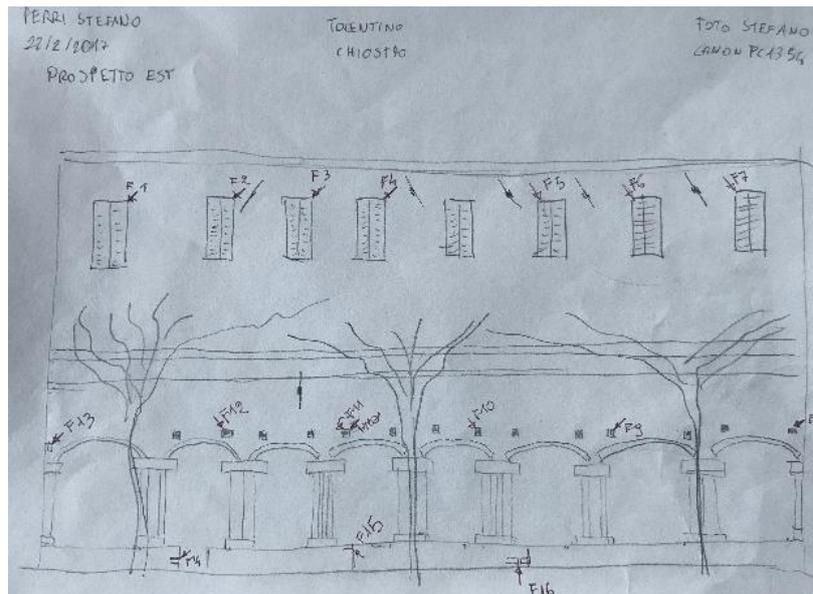


Figura 5.7- Esempio di Eidotipo realizzato in loco

5.2 Acquisizione dati a scala territoriale

L'acquisizione dei dati di rilievo si è effettuata dal 22 al 24 febbraio 2017. Durante la campagna di rilievo, dopo aver provveduto al posizionamento di un numero sufficiente di *marker* a terra su tutta l'area di interesse, si sono effettuati due voli preimpostati, mediante l'utilizzo del Drone commerciale *Dji Phantom 4*.

Nel primo volo, "volo *nadirale*" (FIGURA 5.9-A), sono state effettuate le riprese fotografiche con asse della camera perpendicolare al territorio, mentre il secondo, "volo *obliquo*" (FIGURA 5.9-B), realizzato a un'altezza maggiore, è stato eseguito per registrare le immagini "oblique", ruotando la camera fotografica in modo che il suo asse risulti inclinato di circa 45° rispetto al caso precedente.

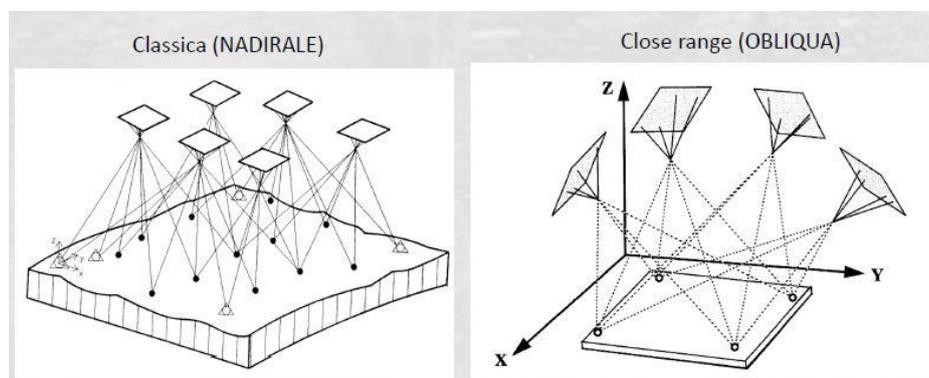


Figura 5.8- Schema generico del piano di volo per l'acquisizione di immagini nadirali(A) e di immagini oblique (B)

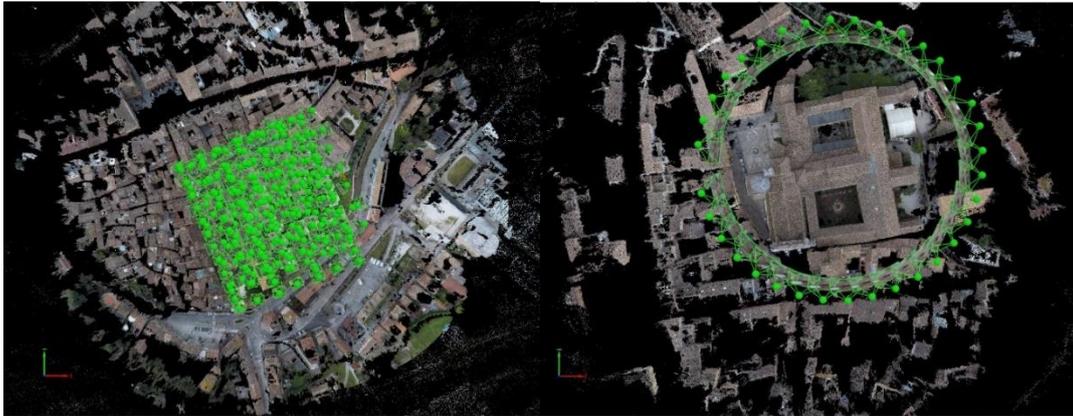


Figura 5.9- Realizzazione del piano di volo per l'acquisizione di immagini nadirali(A) e di immagini oblique (B)

L'introduzione di immagini oblique fu sperimentato per la prima volta nel 2008, ma solo in seguito ai recenti sviluppi degli algoritmi della *Computer Vision* le potenzialità di questo metodo sono notevolmente aumentate. Questa tecnica permette di raccogliere informazioni complesse e complete in breve tempo e risulta pertanto un vantaggio per la documentazione e la mappatura delle città. In questo caso, i modelli tridimensionali delle città comprendono informazioni dettagliate circa elementi verticali e facciate degli edifici. Infatti è stato sperimentato come la ricostruzione delle facciate di un modello 3D è confrontabile in termini di densità di punti con il corrispettivo modello realizzato con la tecnica LIDAR, ma non in termini di precisione. Per tale motivo non può essere utilizzato come base per il modello parametrico tridimensionale. (F. Chiabrando et al. 2016)

Un rilievo fotogrammetrico aereo da UAV realizzato al di sopra un'area di interesse presuppone la pianificazione dell'acquisizione di un blocco di immagini con adeguato ricoprimento longitudinale e trasversale e una predefinita risoluzione a terra (*GSD-Ground Sample Distance*- PARAGRAFO 2.2.6). I dati di ingresso devono essere calcolati con precisione per garantire la conclusione del processo, che risulta prevalentemente automatizzata.

5.2.1 Piano di volo UAV

La pianificazione della campagna di rilievo, svolta in laboratorio, ha riguardato principalmente la definizione del piano di volo UAV, prima fase operativa del processo.

Prima di effettuare il rilievo è fondamentale stabilire alcuni parametri, in modo da ottenere fotogrammi con caratteristiche funzionali alle esigenze della successiva restituzione.

I principali parametri preventivamente determinati sono:

- Scala di rappresentazione del rilievo;
- μ : ricoprimento longitudinale (in genere 70%);
- ε : ricoprimento laterale (in genere 60%);
- l : lato effettivo del fotogramma;
- c : distanza principale della camera;
- v : velocità dell'aereo in m/s .

I parametri successivamente stimati si considerano di massima, in quanto non è possibile prevedere la totalità degli eventi:

- **Abbracciamento del fotogramma:** In ciascun fotogramma di lato l è rappresentato una porzione di oggetto rilevato di lato L , detto abbracciamento. Questo parametro può essere determinato con la seguente formula:

$$L = \frac{l \cdot H}{c} \quad [5.3]$$

Tale formula può essere applicata quando gli assi della camera sono paralleli e perpendicolari alla base di presa.

- **Base di presa:** La lunghezza della base di presa è un valore molto fondamentale, perché da esso che dipende il valore del ricoprimento longitudinale necessario a sua volta alla generazione dei modelli stereoscopici. Essa rappresenta la distanza percorsa tra i centri di presa dei due fotogrammi consecutivi. Il valore della base di presa può essere determinato con la seguente formula:

$$B = L \cdot \left(1 - \frac{\mu}{100}\right) \quad [5.4]$$

- **Interasse delle strisciate:** L'interasse A tra gli assi di due strisciate adiacenti deve garantire un ricoprimento trasversale programmato, generalmente pari al 60% di L , e può essere determinato con la seguente formula:

$$A = L \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right) \quad [5.5]$$

- **Numero dei fotogrammi del rilievo:** Per determinare i costi e il tempo del rilievo è necessario valutare il numero n_s delle strisciate. Definito l'ingombro massimo del

territorio da rilevare, questo può essere racchiuso in un rettangolo ideale di dimensioni d_1 e d_2 . La direzione delle strisciate è quella della dimensione maggiore del rettangolo sopra citato (esempio d_1). Il numero di strisciate è pari:

$$n_s = \text{int} \left[\frac{d_2}{L \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)} \right] + 1 \quad [5.6]$$

In queste relazioni il +1 è utile per arrotondare al numero successivo, mentre int per fornire un valore intero.

Considerando una scala nominale del rilievo pari a 1:500 e un GSD massimo pari a 50 mm, si può procedere con il calcolo dei parametri sopra elencati, riportati interamente nell'ALLEGATO A1, per determinare il GSD di progetto, pari a **26 mm**, e il tempo di volo complessivo necessario per il rilievo, pari a 20 minuti.

I calcoli possono essere considerati accettabili, infatti il GSD di progetto è minore del GSD massimo.

5.2.2 UAV utilizzato

Il sistema SAPR multicottero utilizzato è stato il Phantom DJI 4 (FIGURA 5.10), un UAV della classe VTOL (*Vertical Take-off and Landing*), un quadricottero senza pilota a bordo, radiocomandato, in grado di seguire una rotta pianificata a priori.



Figura 5.10- Drone DJI Phantom 4

Nella TABELLA 5.1 sono illustrate le principali caratteristiche del drone. Il drone è dotato di un ricevitore GNSS e sensori di volo, che consentono di contrastare l'azione del vento in assenza di comandi da parte dell'operatore, migliorando la stabilità. Il ricevitore GNSS

consente di eseguire automaticamente un volo pre-programmato su base cartografica e di registrare le coordinate dei centri di presa dei fotogrammi acquisiti durante il rilievo.

Il DJI Phantom 4 è dotato, inoltre, di una serie di sensori che gli permettono di visionare l'ambiente circostante in tempo reale e prendere decisioni per evitare collisioni con ostacoli. Il sistema "*Obstacle Sensing System*" è costituito da due sensori ottici rivolti in avanti. La fotocamera è fissata in maniera permanente al drone ed è mantenuta perfettamente equilibrata in qualsiasi condizioni, grazie al giunto cardanico motorizzato a 3 assi (*gimbal*). Il sistema di controllo a terra include un collegamento radio che arriva a un *range* operativo di 3.5 km di distanza. (Scheda tecnica DJI Phantom 4)

Tabella 5.1-Caratteristiche del drone utilizzato

Drone DJI Phantom 4	
Peso (batterie e eliche incluse)	1380 grammi
Velocità massima di salita	6 m/s (22 km/h) /Modalità sport
Velocità massima di discesa	4 m/s (14 km/h) /Modalità sport
Velocità massima	16 m/s (57.6 km/h) in modalità ATTI, senza assenza di vento
Precisione di volo	Verticale: +/- 10 cm (con sensori di posizione attivi) oppure +/- 0.5 m
	Orizzontale: +/- 30 cm (con sensori di posizione attivi) oppure +/- 1.5 m
Altitudine massima	6000 m
Temperatura di funzionamento	Da 0° a 40° C
Modalità GPS	GPS/ GLONASS
<i>Sistema di individuazione degli ostacoli OSS (Obstacle Sensing System)</i>	
Portata	0.7 - 15 m
Posizione	Frontali, sottostanti
Operatività	Superficie con pattern uniforme e illuminazione adeguata (lux >15)
<i>Camera 4k con slowmotion 1080p</i>	
Sensore	1/2.3" da 12 Mpixels effettivi
Obiettivo	FOV 94° 20 mm (Formato da 35mm) f/2.8, messa a fuoco a infinito
Range ISO	100-3200 (video) 100-1600(foto)
Velocità otturatore	8s-1/8000 s
Dimensione massima immagine	4000 x 3000

Drone DJI Phantom 4	
Modalità foto	<ul style="list-style-type: none"> - Scatto singolo - Scatto a raffica (3/5/7 scatti) - Auto Exposure Bracketing (AEB): 3/5 - Bracketed Frames a 0.7EV Bias - Intervallo di tempo (timelaps) - HDR
Modalità registrazione video	<ul style="list-style-type: none"> - UHD: 4096 x 2160p 24/25 fps - 4k: 3840 x 2160p 24/25/30 fps - 2.7k: 2704x1520 24/25/30 fps - FHD: 1920 x 1080p 24/25/30/48/50/60/120 fps - HD: 1280 x 720p 24/25/30/48/50/60 fps
Scheda SD supportata	Micro SD (Class 10 o UHS-1 richiesta) - Massimo 64 GB
Bitrate video massimo	60 Mbps
Formato file	<ul style="list-style-type: none"> - FAT32 (≤ 32 GB); exFAT (> 32 GB) - Foto JPEG, DNG (RAW) - Video: MP4, MOV (MPEG-4 AVC/H.264)
<i>Gimbal</i>	
Controllo Gimbal	da -90° a +30°
Stabilizzazione	3-assi (beccheggio, rollio, imbardata)
<i>Posizionamento visivo (Sensori visivi e ultrasuoni)</i>	
Velocità massima	Meno di 10 m/s(36 Km/h) (2 metri di altezza)
Intervallo di altitudine	0 - 10 m
Intervallo di funzionamento	0 - 10 m
Ambiente operativo	Superficie regolare con illuminazione adeguata (Lux>15)
<i>Radicomando</i>	
Frequenza di funzionamento	2.400 Ghz - 2.483 Ghz
Portata massima	3.5km in modalità CE, 5 km in modalità FCC
Temperatura di funzionamento	da 0° a 40°C
Batteria	6000 mAh LiPo 2S
Supporto per dispositivi mobili	Per tablet e smartphone
Potenza di trasmissione (EIRP)	<ul style="list-style-type: none"> - FCC: 23 dBm - CE: 17 dBm
Alimentazione	1,2 A - 7,4 V
<i>Batteria Drone Intelligente</i>	

Drone DJI Phantom 4	
Capacità	5350 mAh
Tensione	15.2 V
Tipo	LiPo 4S
Potenza	81,3 Wh
Peso	462 g
Massimo tempo di volo	circa 28 minuti
Temperatura di funzionamento	da -10° a 40°C
Potenza massima di caricamento	100 W

5.3 Acquisizione dati a scala architettonica

Dopo aver effettuato un'analisi del contesto urbano, ci si è focalizzati sull'edificio storico oggetto di studio.

Il rilevamento è stato realizzato utilizzando molteplici tecniche, constatando così che il migliore approccio per il rilievo tridimensionale consiste nella combinazione di differenti strumenti e tecniche di acquisizione dati.

L'integrazione fra i diversi metodi consente l'ottimizzazione dell'intero processo, dal rilievo alla modellazione tridimensionale, ottenendo il miglior risultato possibile in termini di precisione del singolo dato e di accuratezza globale.

Nello specifico le tecniche utilizzate sono state:

- **LiDAR terrestre** (*laser scanner*) per l'acquisizione di grandi quantità di dati con tempi di rilievo sensibilmente ridotti;
- **Fotogrammetria terrestre** impiegata per analizzare nel dettaglio gli affreschi realizzati sulle pareti interne;
- **Fotogrammetria aerea mediante UAV** adoperata per inquadrare e rilevare accuratamente la zona superiore del chiostro, come il colonnato collocato al primo piano e la copertura.

La scelta di tre tecniche di rilevamento è dovuta alla necessità di dover sopperire a problematiche esistenti quali ad esempio l'incapacità da parte del *laser scanner* terrestre

di acquisizione dati dettagliati circa la copertura, a causa del limitato cortile interno e della notevole altezza del chiostro.

5.3.1 Acquisizione Lidar terrestre

La prima fase fondamentale consiste nella progettazione dei centri di presa delle scansioni e si deve effettuare considerando sia la geometria sia la dimensione dell'oggetto da rilevare.

Il concetto di geometria è legato alla "scala di dettaglio"; infatti se si osserva un oggetto da vicino, il dettaglio che si può cogliere è sicuramente più elevato rispetto a quando l'oggetto è analizzato da lontano. La precisione con cui è possibile misurare la posizione di ogni punto non cambia, perché essa dipende solo dal tipo di *laser* utilizzato; ciò che cambia è il numero di punti acquisiti sulla stessa porzione dell'oggetto e la capacità di acquisire anche le piccole discontinuità presenti sull'elemento rilevato.

Dalla dimensione dell'oggetto, invece, dipende il numero di scansioni da effettuare. Se l'elemento ha dimensioni ridotte e non presenta più livelli, può essere sufficiente una sola scansione, mentre se come nel caso oggetto di studio ci sono le colonne, che generano coni d'ombra, è necessario effettuare più scansioni da punti differenti.

Come detto nel PARAGRAFO 2.1.2, ogni scansione effettuata è espressa in un proprio sistema di riferimento locale e per questo bisogna pianificare a priori il metodo che si intende utilizzare nella fase di allineamento o triangolazione di una serie di scansioni. La tecnica di allineamento utilizzata per il caso in esame è il metodo indiretto per punti omologhi; per tale motivo prima di effettuare le scansioni sono stati collocati i *target* (FIGURA 5.11) considerando la visibilità dai vertici di posizionamento delle stazioni totali (T500 e T400), e sono stati posizionati anche altri non visibili, utilizzabili durante il processo di registrazione delle scansioni con il *software* SCENE.



Figura 5.11- Foto dell'elemento oggetto di studio in cui si possono notare i target posizionati per la registrazione delle scansioni

Tuttavia nella fase di progettazione dell'acquisizione è necessario considerare che due scansioni devono avere almeno due *target* in comune, dato minimo per roto-traslare le nuvole di punti. Per migliorare le precisioni di unione si possono usare da quattro a più *target* in comune, avendo così la possibilità di eliminare qualche punto con residuo maggiore. I riferimenti utilizzati devono essere ben distribuiti nello spazio e devono circoscrivere l'oggetto da rilevare. Un ulteriore accorgimento da considerare in questa prima fase è quello di non allineare i centri di riferimento delle scansioni (FIGURA 5.12) in modo che il sistema non ruoti sul suo asse e risulti indeterminabile. (D. Bartolucci,2009)

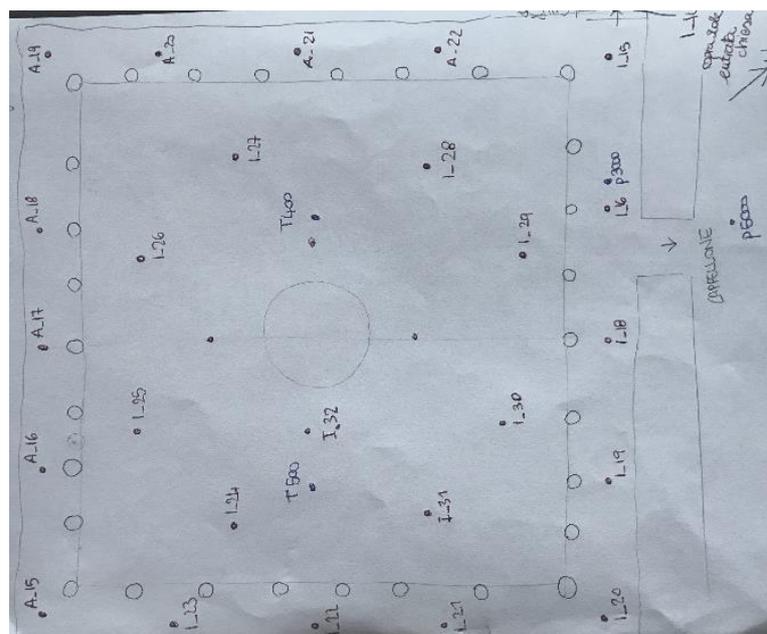


Figura 5.12- Eidotipo del chiostro con centri di scansione

Lo *step* successivo consiste nella collocazione dello strumento nei punti progettati precedentemente e dal *display* è possibile modificare i parametri di scansione. Bisogna definire la risoluzione, la qualità, l'area di scansione e in base a queste impostazioni lo strumento restituisce la durata prevista per l'acquisizione.

5.3.1.1 Laser scanner utilizzato

I *laser scanner* esistenti, attualmente, sul mercato possono avere precisioni da 0.5mm a 5cm, portate da 100 a 6000 m, risoluzione in funzione della distanza dell'oggetto e tipologia della misura. Gli strumenti utilizzati durante la campagna di rilievo sono stati due *laser scanner* FARO CAM2.



Figura 5.13- Laser scanner FARO CAM 2

Nella TABELLA 5.2 sono illustrate le principali caratteristiche dello strumento (scheda tecnica). Esso consente misurazioni rapide conservando un'elevata precisione. Inoltre, è caratterizzato da una straordinaria portabilità e autonomia (4,5 ore) e la presenza di *display touch-screen* ha permesso la semplificazione della messa in stazione dello strumento, consentendo l'impostazione dei parametri di acquisizione delle scansioni e la visualizzazione in tempo reale dei dati registrati.

Tabella 5.2- Caratteristiche strumento utilizzato

Caratteristiche FARO CAM 2	
Range Focus 3D X130	0.6-130 m
Velocità di misurazione	Fino a 976.000 punti/secondo
Errore di linearità	± 2 mm
Macchina fotografica a colori integrata	Fino a 70 milioni di pixel
Classe laser	1

Caratteristiche FARO CAM 2	
Peso	5.2 kg
Multi-sensor	GPS, bussola, sensore di altezza, compensatore, biassiale
Dimensioni dello scanner	240 x 200 x 100 mm
Controllo dello scanner	Tramite display touchscreen e WLAN

5.3.2 Acquisizione Fotogrammetria terrestre

L'acquisizione dei dati di rilievo si è effettuata mediante l'utilizzo della camera commerciale Canon EOS 5D Mark II (FIGURA 5.14), con caratteristiche illustrate nella TABELLA 5.3, dopo aver provveduto al posizionamento di un numero sufficiente di *marker* sulle pareti del chiostro.



Figura 5.14- Camera fotografica Canon EOS 5D Mark II

Tabella 5.3- Caratteristiche strumento utilizzato

Caratteristiche Canon EOS 5D Mark II	
Larghezza del sensore [mm]	36
Focale dell'obiettivo [mm]	14
Larghezza dell'immagine digitale [pixel]	5616
Altezza dell'immagine digitale [pixel]	3744

Sono stati acquisiti 470 fotogrammi, alcuni con asse della camera perpendicolare all'oggetto ripreso (FIGURA 5.15-A), altri invece con asse inclinato (FIGURA 5.15-B).



Figura 5.15- Fotogrammi acquisiti con asse della camere perpendicolare all'oggetto(A) e con asse inclinato (B)

5.3.2.1 Pianificazione rilievo

Prima di iniziare il rilevamento dei dati è necessario progettare la ripresa fotogrammetrica più idonea al caso in esame. Tale operazione è fondamentale poiché influenza tutte le fasi successive.

Innanzitutto si delinea la strumentazione da utilizzare e le posizioni con cui effettuare la presa.

L'oggetto di studio presenta geometrie e dimensioni complicate da rilevare e per tale motivo si è deciso di utilizzare l'approccio dei "fasci proiettivi" o "*bundle solution*" (FIGURA 5.16), che consiste nell'acquisizione di un gran numero di immagini riprese da diversi punti di vista e con assi della camera convergenti.

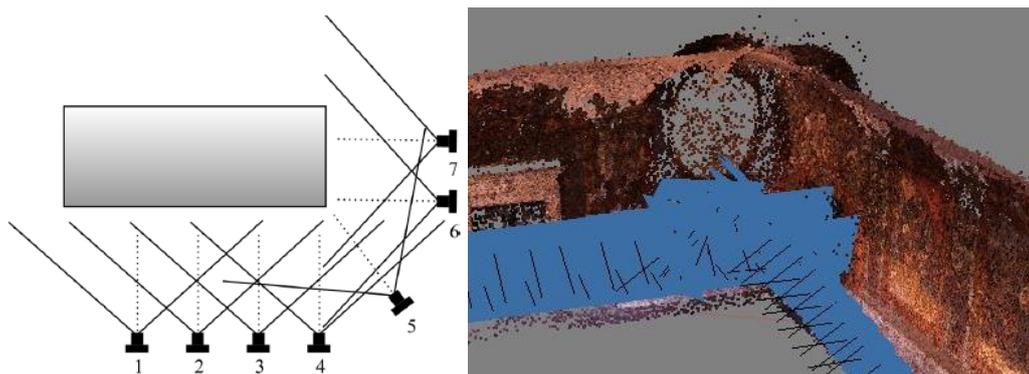


Figura 5.16- Schema teorico(A) e realizzazione (B) dell'approccio dei fasci proiettivi

Note le posizioni con cui si deve effettuare la presa e la strumentazione da utilizzare si definisce l'accuratezza e il GSD (*Ground Saample Distance*)

Accuratezza è legata alla qualità del risultato ed esprime il grado di vicinanza delle osservazioni di una grandezza rispetto al valore assunto come riferimento per la grandezza (Linee Guida DIATI PoliTo). Può essere espressa con la seguente formula:

$$\sigma_G = 0.2[mm] \cdot n \quad [5.7]$$

n è la scala di rappresentazione, mentre σ_G è l'errore di graficismo ammissibile.

Ammettendo una scala nominale del rilievo pari a 1:100 l'errore σ_G ammissibile è pari a 0.02[m].

GSD, come illustrato nel PARAGRAFO 2.2.6, è utilizzato soprattutto per la definizione del passo delle nuvole di punti estratte dalla fotogrammetria. (Linee Guida DIATI PoliTo) Il GSD è inversamente proporzionato alla definizione di un'immagine, infatti più piccolo è il valore del GSD, tanto più dettagliata è l'informazione contenuta nel relativo *pixel* e viceversa.

Il parametro GSD può essere calcolato con la FORMULA [2.6], riportata nel PARAGRAFO 2.2.6:

$$GSD = \frac{D \cdot d_{pixel}}{c} \quad [2.6]$$

D indica la distanza tra il centro di presa del fotogramma e l'oggetto rilevato; d_{pixel} è la dimensione del *pixel* e infine c è la distanza principale.

Per poterlo calcolare è necessario definire inizialmente i seguenti parametri, rappresentati in FIGURA 5.17:

- S_w : larghezza del sensore digitale della fotocamera [mm];
- F_R : focale dell'obiettivo utilizzato per le prese fotogrammetriche [mm];
- D : distanza tra il centro di presa e l'oggetto [m];
- imW : larghezza dell'immagine digitale ottenuta [*pixel*];
- imH : altezza dell'immagine digitale ottenuta [*pixel*].

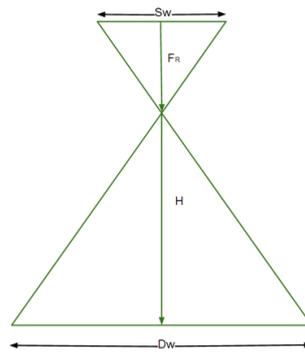


Figura 5.17- Parametri necessari per calcolare il GSD

Molti di questi parametri dipendono dalla camera digitale utilizzata e per tale motivo è necessario definire il modello della macchina fotografica prima di calcolare il GSD.

Si è scelto di adoperare una reflex professione, una Canon EOS 5D Mark II. Nella TABELLA 5.4 sono state riportate le principali caratteristiche illustrate nella scheda tecnica e il calcolo del GSD effettuato utilizzando il foglio di calcolo Excel fornito da Pix4D.

Tabella 5.4- Calcolo del GSD mediante il file Excel fornito da Pix4D

Rilievo fotogrammetrico terrestre	
Modello	Canon EOS 5D Mark II
Sw [mm]	36
Fr [mm]	14
ImW [pixel]	5616
ImH [pixel]	3744
D[m]	3.5
GSD di progetto [mm/pixel]	1.6

5.3.3 Acquisizione Fotogrammetria aerea da UAV

I dati di *input* per l'elaborazione 3D digitale sono stati acquisiti utilizzando il drone DJI Mavic Pro, in grado di girare video in 4k. Proprio per questo motivo si è scelto di acquisire non più fotogrammi, come nel caso precedente, ma dei video dai quali successivamente sono stati estratti i *frame* mediante il *software* MATLAB.

I video realizzati sono stati 5 in formato .MOV, dei quali ne sono stati utilizzati 3 per l'elaborazione e generazione del modello tridimensionale. Le riprese sono state effettuate

in modalità manuale, prima del posizionamento dei *marker* sulle pareti del bene culturale e non rispettando gli scenari ideali della *structure from motion*, soprattutto nella ripresa di angoli quando si è fatto imbarcare il drone, ottenendo così diversi fotogrammi (FIGURA 5.19) con lo stesso centro di presa, ma diverso assetto angolare.

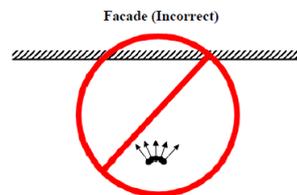


Figura 5.18- Configurazione errata-Tutorial PhotoScan



Figura 5.19- Unione di più fotogrammi estratti dai video

Tale configurazione (FIGURA 5.18) non è accettabile e per questo prima di procedere con l'elaborazione dei dati è stato necessario selezionare a uno a uno i *frame* estratti dai video.

5.3.3.1 UAV utilizzato

La pianificazione del rilievo è un'operazione fondamentale, poiché influenza tutte le fasi successive. Innanzitutto si è scelto il DJI Mavic Pro come sistema SAPR multicottero da utilizzare, un UAV sempre della classe VTLO (*Vertical Take-off and landing*), commerciale, più compatto rispetto a quello utilizzato nel rilievo di inquadramento, Phantom 4.

Il DJI Mavic Pro (FIGURA 5.20) è un drone di 700 grammi con bracci ed eliche ripiegabili e autonomia di volo di 27 minuti. Grazie al ricevitore GPS- GNSS è in grado di effettuare un volo preimpostato e adoperando i due sensori frontali è in grado di evitare da solo ostacoli. Inoltre, è dotato di sensori per il posizionamento verticale “*optical flow*” utili quando si vola a bassa altezza o in ambienti *indoor* e “*Terrai Follow*” impiegati per mantenere un’altezza prestabilita anche quando il terreno presenta differenti pendenze. Il radiocomando ha un *range* di funzionamento di 4 km e può ospitare nella parte inferiore uno *smartphone* per visualizzare le immagini o i video in tempo reale. Esso può anche essere sostituito da uno *smartphone* e sfruttando il *wifi* si può pilotare il drone usando gli *stick* virtuali (FIGURA 5.21).



Figura 5.20- Drone DJI MAVIC PRO



Figura 5.21- Drone pilotato mediante stick virtuali

6 Elaborazione dati

I primi sistemi fotogrammetrici digitali si sono sviluppati a partire dalla metà degli anni '80 e hanno subito una continua diffusione. Il passaggio alla fotogrammetria digitale ha determinato l'utilizzo delle immagini digitali e dei nuovi algoritmi che consentono di raggiungere un elevato grado di automazione in numerose fasi del processo fotogrammetrico.

Un processo fotogrammetrico digitale può essere schematizzato come in FIGURA 6.1

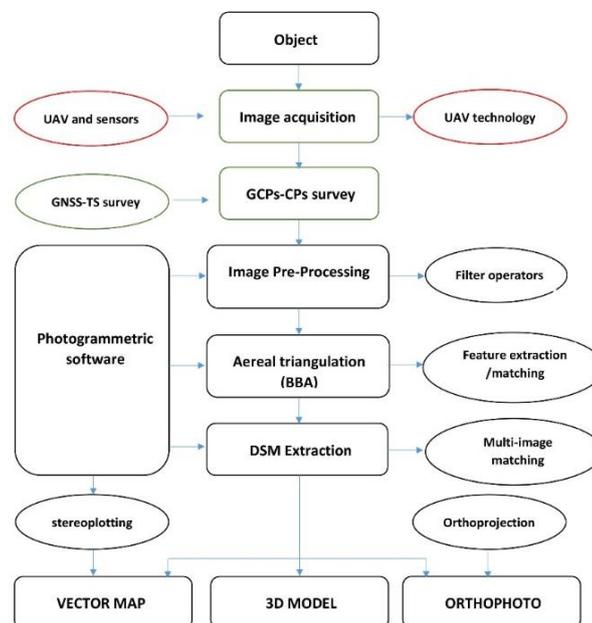


Figura 6.1-Schematizzazione processo fotogrammetrico- Dispense D. Marenchino

6.1 Elaborazione dati a scala territoriale

Per l'elaborazione dei dati si sono utilizzati i *software* Agisoft Photoscan e Pix4D Mapper, entrambi commerciali, e VisualSFM, *open source*, che processano le immagini con gli algoritmi di *Structure from Motion (SfM)* e di *Stereo Matching*. Si è pensato di adoperare programmi differenti in modo da verificarne le potenzialità sia in fase di *processing* che in termini di risultati.

I *file* di *output* generati sono stati:

- Nuvola densa di punti in formato LAS;

- *Mesh 3D texturized* in formato OBJ e PLY (con *texture* in formato JPG);
- DSM in formato TIFF
- Ortomosaico in formato TIFF.

6.1.1 Il software Pix4D mapper

Il software Pix4D mapper permette di generare modelli tridimensionali usando differenti tipologie di immagini, quali ad esempio aeree con un piano di volo a griglia, nadirali o oblique, fotogrammi terrestri, o ancora foto acquisite con differenti camera multispettrali o RGB. A seconda della tipologia sopra elencata, il programma, in fase di generazione del nuovo progetto, permette la selezione del *template* che meglio si adatta al caso in questione.

Dal momento che i fotogrammi sono stati acquisiti mediante due differenti voli, si è scelto di utilizzare il *template- 3D Models*, generando così un unico modello.

In fase di caricamento delle immagini è fondamentale indicare sia il sistema di coordinate delle immagini sia il modello della camera utilizzata durante il rilievo. Al termini di tale processo il *software*, utilizzando le informazioni contenute nei dati EXIF dell'immagine, stima in prima approssimazione il modello della camera.

Il *software* permette di raggiungere i risultati cercati in breve tempo mediante le tre fasi fondamentali, schematizzate in FIGURA 6.2 (User Manual, Pix4D MAPPER 3.2):

- *Initial processing*: calibrazione della camera e orientamento esterno;
- *Point densification*: inseguito alla calibrazione della camera crea la nuvola di punti densa:
- *DSM e Orthomosaic*: generazione dei file di output.

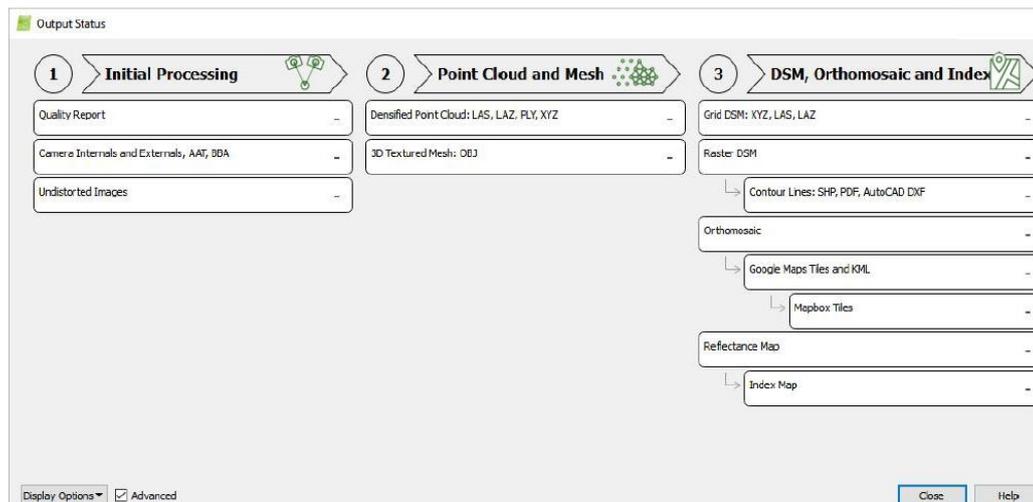


Figura 6.2- Fasi di elaborazione e possibili output

Al termine di ogni processo si devono verificare i risultati ottenuti e per tale motivo si utilizza il *quality report* che viene generato automaticamente a fine processo.

6.1.1.1 STEP 1- Inizial processing

La prima fase del processo consente di determinare, in maniera approssimata, i parametri interni ed esterni della camera fotografica. Successivamente tali valori sono affinati mediante il “*Bundle Block Adjustment (BBA)*” per ottenere una ricostruzione ottimale dell’oggetto rilevato.

Durante la prima fase del processo, le immagini sono collocate reciprocamente in maniera approssimata in un sistema di riferimento non noto. Infatti, il *software* attraverso i suoi algoritmi individua su ogni immagine un numero elevato di *keypoint* (punto chiave) e in seguito al *matching* dei *tie points*, è in grado di stimare la posizione relativa dei centri di presa dei fotogrammi e di generare un modello discreto denominato “nuvola sparsa” spazialmente relazionata alle posizioni e agli orientamenti delle fotocamere.

I parametri da definire sono:

- **Keypoints Image Scale:** parametro che consente di definire il numero di *features* da individuare su ogni immagine. Può essere “*full*”, “*rapid*” o “*custom*”. Per ottenere un risultato con precisione maggiore si è utilizzato “*full*” con “*image scale*” pari a 1, ovvero l’immagine originale non ridotta di dimensioni;

- **Matching:** delinea come si deve effettuare il *match* tra le immagini. Si seleziona “*Matching image pairs*” o il “*Matching Strategy*” e la tipologia di acquisizione del dato, “*Free Flight or terrestrial*”, “*Arial Gridor Corridor*”;
- **Calibration:** si delineano le operazioni di processing, infatti si definisce il numero di *keypoints* da estrarre, il metodo di calibrazione da adottare e i parametri da calibrare, l’aggiunta di altri *match* oltre quelli realizzati nella prima fase “*general*” per ottenere una precisione maggiore. Poiché le telecamere collocate sugli UAV sono molto piccole e maggiormente sensibili alla temperatura o variazioni che influenzano la calibrazione delle stesse, nel caso oggetto di studio si è deciso di determinare e ottimizzare sia i parametri interni che esterni. La ri-ottimizzazione è stata effettuata inoltre con il metodo del “*Bundle Adjustment*”.

Il risultato di questo processo (FIGURA 6.3, FIGURA 6.9) è costituito da una nuvola “sparsa” di punti tridimensionali, posizionati in relazione ai centri di presa dei fotogrammi, e con le seguenti caratteristiche (TABELLA 6.1)

Tabella 6.1- Caratteristiche nuvola sparsa di punti

Risultati generazione della nuvola sparsa	
Numero di immagini	440
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale:1
Matching image Pairs	Free Flight or Terrestrial
Calibration	Standard, All, Bundle Adjustment classic
Alignment time	2 ore
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti

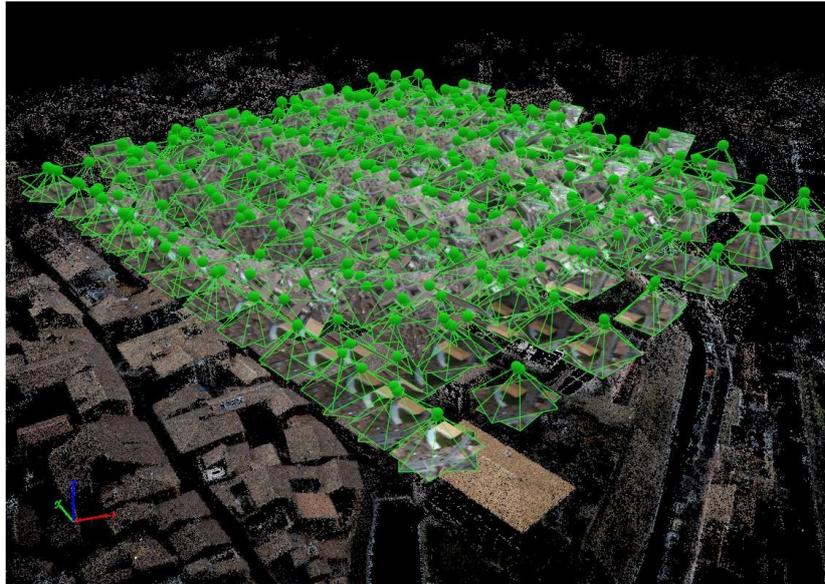


Figura 6.3- Allineamento dei fotogrammi e generazione della nuvola sparsa

Il fotogramma è allineato solo se il numero di punti fondamentali individuati, le “*features*”, su di esso risulta maggiore di 2000 e per tale motivo è fondamentale garantire in fase di acquisizione una sovrapposizione dei fotogrammi di almeno del 60% del lato effettivo della foto.

L’ultima fase è la georeferenziazione dei fotogrammi mediante l’inserimento delle coordinate dei GCP-*Ground Control Point*, attraverso file .txt, all’interno del software e collimazione dei punti sulle immagini stesse.

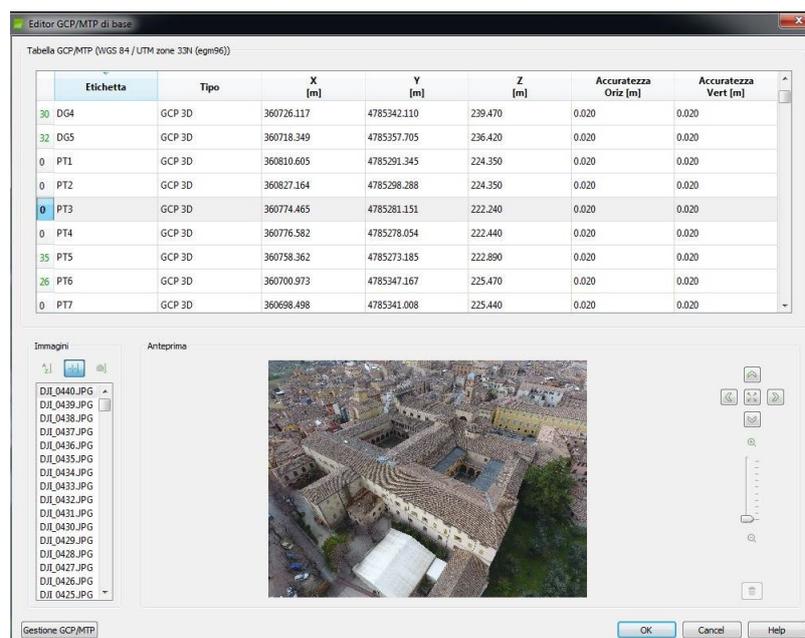


Figura 6.4- Collimazione manuale dei marker

La collimazione di questi punti sulle immagini è effettuata inizialmente in maniera manuale e successivamente in modo semi- automatica. Infatti, inizialmente si collimano i *marker* mediante l'*editor* di base dei GCP (FIGURA 6.4), almeno due punti d'appoggio su tre fotogrammi; in seguito si effettua il "*rematch and optimize*" per collocare i centri di presa delle fotografie e la nuvola sparsa di punti nel sistema reale di riferimento. Il *software* è in grado di determinare in maniera automatica la posizione degli altri GCP nelle differenti immagini. Nonostante ciò, occorre verificare manualmente la corretta posizione dei punti d'appoggio individuati dal programma. Ogni marker deve essere collimato in almeno due fotogrammi, per migliorare la qualità almeno in 4-5 immagini. In questa fase di collimazione è molto importante utilizzare un alto livello di zoom per ridurre al minimo gli errori. Dopo aver effettuato la collimazione dei marker su tutte le immagini si effettua nuovamente il "*rematch and optimize*" per stimare in maniera più precisa i parametri della camera fotografica (FIGURA 6.6), eliminando la deformazione e minimizzando sia l'errore di "proiezione" sia l'errore dovuto al non allineamento del sistema di coordinate. (User Manual, Pix4D MAPPER 3.2)

Terminata la prima fase bisogna effettuare le seguenti verifiche (FIGURA 6.5) per controllare che tutte le procedure sopra elencate siano state realizzate correttamente:

- Immagini orientate devono essere almeno il 95%;
- Ottimizzazione parametri della camera: la differenza tra i parametri della camera ottimizzati e quelli iniziali deve essere minore del 5%. In caso contrario, occorre utilizzare i parametri ottimizzati come valori iniziali per aumentare la qualità del modello.

🔍 Images	median of 54311 keypoints per image	✔
🔍 Dataset	440 out of 440 images calibrated (100%), all images enabled	✔
🔍 Camera Optimization	1.79% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✔
🔍 Matching	median of 23192.1 matches per calibrated image	✔
🔍 Georeferencing	yes, 17 GCPs (17 3D), mean RMS error = 0.017 m	✔

Figura 6.5- Quality Check estratto dal report

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	Distorsioni radiali			Distorsioni tangenziali	
				R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2285.722 [pixel] 3.610 [mm]	2000.006 [pixel] 3.159 [mm]	1500.003 [pixel] 2.369 [mm]	-0.001	-0.002	0.000	-0.001	-0.001
Optimized Values	2326.660 [pixel] 3.675 [mm]	1966.330 [pixel] 3.106 [mm]	1496.493 [pixel] 2.364 [mm]	0.006	-0.018	0.010	0.000	-0.000

Figura 6.6- Stima iniziale e successiva ottimizzazione dei parametri della camera fotografica

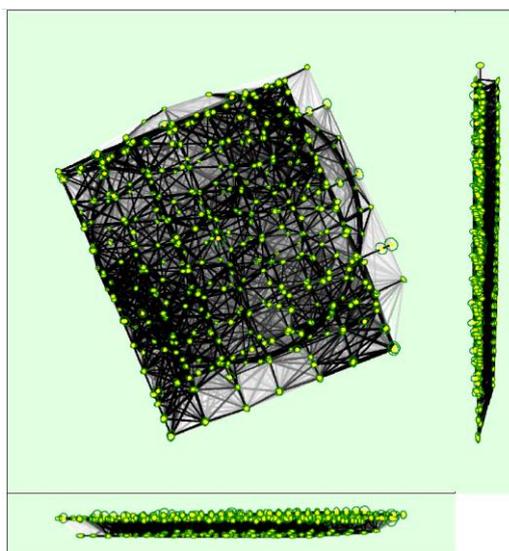


Figura 6.7- Stima della posizione della camera e valutazione del numero di matching dei keypoints tra le immagini

Un'ulteriore verifica da effettuare è relativa ai residui, ovvero alla differenza fra le coordinate inserite nel *software* attraverso il *file* .txt e le rispettive coordinate calcolate dal programma in seguito all'allineamento delle immagini e alla collimazione dei punti sulle stesse.

Tali valori devono rispettare valori limiti, determinati da EuroSDR o dalle formule empiriche Lingua (dispensa LINGUA)

Regole empiriche **EuroSDR**, come detto nel PARAGRAFO 2.2.7:

$$\sigma_{XY} = 1.5 \cdot M \cdot \sigma_{xy} = 1.5 \cdot GSD = 1.5 \cdot 0.026 = 0.039 \text{ m} \quad [6.1]$$

$$\sigma_Z = 2 \cdot M \cdot \sigma_{xy} = 2 \cdot GSD = 2 \cdot 0.026 = 0.052 \text{ m} \quad [6.2]$$

Il calcolo sopra citato è valido esclusivamente in caso di presa con asse perpendicolare all'oggetto rilevato. Il calcolo dei valori limiti in presenza di immagini oblique è più complesso.

Di seguito (TABELLA 6.2) si riportano i valori dei residui nelle direzioni principali relativi a ogni GCP collimato sulle immagini.

Per verificare ulteriormente la bontà del rilievo alcuni GCP sono stati trasformati in *Check Point*, punti di controllo di coordinate incognite. Il *software* calcola le coordinate e successivamente effettua il confronto con quelle riportate nel *file* di testo restituendo infine i residui (TABELLA 6.3).

Tabella 6.2- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)

Marker	X Error [m]	Y Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
DTM1	0,025	0,004	-0,04	0,047
DTM3	0,003	0,017	0,044	0,047
PT5	-0,03	-0,012	0,027	0,042
PT6	-0,008	0,018	0,011	0,023
PT8	-0,012	0,007	-0,032	0,035
PT9	0	-0,005	-0,029	0,029
PT10	-0,006	0,009	-0,003	0,011
DG1	-0,016	-0,01	-0,01	0,021
DG3	-0,025	-0,008	-0,025	0,036
DG4	0,035	0,016	-0,017	0,042
DG5	0,04	-0,02	0,025	0,051
M001	-0,002	-0,003	-0,007	0,008
M002	0,001	-0,018	0,021	0,028
M004	-0,011	-0,002	0,016	0,020
M005	-0,001	0,001	0,013	0,013
M006	-0,004	-0,011	0,002	0,012
MM007	0,006	0,004	-0,025	0,026
Mean	-0,0002	-0,0006	-0,0016	
Sigma	0,018	0,011	0,023	
RMS Error	0,018	0,011	0,024	
Residui Max XYZ [m]	Residui Min XYZ [m]	Media [m]	SQM [m]	
0,051	0,008	0,029	0,014	

Tabella 6.3- Residui dei CP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)

Marker	X Error [m]	Y Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
DTM4	-0,0036	-0,0022	0,0221	0,022
DG2	0,0115	-0,044	0,0039	0,046
M003	0,0307	0,0502	-0,0231	0,063
M00051	-0,0239	0,0008	-0,1363	0,138
Mean	0,0036	0,0011	-0,0333	
Sigma	0,02	0,033	0,061	
RMS Error	0,02	0,033	0,07	
Residui Max [m]	Residui Min [m]	Media [m]	SQM [m]	
0,138	0,022	0,067	0,05	

Si può procedere con il confronto (TABELLA 6.4) tra i residui restituiti da Pix4D e i valori limiti sopra calcolati, per verificare se le operazioni condotte fino a questo momento hanno garantito un prodotto accurato e preciso.

Tabella 6.4- Confronto tra i residui reali e i valori limiti ammissibili

	Precisione del modello	Limite di progetto (EuroSDR)	
σ_x [m]	0.018	0.039	VERIFICATO
σ_y [m]	0.011	0.039	VERIFICATO
σ_z [m]	0.023	0.052	VERIFICATO

Gli scarti residui massimi ammissibili sui GCP e sui CP dipendono dalla tipologia dell'ortofoto e dalla sua scala di rappresentazione. Nella FIGURA 6.8 si riportano i valori che devono essere rispettati per almeno il 95% dei GCP e dei CP utilizzati. (Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala)

Tipo di ortofoto	Scala 1:5000				Scala 1:2000				Scala 1:1000				Scala 1:500			
	GCP		CP		GCP		CP		GCP		CP		GCP		CP	
	v_{EN} [m]	v_H [m]														
B	1.50	1.20	2.60	1.05	0.60	0.45	1.05	0.70	0.30	0.25	0.55	0.35	0.20	0.15	0.25	0.18
A1/A2	1.00	0.80	1.75	0.70	0.40	0.30	0.70	0.50	0.20	0.15	0.35	0.25	0.10	0.10	0.17	0.12

Figura 6.8- Scarti residui massimi ammissibili sui GCP e CP- Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala

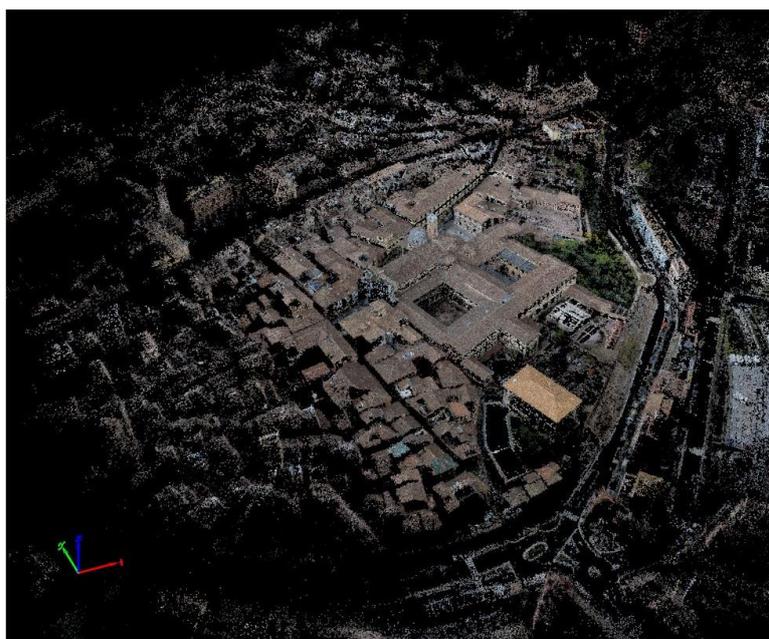


Figura 6.9- Nuvola sparsa, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017

6.1.1.2 STEP 2- Point densification

Le successive elaborazioni permettono di incrementare il numero di punti del modello tridimensionale generato nella fase precedente, per ottenere *output*, quali DSM o Ortofoto, con una precisione maggiore.

In questa fase i parametri da definire sono:

- **Point cloud:**
 - **Image scale**, definisce la scala che si attribuisce all'immagine utilizzata dagli algoritmi per individuare altri punti 3D. Si possono selezionare i valori 1, ½, ¼... che condizionano i tempi di elaborazione, il numero di punti e la qualità dei risultati. Nell'elaborazione in esame si è utilizzato ½ e non 1, perché in quest'ultimo caso si calcolerebbero un numero maggiore di punti, con tempi di elaborazione lunghi senza però migliorare la qualità dei risultati;
 - **Multiscale**: opzione che permette di migliorare ulteriormente il prodotto finale, infatti il *software* calcola altri punti applicando alle immagini tutte le altre scale successive a quella scelta nel parametro precedentemente;
 - **Point Density**: permette di determinare la densità della nuvola "densa", ovvero la quantità dei punti 3D individuati ogni (x/scala dell'immagine) pixel. Impostando il valore High (x=8) e considerando la scala precedente, si è calcolato un punto 3D ogni 16 *pixel* dell'immagine originaria;
 - **Minimum Number of Matches**: si definisce il minimo numero di proiezioni valide di ogni punto 3D sulle immagini. Ogni punto deve essere proiettato correttamente in almeno 3 immagini, a garanzia della robustezza del metodo.
 - **Export**: si delineano i formati di esportazione. Si è utilizzato il formato .las perché dà informazioni sia sulla posizione X,Y,Z sia sul colore di ogni punto della nuvola densa.
- **3D Textured Mesh:**
 - **Resolution**: si definisce la risoluzione della mesh.
 - **Export**: si definisce il formato di esportazione della mesh. Si è scelto OBJ poiché consente di fornire informazioni sulle posizione X,Y,Z di ogni vertice della *mesh*.

Gli *output* (FIGURA 6.10eFIGURA 6.11) generati dunque in questa fase presentano le seguenti caratteristiche (TABELLA 6.5)

Tabella 6.5- Caratteristiche nuvola densa di punti

Risultati generazione della nuvola densa di punti	
Image Scale	Multiscale, 1/2
Point Density	High
Minimum Number of matches	3
Number of 3D Densified Points	90842558
Tempo necessario alla creazione- nuvola densa	10 ore
Tempo necessario alla creazione- mesh	1ora e 21 minuti
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti



Figura 6.10- Nuvola densa, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017

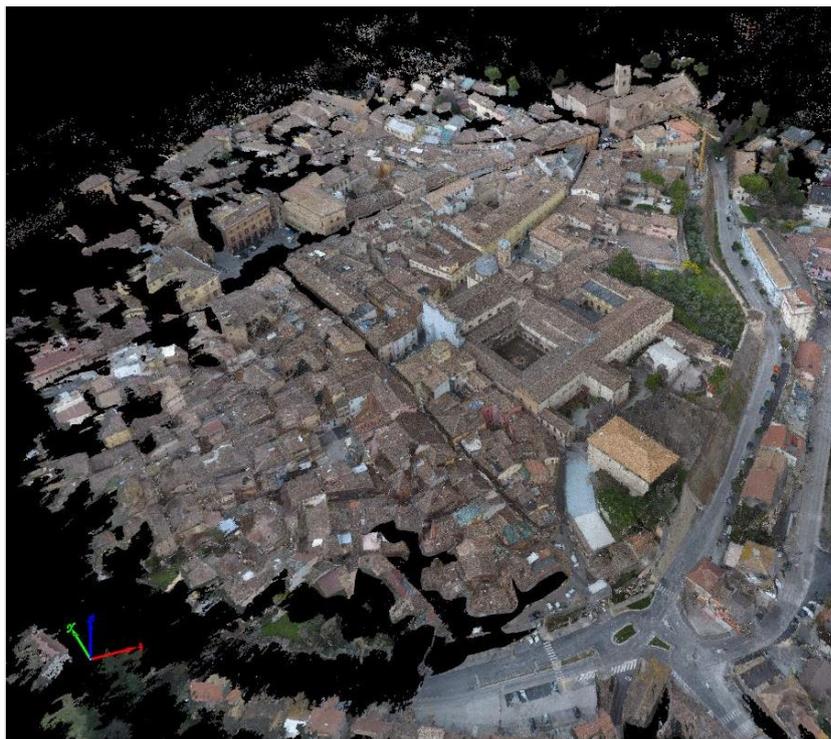


Figura 6.11- Mesh3D texturized, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017

6.1.1.3 STEP 3-DSM e Orthomosaic

La terza e ultima fase permette la generazione del DSM e dell'ortomosaico, considerando un GSD medio.

Lo scopo principale del DSM consiste nel descrivere la superficie fisica del territorio, compresi i manufatti e la vegetazione.

L'ortomosaico è un elaborato che si ottiene dall'unione delle immagini trasformate in una proiezione centrale, dopo aver eliminato le distorsioni prospettiche. L'ortomosaico permette la determinazione dei punti solo in planimetria.

I *file* di *output* del processo possono essere salvati in vari formati (GeoTIFF, LAS, LAZ, XYZ, PLY importabili nei *software* CAD, di fotogrammetria e di applicazioni GIS).

L'ortofoto (FIGURA 6.12) presenta lungo i bordi zone nere o molte distorte a causa delle insufficienti informazioni ricavabili dalle immagini, mentre nella parte centrale risulta corretta e ortoproiettata. L'ortofoto ha dimensione del *pixel* pari a 0.04 m.

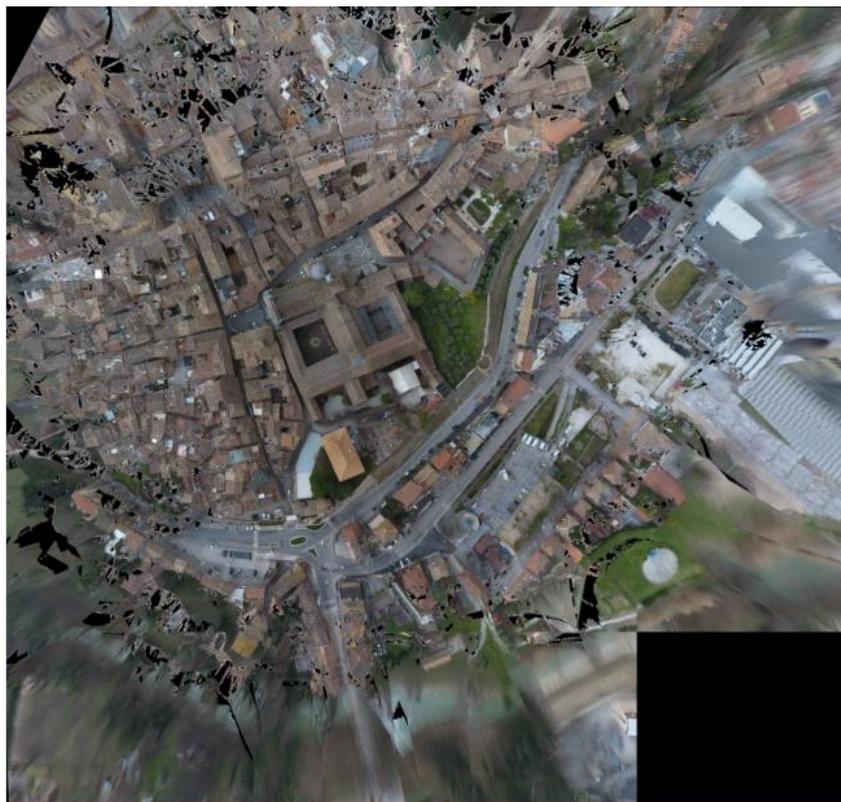


Figura 6.12- Ortofoto, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017

Per visualizzare il DSM (FIGURA 6.13) si è importato il *file* .TIFF generato da Pix4D in ArcMap e inserendo una scala cromatica lo si rende di facile lettura. Anche in questo caso si riscontra lo stesso problema dell'ortofoto.

Il DSM generato è coerente con l'ortofoto sopra mostrato, in quanto presenta *pixel* della stessa dimensione.

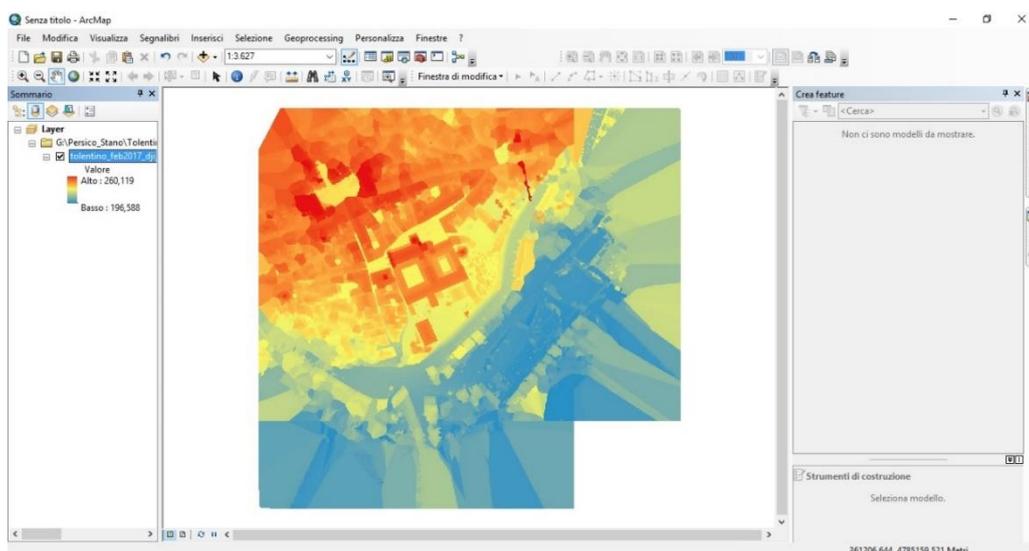


Figura 6.13- DSM, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017

Di seguito si riporta il grafico, FIGURA 6.14, contenente le tempistiche in percentuali di tutti i principali passaggi effettuati per giungere a un risultato corretto.

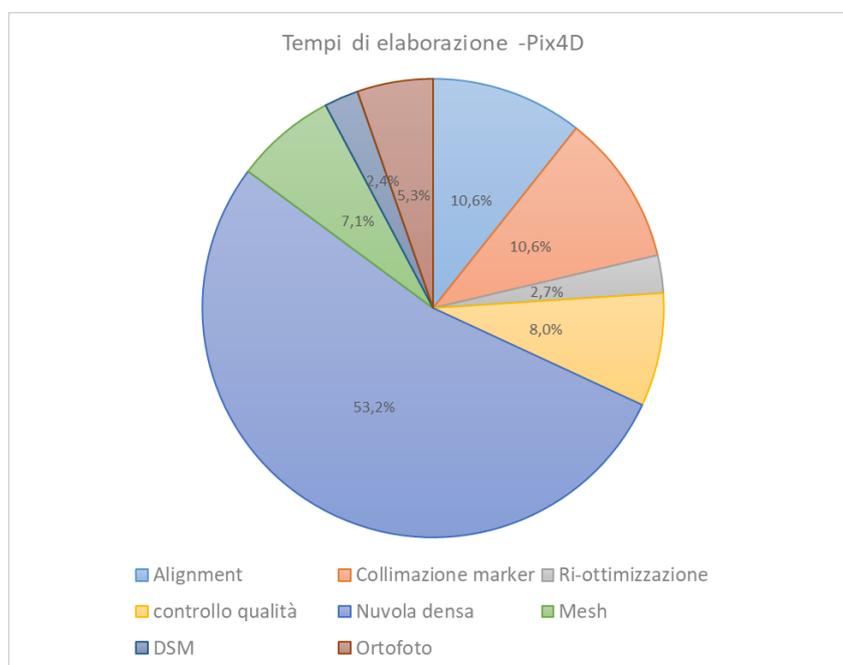


Figura 6.14- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio

6.1.2 Il software Agisoft PhotoScan

Il software PhotoScan esegue l'elaborazione fotogrammetrica di immagini digitali usando i principi della *Structure from Motion* e consente la generazione di un modello tridimensionale.

6.1.2.1 Allineamento dei fotogrammi

I fotogrammi selezionati per la ricostruzione del modello tridimensionale devono essere caricati nel progetto. A questo punto bisogna impostare il sistema di coordinate di riferimento e verificare la congruenza con il sistema adoperato per il calcolo delle coordinate dei *marker*. Nel caso in esame, i fotogrammi presentano le coordinate del loro centro di presa espresse nel sistema WGS 84; infatti esse vengono calcolate nel momento della presa mediante il GNSS presente sul drone. Poiché per la rappresentazione cartografica si utilizza il sistema ufficiale denominato WGS 84/UTM-zone 33N, le coordinate sopra citate vengono convertite mediante il comando "convert".

Successivamente si procede con l'allineamento delle immagini per generare una prima nuvola di punti definita "sparsa". Il comando "*Align Photos*" consente di stimare la posizione reciproca dei fotogrammi al momento della presa in un sistema di riferimento scelto dal *software*. Questa stima è eseguita usando esclusivamente le informazioni derivanti dalle immagini. La precisione di tale stima scaturisce da numerosi fattori come la percentuale di sovrapposizione tra le foto consecutive o la forma della superficie oggetto in esame. (Agisoft PhotoScan User Manual, Version 1.2)

Il *software*, utilizzando gli algoritmi (CAPITOLO 3), individua su ogni immagine dei punti "*features*" e successivamente determina fra questi i punti omologhi, ovvero punti presenti in più fotogrammi.

Il risultato finale di questa operazione è costituito da una nuvola sparsa (FIGURA 6.15) di punti collocata in relazione alle posizioni dei centri di presa dei fotogrammi. Di fatto, i punti costituenti la nuvola si ottengono dall'intersezione dei raggi omologhi.

Tabella 6.6- Caratteristiche nuvola sparsa di punti

Risultati generazione della nuvola sparsa	
Numero di camere	440
Accuracy	High
Pair preselection	Disabled
Matching time	12 ore 29 minuti
Alignment time	2 ore e 42 minuti
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti

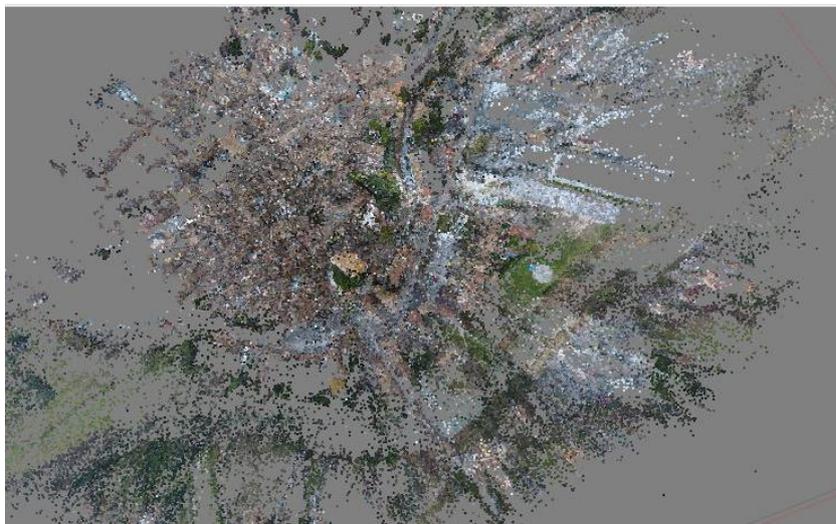


Figura 6.15- Nuvola sparsa, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017

6.1.2.2 Georeferenziazione

La georeferenziazione del modello è uno *step* importante, perché molte operazioni come la creazione di modelli digitali del terreno, la misura di distanze o volumi si possono effettuare solo se il modello è vincolato a un sistema di riferimento noto. Inoltre, nella fase di allineamento posso verificarsi degli errori che possono produrre deformazioni non lineari del modello finale. Per tale motivo, per eliminare il disallineamento del modello lineare si utilizza una trasformazione lineare a 7 parametri, determinabili utilizzando punti di coordinate note, mentre per ridurre al minimo l'errore dovuto alle deformazioni non lineari si ri-ottimizza l'allineamento, migliorando la posizione stimata della nuvola "sparsa" e i parametri della fotocamera. (Agisoft PhotoScan User Manual, Version 1.2)

Il passo successivo, quindi, consiste nella georeferenziazione del modello tridimensionale mediante l'inserimento delle coordinate dei GCP-*Ground Control Point*, contenute in un *file .txt*, all'interno del *software* e la loro collimazione sulle immagini.

La collimazione di questi punti sulle immagini si effettua in un primo momento in maniera manuale e successivamente semi-automatica; infatti in seguito all'inserimento di almeno tre punti d'appoggio su tre fotogrammi, il *software* è in grado di determinare in maniera automatica la posizione degli altri GCP nelle successive immagini.

A questo punto l'operatore deve verificare la corretta stima della posizione dei marker e renderli attivi qualora lo ritenesse opportuno. (FIGURA 6.16)



Figura 6.16- Distribuzione dei GCP nell'area oggetto di studio

Terminata la fase di collimazione è consigliabile una ri-ottimizzazione dei parametri interni ed esterni della camera fotografica, mediante il comando “*Optimize cameras*”, in modo da eliminare le deformazione minimizzando sia l’errore di “proiezione” (corrisponde alla distanza dell’immagine tra il punto proiettato e quello misurato) sia l’errore dovuto al non allineamento del sistema di coordinate.

Nelle TABELLA 6.7 e TABELLA 6.8 si riportano i valori stimati dal *software* considerando:

- F_x, F_y lunghezza focale misurata in *pixel*
- X_0, Y_0 sono le coordinate del punto principale
- K_1, K_2, K_3, K_4 coefficienti di distorsione radiale
- P_1, P_2, P_3, P_4 coefficienti di distorsione tangenziale

Tabella 6.7- Stima iniziale dei parametri della camera fotografica

FC330(3.61mm)	
Camera type	Frame (4000 x 3000)
<i>Pixel size</i> [mm]	0.00156 x 0.00156
Focal lenght [mm]	3.61
F_x	2311.25
F_y	2311.25
X_0	2000
Y_0	1500
$K_1= K_2= K_3= K_4$	0
$P_1= P_2= P_3= P_4$	0

Tabella 6.8- Ottimizzazione dei parametri della camera fotografica

FC330(3.61mm)	
Camera type	Frame (4000 x 3000)
Pixel size [mm]	0.00156 x 0.00156
Focal length [mm]	3.61
F_x	2325.02
F_y	2330.66
X_0	1964.75
Y_0	1497.71
K_1	0.01057
K_2	-0.03515
K_3	0.03708
K_4	-0.01459
P_1	0.00052
P_2	-0.00035
P_3	0.73432
P_4	0

Giunti a questa fase dell'elaborazione, è necessario controllare gli scarti delle coordinate dei GCP, che indica come i *marker* sono stati inseriti o modificati dall'utente in seguito al posizionamento automatico da parte del programma. Generalmente si controllano tali errori (TABELLA 6.9) e non gli errori delle stime delle posizioni delle camere, in quanto le coordinate GCP vengono misurate con un'accuratezza significativamente maggiore rispetto ai dati GNSS relativi alla posizione della camera al momento della presa fotogrammetrica. Per verificare ulteriormente la bontà del rilievo alcuni GCP sono stati trasformati in *Check Point*, punti di controllo di coordinate incognite. Il *software* calcola le coordinate e successivamente effettua il confronto con quelle riportate nel *file* di testo restituendo infine i residui (TABELLA 6.10).

Tabella 6.9- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)

Marker	XY Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
DG1	0,015	-0,019	0,024
DG3	0,027	0,029	0,040
DG4	0,044	0,041	0,060
DG5	0,033	-0,03	0,045
DTM1	0,014	0,061	0,063
DTM3	0,016	-0,039	0,042

PT10	0,006	0,013	0,014
PT4	0,009	-0,034	0,035
PT5	0,017	-0,036	0,040
PT6	0,019	-0,023	0,030
PT7	0,026	0,005	0,026
PT8	0,022	0,022	0,031
PT9	0,019	0,047	0,051
M001	0,005	0,002	0,005
M002	0,024	-0,004	0,024
M004	0,012	-0,024	0,027
M005	0,018	-0,019	0,026
MM007	0,007	0,015	0,017
M006	0,007	0,0004	0,007
RMS Error	0,021	0,029	0,032
Residui Max XYZ [m]	Residui Min XYZ [m]	Media [m]	SQM [m]
0,063	0,007	0,032	0,016

Tabella 6.10- Residui dei CP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)

Marker	XY Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
DG2	0,031	-0,029	0,043
DTM4	0,023	-0,082	0,085
PT3	0,102	-0,049	0,113
M00051	0,01	0,138	0,138
M003	0,034	-0,026	0,043
RMS Error	0,051	0,077	0,092
Residui Max XYZ [m]	Residui Min XYZ [m]	Media [m]	SQM [m]
0,138	0,043	0,084	0,042

Si può procedere con il confronto (TABELLA 6.11) tra i residui restituiti da PhotoScan e i valori limiti sopra calcolati, per verificare se le operazioni condotte fino a questo momento hanno garantito un prodotto accurato e preciso.

Tabella 6.11- Confronto tra i residui reali e i valori limiti ammissibili

	Precisione del modello	Limite di progetto	
σ_x [m]	0.021	0.039	VERIFICATO
σ_y [m]	0.029	0.039	VERIFICATO
σ_z [m]	0.035	0.052	VERIFICATO

Gli scarti residui massimi ammissibili sui GCP e sui CP dipendono dalla tipologia dell'ortofoto e dalla sua scala di rappresentazione. Nella FIGURA 6.17 si riportano i valori che devono essere rispettati per almeno il 95% dei GCP e dei CP utilizzati. (Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala)

Tipo di ortofoto	Scala 1:5000				Scala 1:2000				Scala 1:1000				Scala 1:500			
	GCP		CP		GCP		CP		GCP		CP		GCP		CP	
	v_{EN} [m]	v_H [m]														
B	1.50	1.20	2.60	1.05	0.60	0.45	1.05	0.70	0.30	0.25	0.55	0.35	0.20	0.15	0.25	0.18
A1/A2	1.00	0.80	1.75	0.70	0.40	0.30	0.70	0.50	0.20	0.15	0.35	0.25	0.10	0.10	0.17	0.12

Figura 6.17- Scarti residui massimi ammissibili sui GCP e CP- Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala

6.1.2.3 Generazione Nuvola densa

Dopo aver verificato che gli errori rientrano nell'intervallo ammissibile, è possibile generare la nuvola "densa". Il *software* PhotoScan consente di creare e visualizzare un modello di punti che definisce in maniera accurata e fedele la geometria dell'oggetto esaminato. Esso, basandosi sulla posizione stimata della camera, calcola le informazioni di profondità per ogni fotogramma, in modo da generare un unico modello di punti densissimo che traccia la perfetta forma degli elementi rilevati.

In questa fase i parametri da definire sono:

- **Quality:** la qualità di ricostruzione desiderata. I livelli più alti si utilizzano per ottenere maggiori dettagli e la geometria esatta, ma richiedono tempi maggiori di elaborazione. Infatti, a seconda del livello di dettaglio il programma elabora l'immagine originale (Ultra High) oppure immagini ridotte di un fattore 4 (High);
- **Depth Filtering modes:** sono gli algoritmi di filtraggio che il programma utilizza per eliminare gli errori dovuti a immagini rumorose o non a fuoco. Tali fattori influenzerebbero negativamente il calcolo della Z.

Nel caso oggetto di studio, la nuvola densa di punti si è creata scegliendo una qualità alta e il filtraggio moderato, ottenendo il prodotto finale (FIGURA 6.18) con le caratteristiche elencate in TABELLA 6.12.

Tabella 6.12- Caratteristiche nuvola densa di punti

Risultati generazione della nuvola densa	
Quality	High
Depth Filtering modes	Moderate
Punti creati	70650129
Tempo necessario alla creazione	18 ore e 17minuti
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti



Figura 6.18- Nuvola densa, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017

6.1.2.4 Generazione Mesh, Texture e Tiled Model

L'ultimo passaggio da effettuare prima di generare i *file* di *output* consiste nella ricostruzione del modello3D ad alta risoluzione attraverso la generazione della *Mesh*, *Texture* e *Tiled Model* con le caratteristiche delineate in TABELLA 6.13.

Generando la *Mesh* (FIGURA 6.19) si creano vertici, spigoli e facce che servono per definire la forma dell'oggetto rilevato.

PhotoScan consente di generarla con diversi metodi di ricostruzione e impostazioni. I parametri da definire sono:

- **Tipo di superficie:** si specifica la tipologia per modellare l'oggetto. Può essere di due tipi "Arbitrary" e "Height field", il primo utile per la modellazione di elementi singoli, come statue, mentre il secondo utilizzato, nel caso in esame, è ottimo per l'elaborazione di numerosi dati, come nel caso della fotogrammetria aerea, in quando richiede una quantità di memoria inferiore;
- **Source data:** la *mesh* si genera a partire da un dato che può essere la nuvola sparsa o quella densa. In questo caso è stata scelta la nuvola densa per avere una qualità maggiore dei risultati, nonostante i tempi di elaborazione sono maggiori;
- **Tipologia di interpolazione:** il *software* può adoperare differenti tecniche di interpolazione per la modellazione. Nel caso oggetto di studio si è disabilita l'interpolazione, poiché la nuvola densa presenta nella parte esterna numerose zone prive di punti. Per tale motivo con la funzione disabilitata si costruisce il modello solo in corrispondenza dei punti della nuvola densa.



Figura 6.19- Mesh 3D, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017

Per realizzare un modello 3D fotorealistico più dettagliato si deve generare anche la *Texture* e *Tiled model* (FIGURA 6.20).

In questa fase i parametri da definire sono:

- *Texture:*

- **Ortophoto**: l'intera superficie dell'oggetto viene "texturizzata" in proiezione ortografica. Questa modalità produce una texture più compatta rispetto all' "Adaptive Orthophoto", a scapito delle superfici verticali, che sono per tale motivo migliorate usando il comando *Tiled model*;
- **Blending mode**: parametro che consente di utilizzare tutte le foto per la generazione della *texture*. Nel caso in esame si è utilizzato l'impostazione *Mosaic* che implica due approcci. In un primo momento il *software* utilizza le componenti a bassa frequenza per sovrapporre le immagini evitando il problema di "ricucitura", mentre in seguito impiega le componenti ad alta frequenza, responsabili dei dettagli delle immagini.
- Tiled model:
 - *Pixel size*: 0.04 m
 - *Tile pixel* : 4096

Tabella 6.13- Caratteristiche modello tridimensionale

Risultati generazione del modello 3D	
Tipo di superficie	Height field
Dati di partenza	Nuvola densa
Interpolazione	Disabled
Quality Mesh	High
Depth Filtering modes	Moderate
Facce creati	14130025
Tempo necessario alla creazione	4 minuti
Mapping mode	Orthophoto
Blendig mode	Mosaic
Texture size	4.096 · 4.096
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti



Figura 6.20- Texture e Tiled Model, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017

6.1.2.5 DSM e Orthomosaic

Il *software* Agisoft PhotoScan consente la generazione del modello digitale di superficie (DSM-FIGURA 6.21), utile per descrivere la superficie fisica del territorio, compresi i manufatti e la vegetazione.

A differenza del *software* utilizzato precedentemente, Pix4D, PhotoScan permette l'impostazione di alcuni parametri importanti quali:

- **Dato di partenza:** il DSM si genera a partire da un dato che può essere la nuvola densa o la *mesh*. È stata adoperata come base la “*Mesh*” per poter impostare la dimensione del *pixel* per rendere così il prodotto coerente con l'ortofoto;
- **Interpolazione:** il *software* può adoperare differenti tecniche di interpolazione per la generazione del DSM. Si è impostato “*Disabled*” per ottenere una ricostruzione accurata solo nelle aree realmente rilevate;
- **Dimensione del *pixel*:** 0.04m.

L'ortomosaico (FIGURA 6.22) è un elaborato che si ottiene inseguito all'unione delle immagini trasformate in una proiezione centrale, dopo aver eliminato le distorsioni prospettiche. L'ortomosaico consente la determinazione dei punti solo in planimetria.

I parametri da definire sono:

- **Superficie:** parametro che permette di selezionare il dato che può essere adoperato come base per la generazione dell'ortomosaico. Si sono utilizzati i dati relativi al DSM, perché è maggiormente efficiente in caso di rilievi aerei;

- **Blending mode:** parametro che consente di determinare la tecnica adoperata dal programma per attribuire il valore RGB a ogni singolo *pixel* del prodotto finale. La modalità utilizza è “*Mosaic*”, che implementa l'approccio con la divisione dei dati in più domini di frequenza che sono mescolati in modo indipendente;
- **Dimensione del *pixel*:** 0.04m.

I file di output del processo possono essere salvati in vari formati (GeoTIFF, LAS, LAZ, XYZ, PLY importabili nei software CAD, di fotogrammetria e di applicazioni GIS).

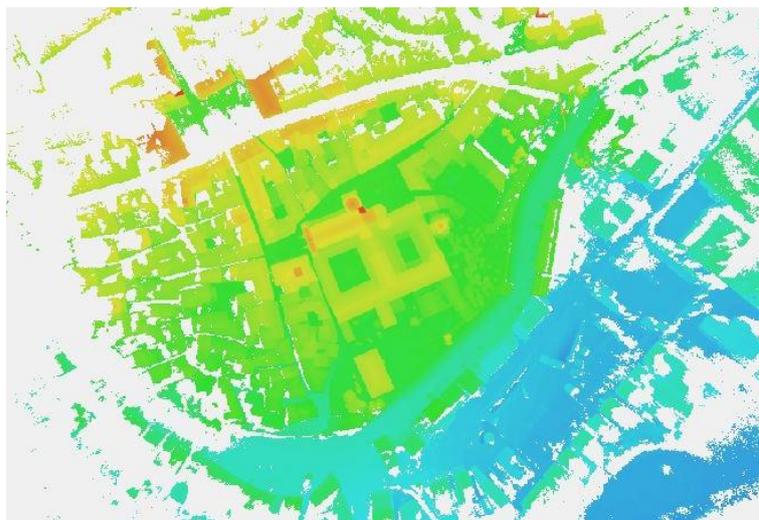


Figura 6.21- DSM, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017



Figura 6.22- Ortofoto, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017

Di seguito si riporta il grafico, FIGURA 6.23, contenente le tempistiche in percentuali di tutti i principali passaggi effettuati per giunge a un risultato corretto.

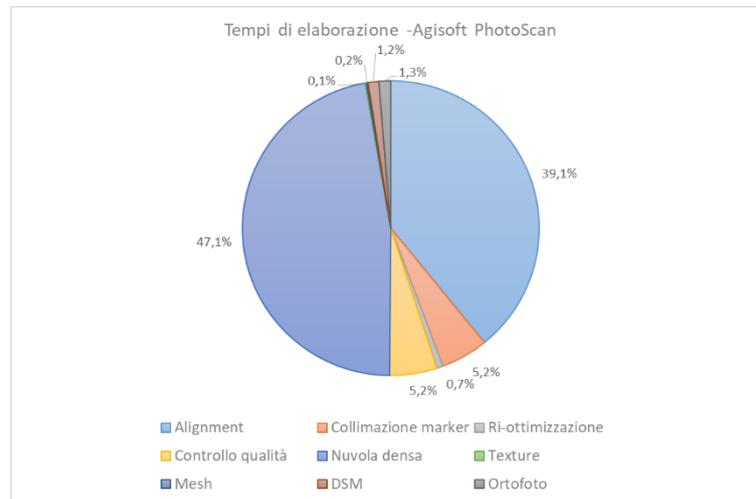


Figura 6.23- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio

6.1.3 Il software Visual SFM

Visual Structure from Motion è un *software open source* che esegue le prime fasi dello *Structure from Motion*, ovvero l'estrazione automatica delle *features*, mediante l'algoritmo SIFT, *matching*, orientamento e generazione delle nuvole di punti tridimensionali.

Il *software* ha un'interfaccia grafica semplificata e permette le seguenti operazioni:

- Caricamento delle immagini;
- Matching delle immagini;
- Generazione della nuvola "sparsa";
- Georeferenziazione del modello;
- Generazione della nuvola "densa".

Le informazioni riguardanti ogni processo sono visualizzate all'interno della finestra di dialogo denominata "*Log Window*".

6.1.3.1 Caricamento delle immagini

L'inserimento delle immagini si può effettuare sia mediante il comando "*Load NView Match*" sia "*Open Multiple Images*". In entrambi i casi, si possono caricare al limite 500

immagini, in formato .JPEG. Durante il caricamento nella finestra “*Log Window*” (FIGURA 6.24) sono visualizzate tutte le informazioni delle immagini, come dimensione dell’immagine e lunghezza della focale della camera fotografica, approssimati dalle informazioni contenute nei dati EXIF delle immagini.

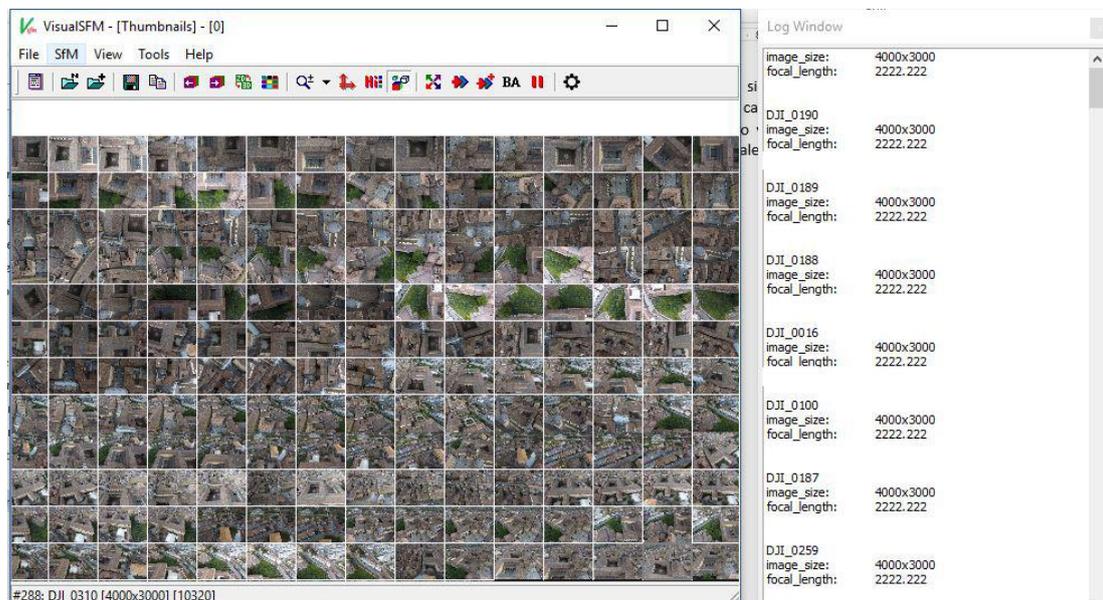


Figura 6.24- Caricamento delle immagini e determinazione delle loro caratteristiche

6.1.3.2 Matching delle immagini

Il software a questo punto consente, mediante il comando “*Compute Missing Matches*”, l’individuazione delle *features* su ogni immagini.

VisualSFM effettua due processi in successione:

- Algoritmo SIFT (Scale Invariant Feature Transform) (FIGURA 6.25);
- Matching della corrispondenza tra coppie di immagini (FIGURA 6.26).

Il primo processo è molto veloce e dipende dalle dimensioni e dal numero totale delle immagini; il secondo, invece, potrebbe richiedere molto più tempo in quanto il software effettua la comparazione a coppia delle immagini.

Durante questa fase si creano per ciascuna immagine un *file* .sift e .mat, mentre nella “*Log Window*” si può osservare il confronto a coppie delle immagini (FIGURA 6.26) effettuato dal software.

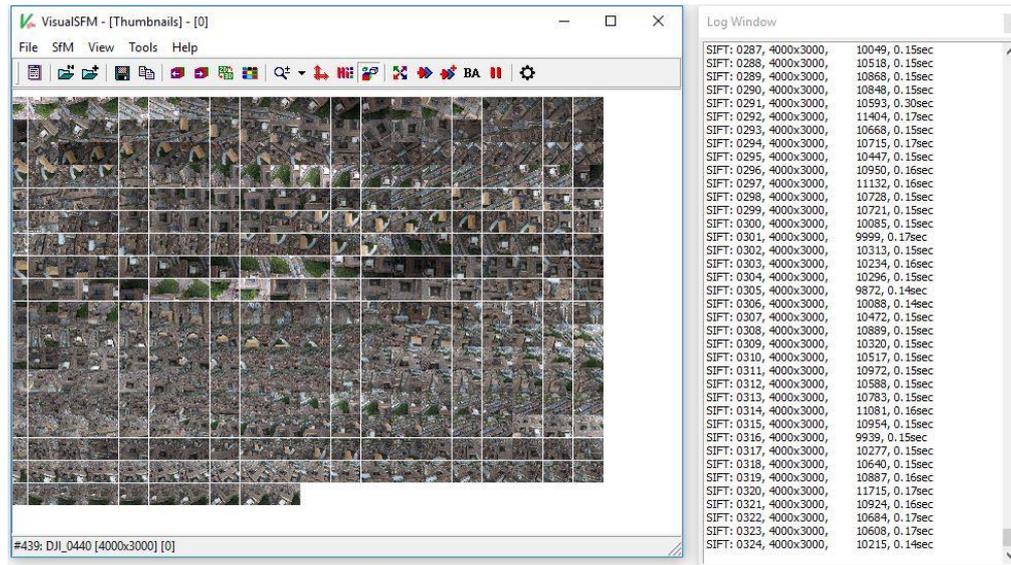


Figura 6.25- Individuazione dei punti chiave mediante l'algoritmo SIFT

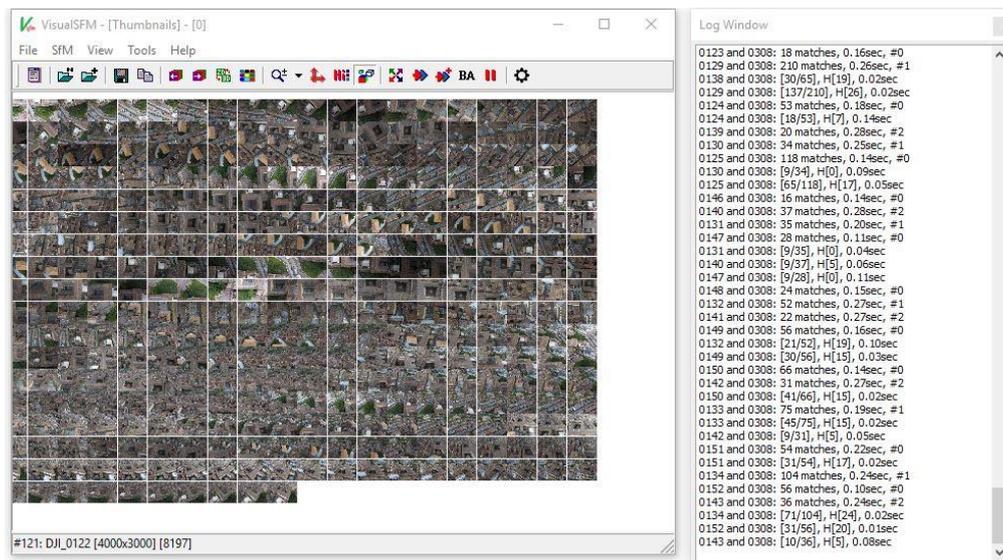


Figura 6.26- Confronto a coppie tra le immagini

6.1.3.3 Creazione della nuvola "sparsa"

Dopo aver individuato su ciascuna immagine i punti "tie points" è possibile generare la nuvola "sparsa" di punti, mediante il comando "Compute 3D reconstruction". I punti 3D sono collocati in un primo momento in relazione ai centri di presa dei fotogrammi, come mostrato in figura (FIGURA 6.27 FIGURA 6.28).

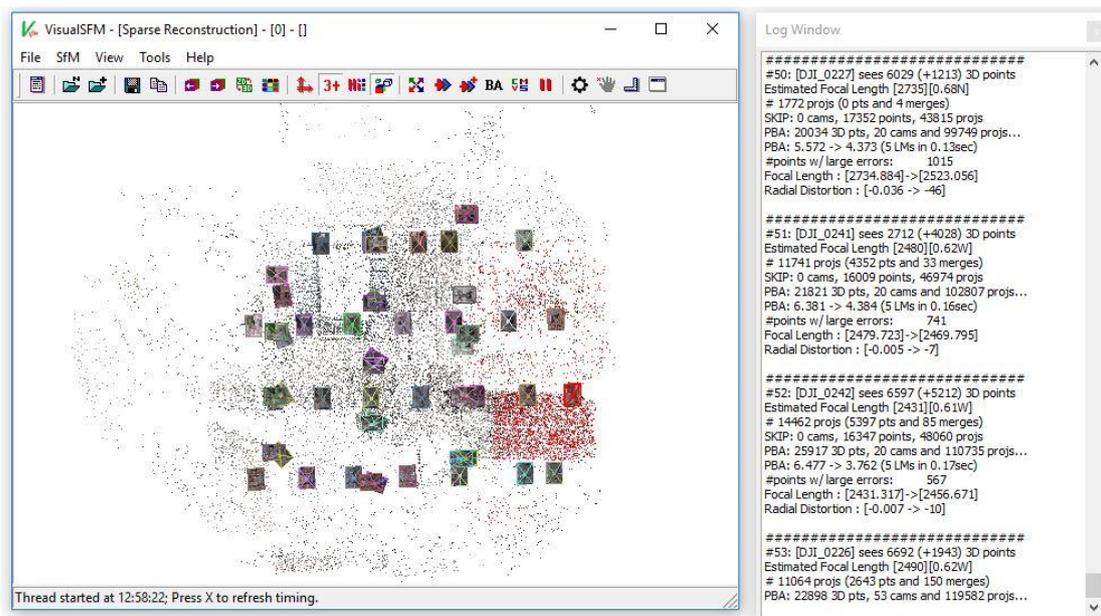


Figura 6.27- Allineamento dei fotogrammi in corso e generazione della nuvola sparsa

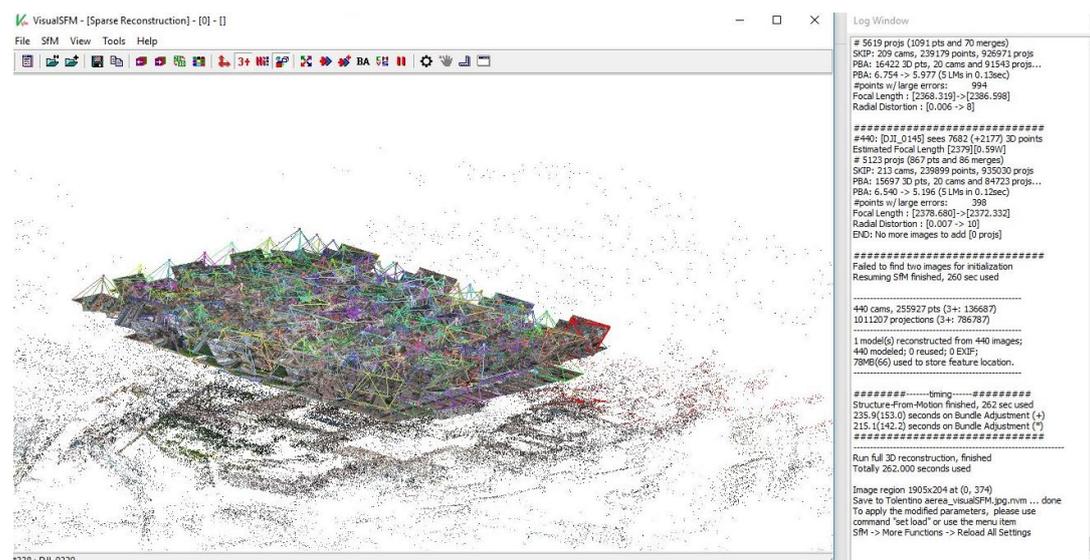


Figura 6.28- Allineamento dei fotogrammi e generazione della nuvola sparsa

6.1.3.4 Georeferenziazione manuale

Per collocare la nuvola sparsa in un sistema di riferimento noto, occorre inserire e collimare su ogni immagine i punti misurati in loco, “GCP-Ground Control Point” (FIGURA 6.30).

A differenza dei programmi usati in precedenza, i GCP devono essere inseriti manualmente (FIGURA 6.29) su ciascuna immagine, non si può introdurre un *file .txt* e inoltre il *software* stesso non è in grado di stimare, anche in maniera approssimata, la posizione di questi punti sui successivi fotogrammi.

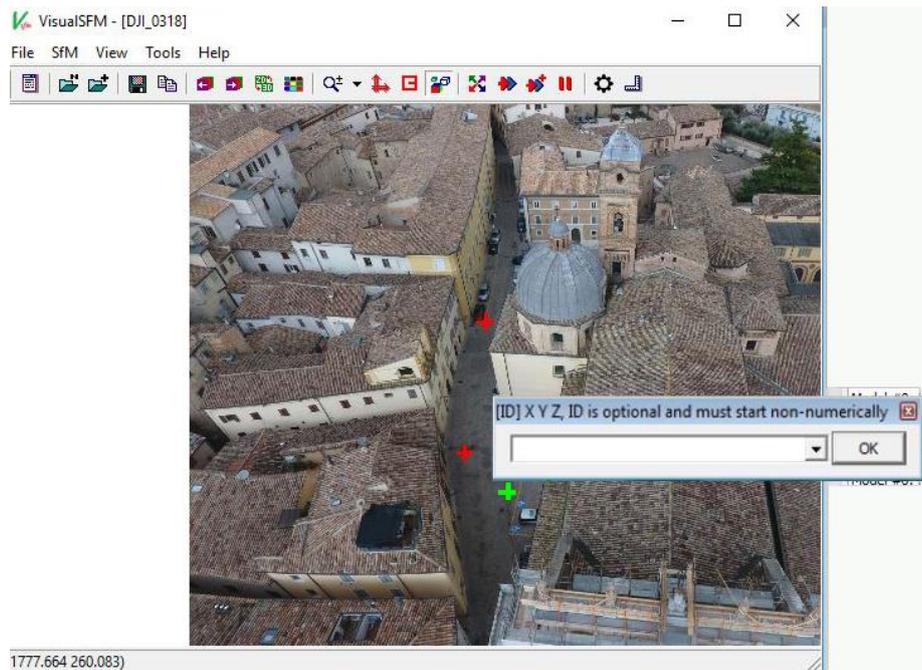


Figura 6.29- Inserimento manuale dei GCP

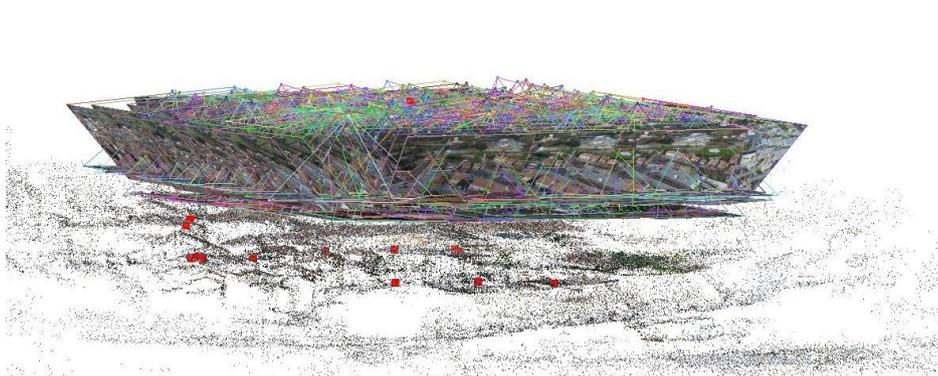


Figura 6.30- Distribuzione dei GCP nell'area oggetto di studio

Dopo aver collimato tutti i marker, mediante il comando *“GCP-Based Transformation”*, il *software* effettua una rototraslazione per collocare il modello tridimensionale nella posizione reale.

6.1.3.5 Creazione della nuvola *“densa”*

A questo punto, il *software* consente la ricostruzione del modello tridimensionale geo-referenziato (FIGURA 6.31), mediante il comando *“Run Dense reconstruction”*, plugin PMVS/CMVS introdotto inizialmente per implementare le funzioni di VSfM.

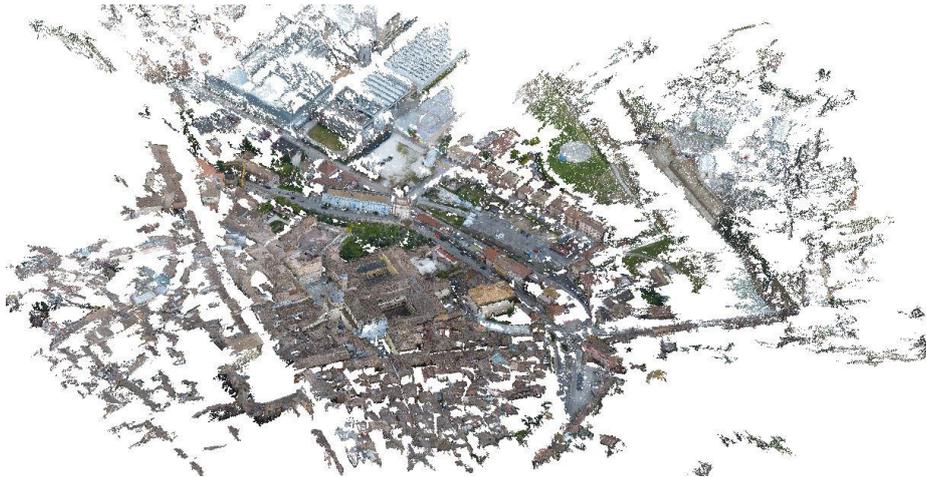


Figura 6.31- Nuvola densa, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017

Il *file* della nuvola densa, al momento della generazione, è salvato automaticamente in formato *.ply* all'interno della sottocartella "*models*".

Questo *file* può essere aperto con altri programmi come MeshLab, 3D Reshaper per ulteriori processi. Infatti il *software*, a differenza degli altri utilizzati in precedenza, non consente la generazione di una *Mesh* o la creazione di un'ortofoto.

6.2 Elaborazione dati a scala architettonica

La fase di elaborazione dei dati rilevati a scala architettonica ha permesso la creazione del modello tridimensionale dell'intero Chiostro.

Per l'elaborazione dei dati si sono utilizzati i *software* FARO SCENE, per registrare le scansioni del *laser scanner* terrestre, e Agisoft PhotoScan, per generare il modello a partire dalle immagini acquisite con la fotogrammetria.

I *file* di *output* generati sono stati:

- Nuvola densa di punti in formato LAS;
- *Mesh* 3D *texturized* in formato OBJ e PLY (con *texture* in formato JPG);
- Ortomosaico in formato TIFF.

6.2.1 Dati rilevati con *laser scanner* terrestre

In una prima fase si sono selezionate tutte le scansioni che hanno registrato l'oggetto preso in esame in questo elaborato, il Chiostro di Tolentino.

Il *software* utilizzato è SCENE, che permette di gestire, elaborare e georeferenziare, con precisione molto elevata, le nuvole di punti generate dal *laser scanner*. Il programma consente, inoltre, la visualizzazione 3D, la costruzione della *mesh* e possiede strumenti di lavoro e funzioni in grado di riconoscere in maniera automatica i *marker*. Le scansioni georiferite possono essere esportate in differenti formati.

6.2.1.1 Importazione e caricamento dei dati

Il *software* FARO SCENE consente di creare un nuovo progetto, nel quale possono essere importate nel *workspace* le scansioni da elaborare attraverso il comando “*drag and drop*” oppure “*File / Import*”. Le scansioni sono identificate inizialmente con una nuvola e solo dopo averle caricate nel progetto con un quadratino verde (FIGURA 6.32). È importante caricare le scansioni nel progetto prima di iniziare le elaborazioni.

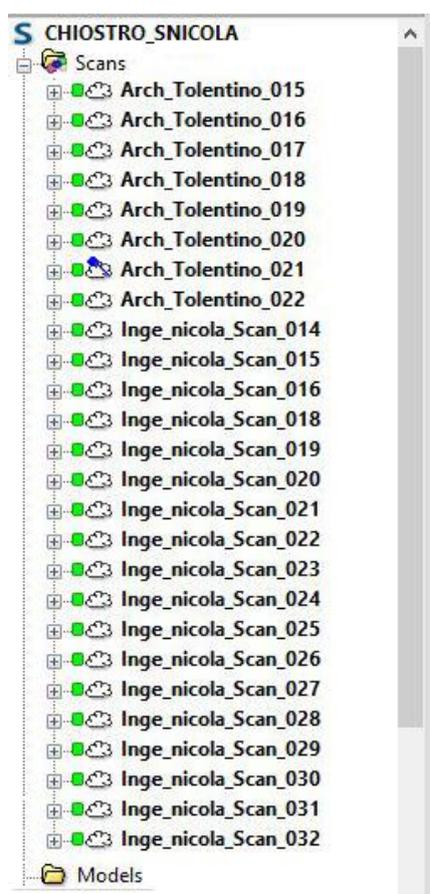


Figura 6.32- Caricamento delle scansioni

6.2.1.2 Registrazione e georeferenziazione delle scansioni

Prima di procedere con la geo-referenziazione, nella “Vista corrispondenza” è possibile posizionare manualmente le scansioni caricate, sovrapponendo approssimativamente le parti in comune, in modo da effettuare la registrazione detta “per forma”, ovvero *da nuvola a nuvola*, utile a collocare rapidamente e accuratamente le scansioni senza l’utilizzo di target.

Di seguito si riportano i passaggi fondamentali e preliminari all’allineamento per forma (FIGURA 6.32) e un estratto degli *scanfit* (FIGURA 6.33) ottenuti in seguito alla registrazione delle scansioni. (v. ALLEGATO A3 per la tabella completa) Tali valori dipendono delle tensioni dei punti omologhi di scansione fra due o più scansioni (FIGURA 6.35).

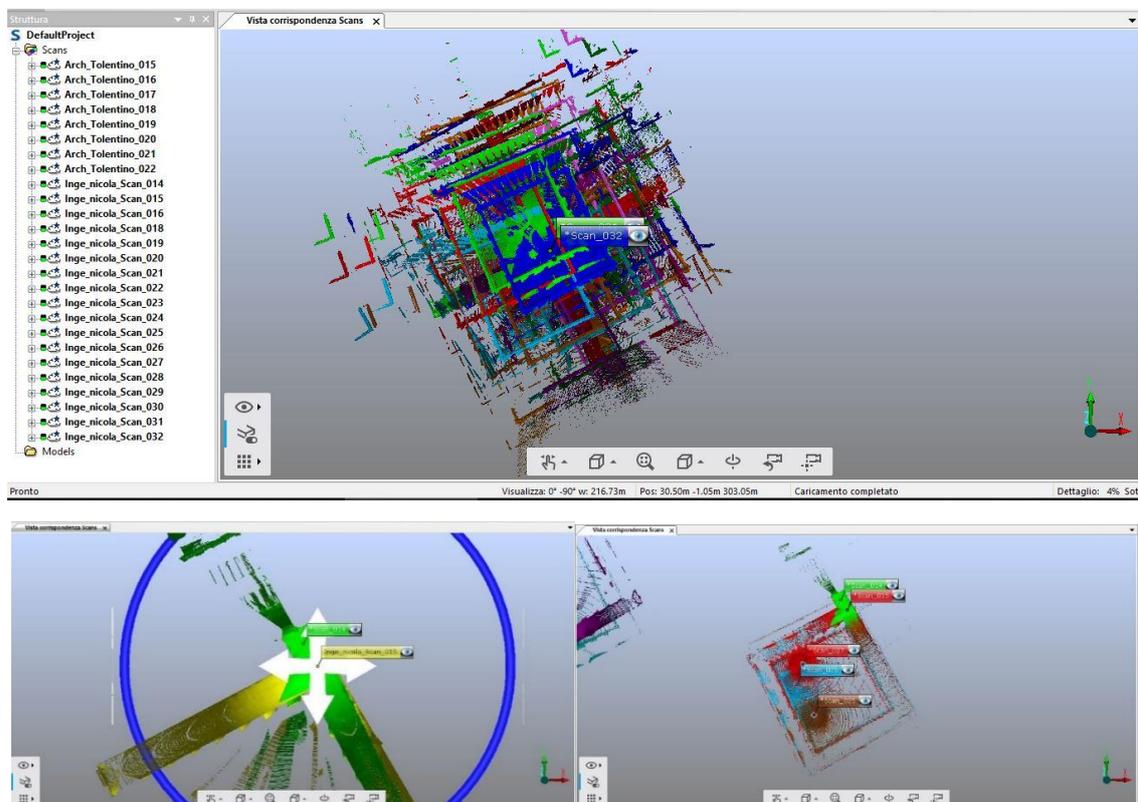


Figura 6.33- "Vista corrispondenza" contenente tutte le scansioni caricate nel workspace e allineamento manuale tra le scansioni

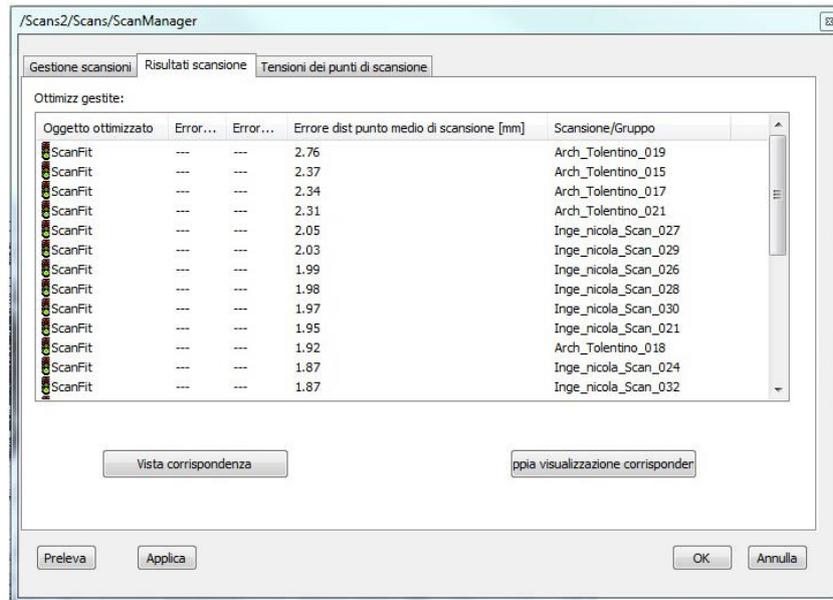


Figura 6.34- Estratto dello ScanFit ottenuto inseguito all'allineamento "per forma" delle scansioni

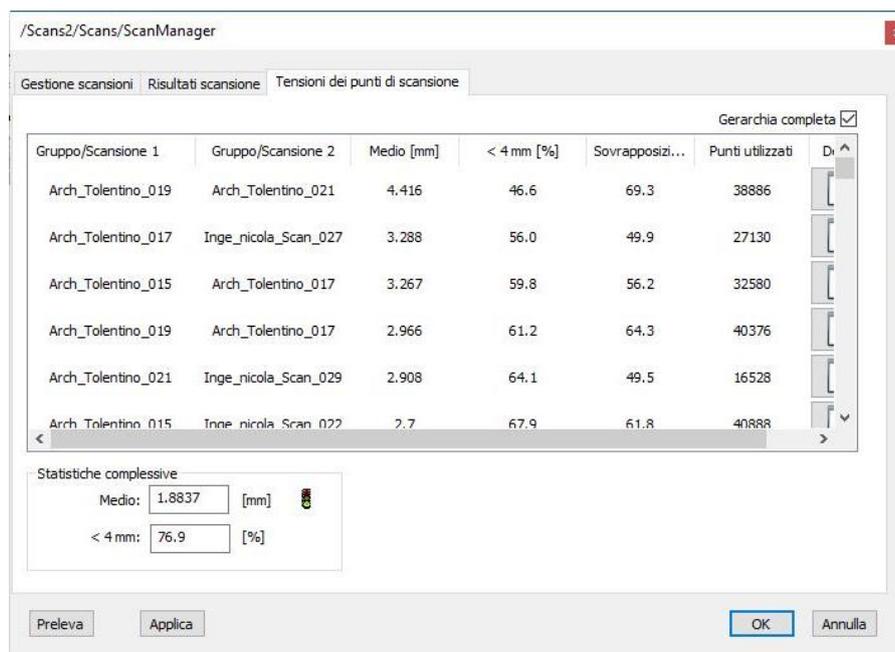


Figura 6.35- Tensione del posizionamento dei punti di scansione dopo l'allineamento "per forma"

Solo dopo aver ottenuto il semaforo verde, che designa il giusto posizionamento delle scansioni, si possono geo-referenziare le scansioni attribuendo a ogni punto le coordinate geografiche, identificando in questo modo il sistema di riferimento e la loro posizione sulla superficie terrestre.

Nel caso oggetto di studio, per la geo-referenziazione si è effettuata la modalità indiretta, basata sui GCP (*Ground Control Point*), materializzati attraverso i *target*. Partendo dalla

“Vista piana” si sono ricercati i *marker* presenti nelle scansioni, ai quali è stato attribuito il nome corrispettivo registrato dalla stazione totale, in modo da associare in una fase successiva le coordinate. La ricerca può essere effettuata in maniera automatica dal *software* specificando la tipologia di *target* utilizzato durante il rilievo e a questi viene attribuito un nome in serie che può essere modificato successivamente. Successivamente si deve controllare che i *target* individuati siano corretti e che il punto individuato non sia lontano dal centro del marker (FIGURA 6.36).

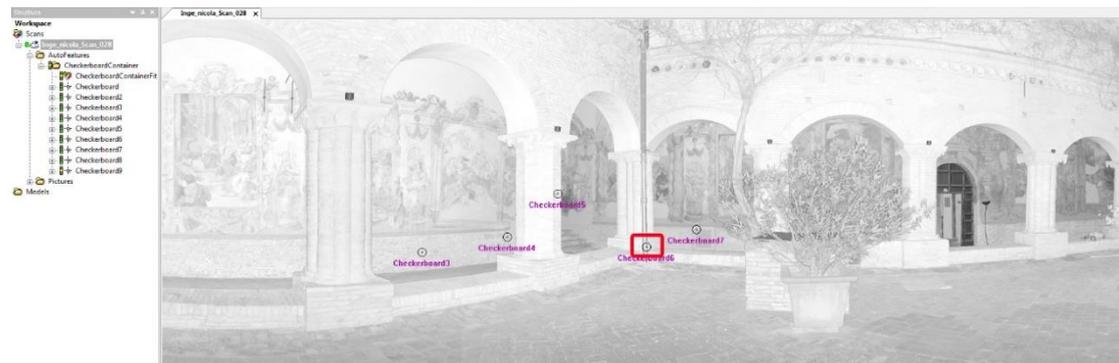


Figura 6.36- Individuazione automatica dei target con segnalazione di errori

L'individuazione è precisa ma spesso incompleta e per questo bisogna implementarla con la ricerca e collocazione manuale dei restanti *target*. Per fare ciò basta usare il comando “*contrassegna un punto di scansione*” presente nella barra degli strumenti. (FIGURA 6.37)

È importante che ad ogni punto inserito manualmente corrisponda il simbolo del semaforo verde, indice di qualità; infatti se verde implica che il numero di punti utilizzati per l'ottimizzazione è >80.

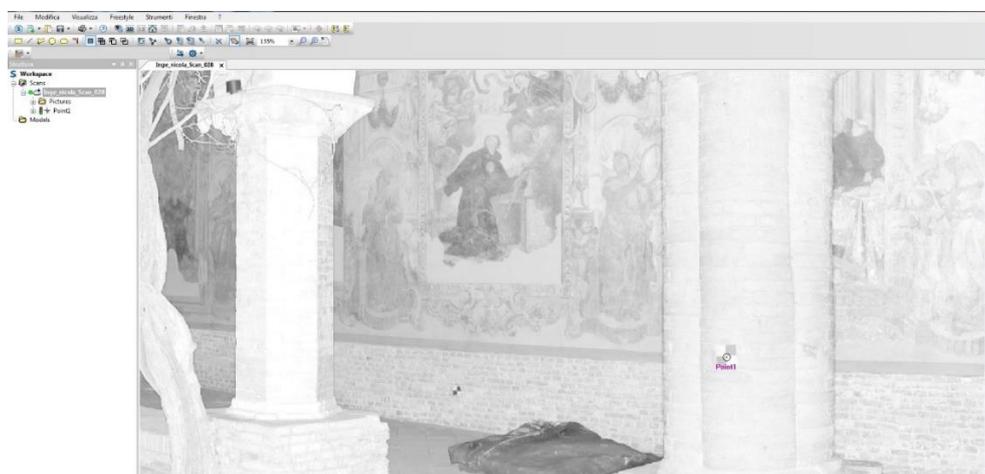


Figura 6.37- Individuazione manuale dei target

A questo punto si possono collocare le scansioni con la modalità basata su *target* e dal momento che la registrazione delle scansioni si basa sull'individuazione dei punti di riferimento in più scansioni, è necessario che in ogni scansione siano individuati almeno due punti. In alcuni casi, come per le scansioni Inge_nicola_scan_014 e Arch_Tolentino_015, si sono individuati anche i *marker* o punti naturali che non sono stati misurati dalla stazione totale.

A questo punto il *software* colloca le scansioni effettuando una rototraslazione basandosi sui *target*, in un sistema di riferimento comune ma ignoto. Per passare a un sistema noto, bisogna associare a questi punti le coordinate ed eseguire una seconda rototraslazione. Le coordinate sono registrate in un file *Excell* in formato *.csv* che può essere inserito nel progetto all'interno del *workspace* con il "drag and drop" oppure importato con il comando *File/Import/ Surveyed points*. Per ottenere la corrispondenza i *target* devono avere la stessa codifica.

Dopo aver individuato tutti i *marker* ed associato le coordinate, si effettua nuovamente la registrazione delle scansioni. Il *software* evidenzia la corretta posizione delle scansioni con un semaforo verde, in caso contrario utilizza un semaforo giallo o rosso.

Una volta collocate tutte le scansioni è possibile verificare gli scarti fra la posizione e l'orientamento dei due oggetti di riferimento corrispondenti nelle scansioni attraverso il *report*, cliccando con il *tasto dx* sullo *ScanFit* generale.

Dal momento che la scala di rappresentazione finale è 1:100, la precisione, ovvero la qualità della misura, entro la quale la tensione dei *target* deve rimanere è di 20 mm, ovvero la metà della tolleranza.

Osservando le tensioni dei *target* si è deciso di eliminare o riposizionare alcuni punti che forniscono uno scarto maggiore della precisione.

Di seguito, FIGURA 6.38 si riporta un estratto delle tensioni dei *marker* (v. ALLEGATO A3 per la tabella completa) al termine della collocazione delle scansioni.

Al termine di questa operazione è possibile osservare nella "Vista corrispondenza" (FIGURA 6.39) l'allineamento e i centri di presa delle singole scansioni, mentre nella "Vista 3D"

(FIGURA 6.40) il modello tridimensionale in bianco e nero ottenuto dall'unione delle singole scansioni.

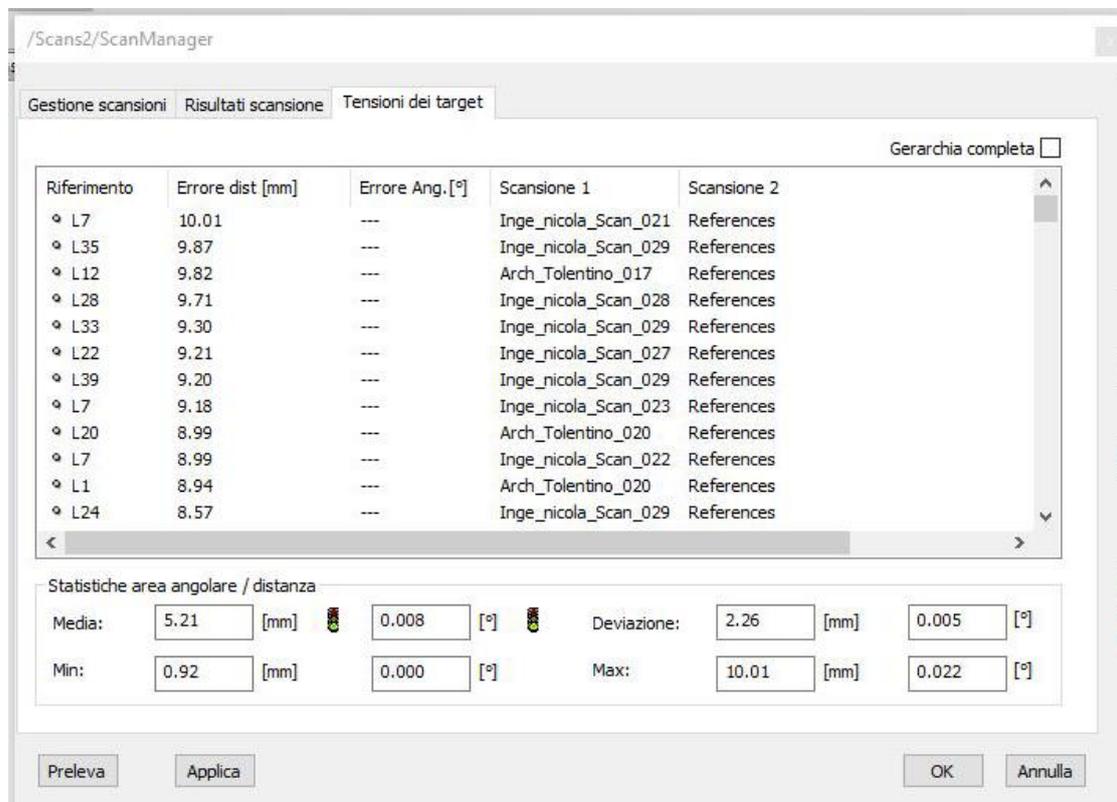


Figura 6.38- Tensione dei target ottenuta inseguito alla registrazione delle scansioni

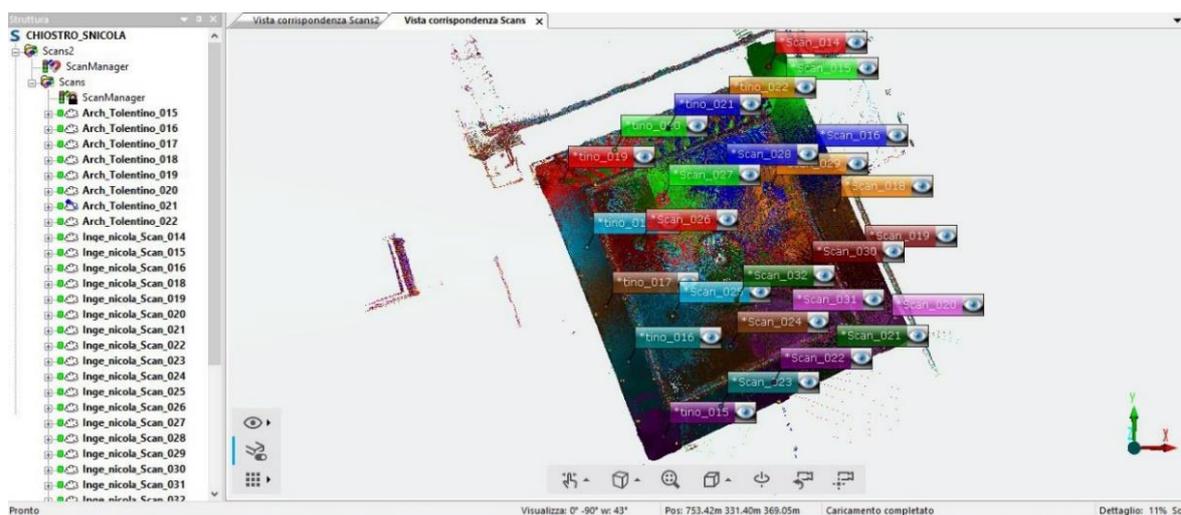


Figura 6.39- "Vista corrispondenza" con allineamento di tutte le scansioni

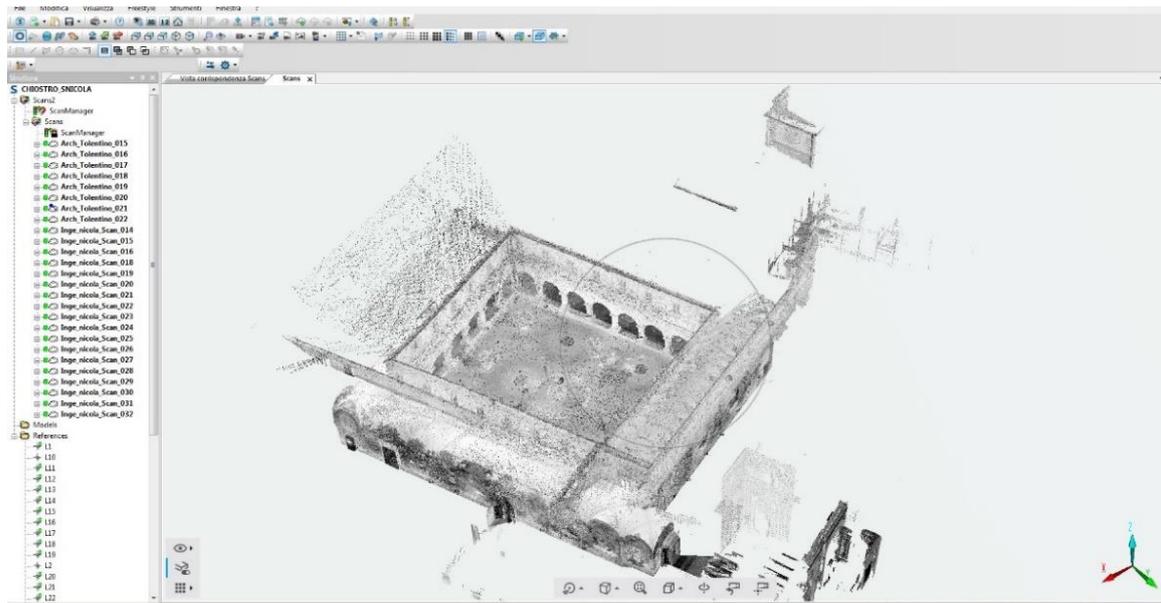


Figura 6.40- "Vista 3D" del modello tridimensionale

6.2.1.3 Colorazione scansione

In fase di acquisizione, le scansioni sono state effettuate con l'opzione colore e per tale motivo contengono anche le immagini digitali dell'oggetto rilevato, quindi informazioni sull'RGB dei singoli punti, oltre che alle informazioni sulla distanza. Le immagini possono essere visualizzati nel *workspace*.

Dopo aver eseguito la registrazione e la collocazione, si effettua la colorazione delle scansioni attraverso il comando "Operazione/Colore -immagini/ Applica immagini". L'operazione dura qualche minuto, perché il *software* carica le scansioni e le relative immagini, rimuove distorsioni se presenti e infine aggiunge l'informazione RGB ai punti di scansione.

Le figure (FIGURA 6.41 e FIGURA 6.42) rappresentano il risultato finale, vista piana e vista 3D, dell'elaborazione delle nuvole *laser scanner*, alle quali è applicato il colore.

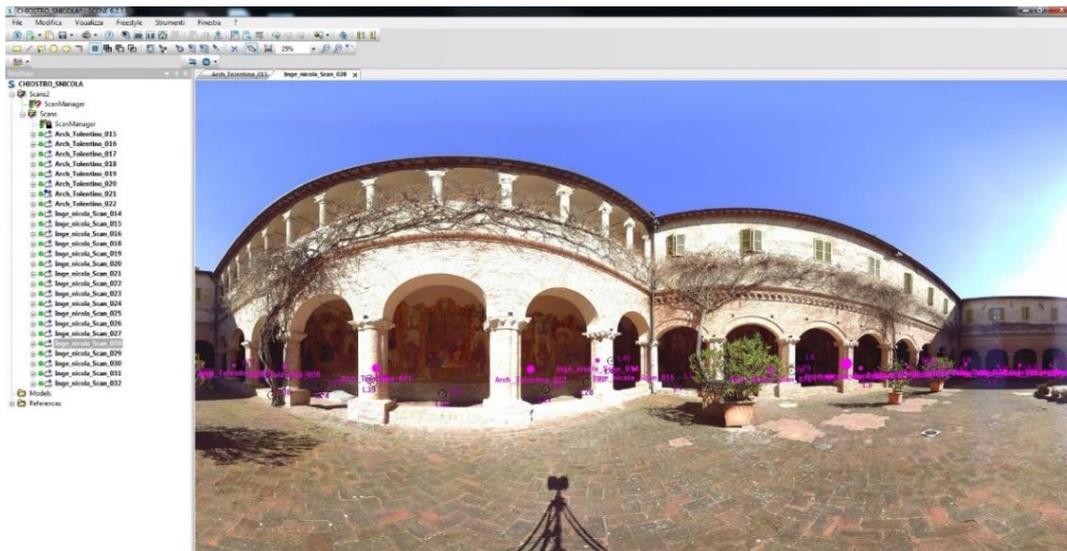


Figura 6.41- Colorazione scansione

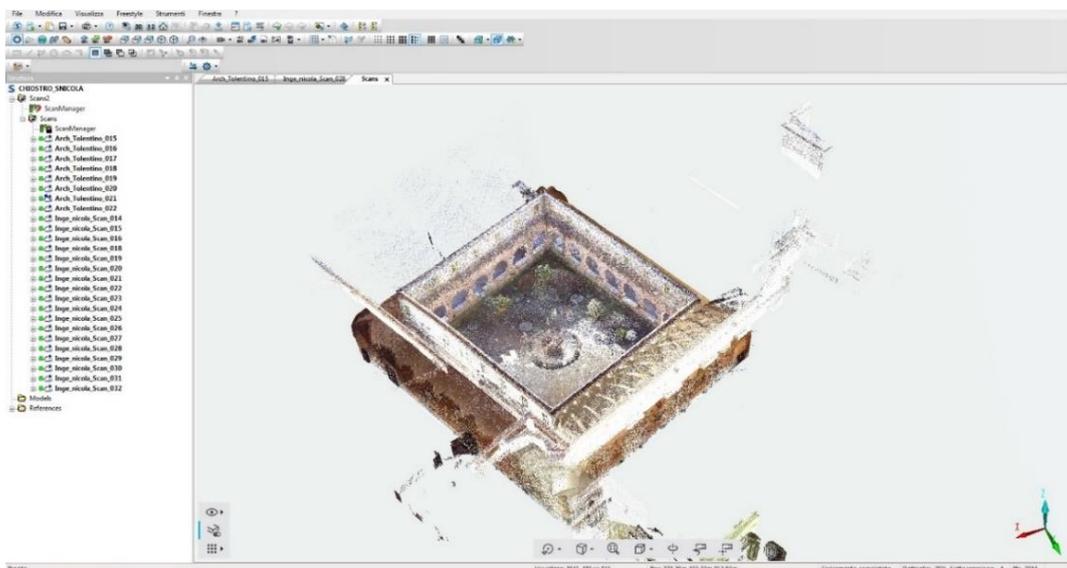


Figura 6.42- "Vista 3D" modello tridimensionale colorato

6.2.1.4 Esportazione delle nuvole

La nuvola correttamente geo-referenziata è stata esportata (FIGURA 6.43) in formati compatibili con i successivi software di elaborazione dati, mediante il comando "Scan / Importa-Esporta/ Esporta scansioni ordinate". Poiché l'elaborazione dei dati ha generato una nuvola che è risultata troppo pesante, si è preferito esportare ogni scansione in un file separato, mantenendo la georeferenziazione. Il formato di esportazione utilizzato è stato .e57, ben supportato da PointCab e 3DReshaper.

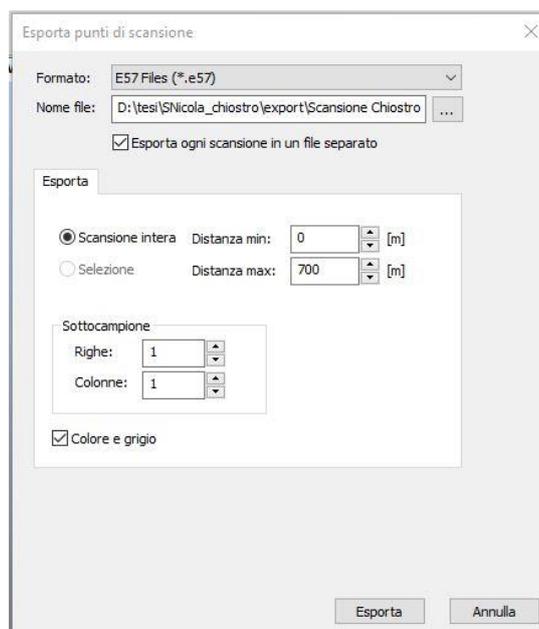


Figura 6.43- Esportazione scansioni

La maggiore celerità di elaborazione della tecnica LiDAR rispetto alla fotogrammetria è dovuta alla caratteristica intrinseca di acquisire direttamente in loco nuvole dense di punti senza dover ricavare tali informazioni da immagini digitali.

6.2.2 Dati rilevati con *fotogrammetria terrestre*

6.2.2.1 Il software *Agisoft PhotoScan*

Il *software* utilizzato per l'elaborazione dei dati è Agisoft PhotoScan. Le operazioni effettuate sono le medesime di quelle eseguite nel PARAGRAFO 6.1.2; in questo caso però non si sono realizzati il DSM e l'ortofoto dall'alto, ma i prospetti delle quattro maniche del chiostro. Per tale motivo si illustreranno solo gli *output* generati in ogni fase, con le loro caratteristiche, tempi di elaborazione e il metodo utilizzato per la generazione dei prospetti.

6.2.2.2 *Allineamento dei fotogrammi*

Dopo aver caricato i fotogrammi acquisiti durante la campagna di rilievo è stato possibile effettuare l'allineamento (FIGURA 6.44), generando un primo modello tridimensionale costituito da punti "nuvola sparsa" (FIGURA 6.45) costituita dalle caratteristiche riportate in

TABELLA 6.15.

Durante questa fase il programma è in grado di determinare il modello della camera fotografica utilizzando le informazioni contenute nei dati .EXIF delle immagini.

Tabella 6.14- Stima iniziale dei parametri della camera fotografica

Canon EOS 5D Mark II	
Camera type	Frame
Pixel size [mm]	0.006549 x 0.006549
Resolution	5616 x 3744
Focal length [mm]	14
F_x	2137.73
F_y	2137.73
X_0	2808
Y_0	1872
$K_1 = K_2 = K_3 = K_4$	0
$P_1 = P_2 = P_3 = P_4$	0

Tabella 6.15- Caratteristiche nuvola sparsa di punti

Risultati generazione della nuvola sparsa	
Numero di camere	470
Accuracy	High
Pair preselection	Disabled
Matching time	1 days
Alignment time	3 ore e 6 minuti
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti

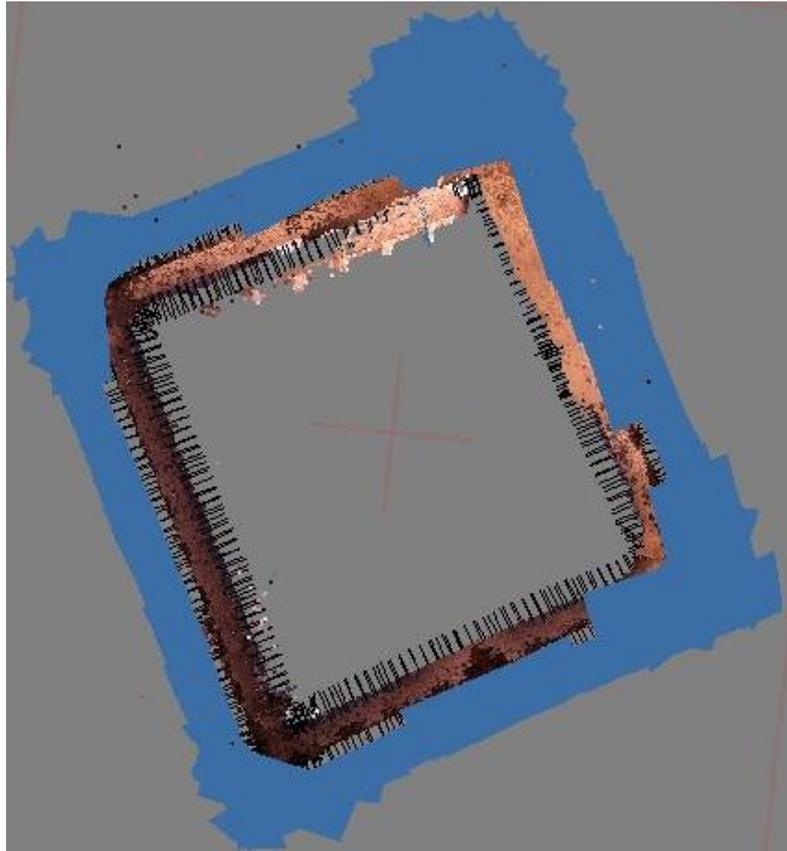


Figura 6.44- Allineamento fotogrammi

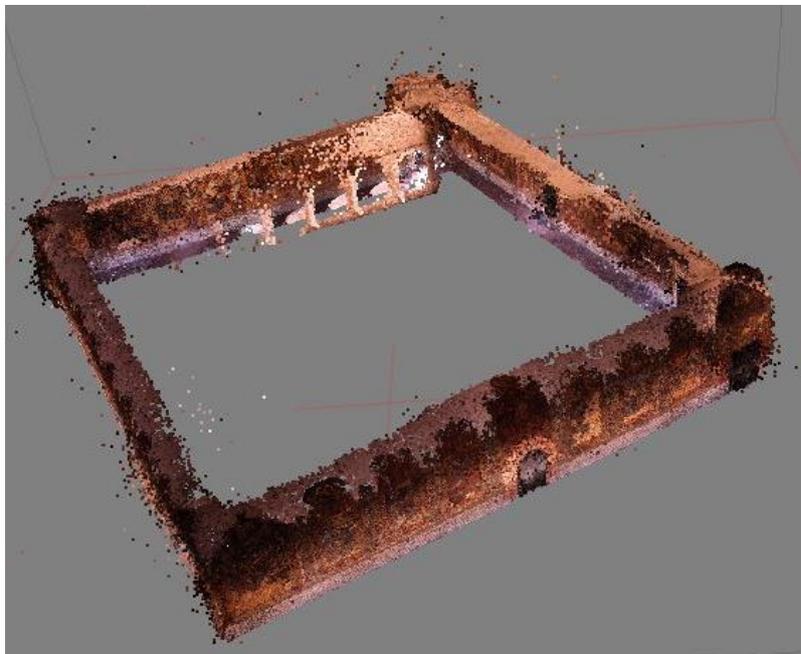


Figura 6.45- Nuvola sparsa, Chiostro di Tolentino, acquisizione Canon EOS 5D, Febbraio 2017

6.2.2.3 Georeferenziazione

La georeferenziazione del modello tridimensionale è realizzata mediante l'inserimento delle coordinate dei GCP-*Ground Control Point*, contenute in un *file* .txt, all'interno del *software* e la loro collimazione sulle immagini.

Una volta collimati tutti i punti di coordinate noti, è consigliabile una ri-ottimizzare dei parametri interni ed esterni della camera fotografica (TABELLA 6.16), in modo da eliminare la deformazione non lineare e minimizzare l'errore di proiezione.

Tabella 6.16- Ottimizzazione dei parametri della camera fotografica

Canon EOS 5D Mark II	
Camera type	Frame
Pixel size [mm]	0.006549 x 0.006549
Focal length [mm]	14
F_x	2212.5
F_y	2212.25
X_0	2805.86
Y_0	1866.99
K_1	-0.034366
K_2	0.0591981
K_3	-0.0286823
K_4	0.00580888
P_1	0.000279483
P_2	1.52293e-05
P_3	-0.0969296
P_4	0

Tabella 6.17- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)

Marker	XY Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
L1	0,001	-0,0006	0,001
L11	0,008	-0,0003	0,008
L12	0,003	0,003	0,004
L13	0,004	0,003	0,005
L14	0,003	0	0,003
L15	0,005	-0,002	0,006
L16	0,004	0,002	0,005
L17	0,006	0,003	0,007
L18	0,007	0,004	0,008
L19	0,004	0,004	0,006
L2	0,002	0,004	0,005
L20	0,004	-0,004	0,004
L21	0,003	-0,003	0,005
L22	0,003	-0,014	0,014
L23	0,002	-0,002	0,003
L24	0,004	0,001	0,004
L25	0,005	0,001	0,005
L26	0,008	0,003	0,009
L27	0,006	0,001	0,006
L28	0,004	-0,0002	0,004
L3	0,003	0,005	0,006
L4	0,004	0,005	0,006
L5	0,005	-0,004	0,007
L6	0,002	0,001	0,002
L7	0,008	-0,007	0,011
L8	0,005	-0,009	0,01
L9	0,0006	-0,0007	0,0009
RMS Error	0,005	0,005	0,006
Residui Max XYZ [m]	Residui Min XYZ [m]	Media [m]	SQM [m]
0,014	0,001	0,006	0,003

L'errore espresso in metri (TABELLA 6.17), restituito da PhotoScan, risulta inferiore del GSD del modello (1.4 mm/pixel-Report Agisoft PhotoScan) che a sua volta è minore del GSD di progetto (1.6 mm/pixel-PARAGRAFO 5.3.2). Per tale motivo la condizione è ottimale e si può procedere con la generazione della nuvola densa.

6.2.2.4 Generazione nuvola densa

La nuvola densa (FIGURA 6.46) generata dal software delinea in maniera accurata la geometria dell'oggetto esaminato. Il prodotto finale generato presenta le caratteristiche indicate in TABELLA 6.18.

Tabella 6.18- Caratteristiche nuvola densa di punti

Risultati generazione della nuvola densa	
Quality	High
Depth Filtering modes	Moderate
Punti creati	180944633
Tempo necessario alla creazione	4 ore e 3 minuti
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti



Figura 6.46- Nuvola densa, Chiostro di Tolentino, acquisizione Canon EOS 5D, Febbraio 2017

Di seguito si riporta il grafico, FIGURA 6.47, contenente le tempistiche in percentuali di tutti i principali passaggi effettuati per giungere a un risultato corretto.

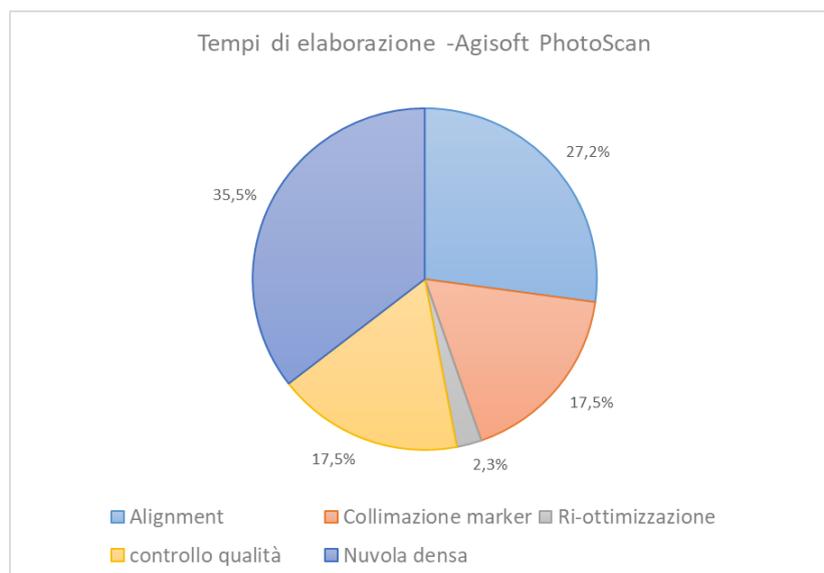


Figura 6.47- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio

6.2.2.5 Generazione dei prospetti

Per realizzare le quattro ortofoto dei prospetti è necessario avere solo i punti in corrispondenza del prospetto che si vuole generare. Per questo motivo si è duplicato il *chunk* quattro volte e in ognuno di questi si sono cancellati i punti in corrispondenza degli altri tre lati del chiostro. Nella FIGURA 6.48 si illustra la nuvola di punti densa relativa al prospetto Sud- Est.



Figura 6.48- Nuvola densa relativa al lato Sud-Est, Chiostro di Tolentino

Dopo aver ripulito la nuvola densa si può generare la *Mesh* e la *Texture* per delineare la forma dell'oggetto rilevato e renderlo così un modello fotorealistico.

Sempre considerando il prospetto Sud-Est, mostrato in FIGURA 6.49, i parametri e i tempi necessari per la realizzazione sono illustrati nella seguente TABELLA 6.19.

Tabella 6.19- Caratteristiche del modello tridimensionale della sola parete Sud-Est

Risultati generazione del modello 3D	
Tipo di superficie	Arbitrary
Dati di partenza	Nuvola densa
Interpolazione	Disabled
Quality Mesh	High
Depth Filtering modes	Moderate
Facce creati	8946730
Tempo necessario alla creazione	4 ore e 57 minuti
Mapping mode	Adaptive Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4.096 · 4.096
Blending time	5 minuti e 33 secondi
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti

A questo punto prima di generare l'ortofoto è necessario un ulteriore passaggio. Infatti, è necessario individuare su ciascun prospetto tre *marker* che se collegati possono rappresentare una terna di assi cartesiani perfetta. Poiché è difficile rispettare questa condizione, si è pensato di utilizzare un *marker* generico misurato in loco, come punto d'origine della terna di assi cartesiani, di creare un nuovo punto costituito dalle coordinate E,N di un altro GCP presente, mentre la componente lungo l'asse Z viene posta uguale a quella del primo punto in modo da creare un'asse perfettamente orizzontale, e infine il terzo punto è ottenuto traslando lungo l'asse Z l'origine del sistema cartesiano. In questo modo è possibile creare un sistema di riferimento cartesiano ad *hoc* da utilizzare come base per la realizzazione dell'"ortofoto planar" del singolo prospetto.

Nella FIGURA 6.49 si sono messi in evidenza i *marker* creati (TABELLA 6.20) per poter generare il prospetto Sud-Est.



Figura 6.49- Modello tridimensionale con marker creati per generare il prospetto

Tabella 6.20- Marker creati ad hoc per la generazione del prospetto

Marker	Easting [m]	Northing [m]	Altitude [m]
S1≡ L9	769.568	319.138	225.579
S2	753.780	311.749	225.579
S3	769.568	319.138	235.579

I file di output che si genera è il prospetto del singolo lato (FIGURA 6.50), dimensione del pixel pari a 0.004 m.



Figura 6.50- Prospetto Sud-Est

Di seguito si riporta il grafico, FIGURA 6.51, contenente le tempistiche in percentuali di tutti i principali passaggi effettuati per giungere a un risultato corretto.

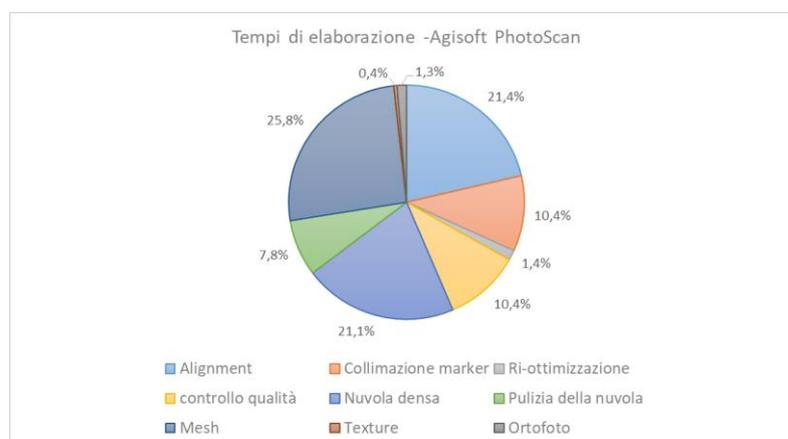


Figura 6.51- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio

6.2.3 Dati rilevati con fotogrammetria aerea da UAV

6.2.3.1 Estrazione e selezione dei frame

L'estrazione dei *frame* è stata effettuata in maniera automatica dal *software* MATLAB, dopo aver realizzato un codice nel linguaggio di programmazione C, in cui si delineano il passo e il coefficiente di correlazione. Il video è costituito da un numero di *frame* in funzione della durata, il passo di conseguenza indica al *software* ogni quanto analizzare l'immagine. Il coefficiente di correlazione denota la similarità tra due immagini e può assumere valori compresi tra 0, immagini non hanno nessun legame, e 1, quando invece sono identiche.

Una volta salvati i *frame* si è proceduto alla loro selezione manuale, per il motivo sopra citato. Di seguito (TABELLA 6.21) si riportano i parametri impostati per ciascun video e il numero delle immagini salvate.

Tabella 6.21- Parametri definiti nel software MATLAB e numero di immagini salvate dopo un'analisi manuale

Video DJI_0018	
Durata [minuti]	3:14
Numero di <i>frame</i>	5893
Passo	10
Coeff. Correlazione	0.79
Frame estrapolati	215

Video DJI_0047	
Durata [minuti]	9:20
Numero di <i>frame</i>	16864
Passo	20
Coeff. Correlazione	0.7
Frame estrapolati	422
Frame salvati	172

Video DJI_0048	
Durata [minuti]	9:20
Numero di <i>frame</i>	16832
Passo	20
Coeff. Correlazione	0.7
Frame estrapolati	703
Frame salvati	261

6.2.3.2 Elaborazione con il software Agisoft PhotoScan

Il software PhotoScan esegue l'elaborazione fotogrammetrica di immagini digitali usando i principi della *Structure from Motion* e consente la generazione di un modello tridimensionale. Le operazioni effettuate sono le medesime di quelle eseguite nel PARAGRAFO 6.1.2, ma in questo caso l'elaborazione prevede una prima parte in cui i tre set di foto saranno elaborati in tre diversi "Chunk", blocchi di immagini che il software considera indipendenti, per poi unirli prima di sviluppare la nube densa. Le operazioni effettuate possono essere così schematizzate (FIGURA 6.52):

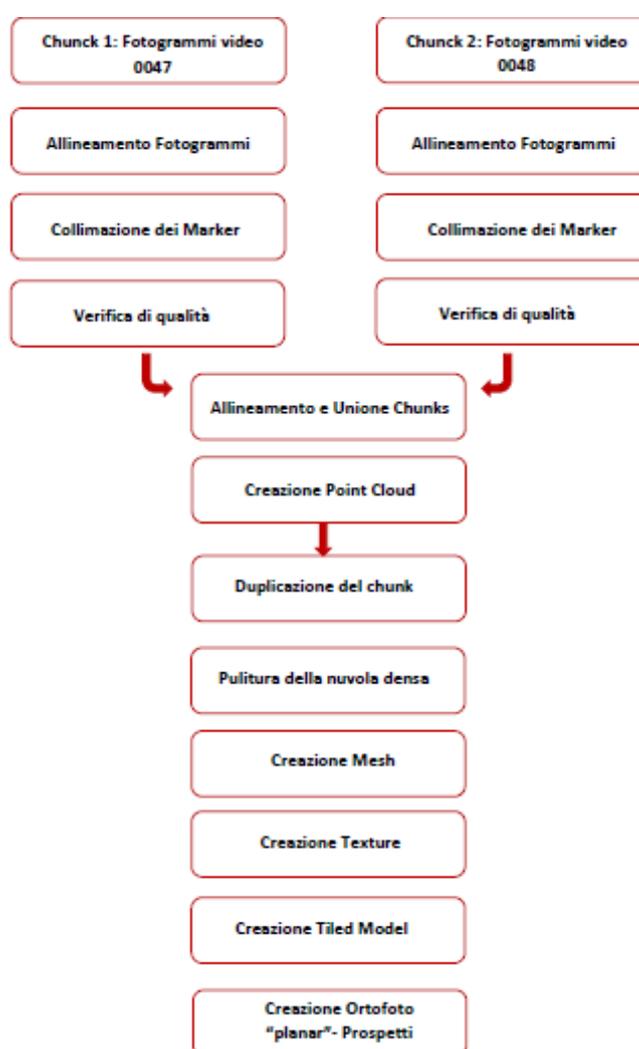


Figura 6.52- Schematizzazione operazioni effettuate

6.2.3.3 Allineamento dei fotogrammi

Dopo aver caricato i *frame* estratti dal video nel programma è stato possibile effettuare l'allineamento, generando un primo modello tridimensionale. Durante questa fase il

programma è in grado di determinare il modello della camera fotografica utilizzando le informazioni contenute nei dati EXIF delle immagini e poiché le immagini caricate sono estratte dai video, il *software* ha determinato esclusivamente la risoluzione delle stesse.

Camera Model	Resolution	Focal Lenght	Pixel size
Unknown	3840 x 2160	Unknown	Unknown

- **Chunk 1**



Figura 6.53- Allineamento fotogrammi estratti video 0047

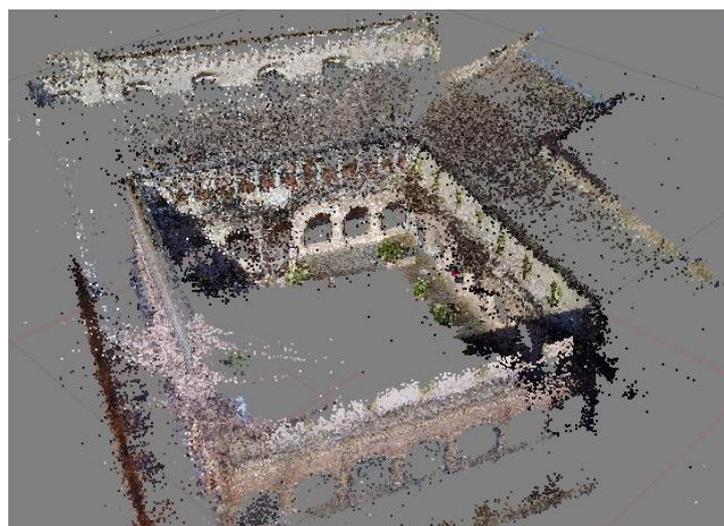


Figura 6.54- Nuvola sparsa, chiostro Tolentino, acquisizione Mavic Pro, Febbraio 2017

Tabella 6.22- Caratteristiche nuvola sparsa di punti-Chunck 1

Risultati generazione della nuvola sparsa	
Numero di camere	172
Accuracy	High
Pair preselection	Disabled
Matching time	55 minuti e 32 secondi
Alignment time	37 minuti e 23 secondi
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti

- **Chunck 2**

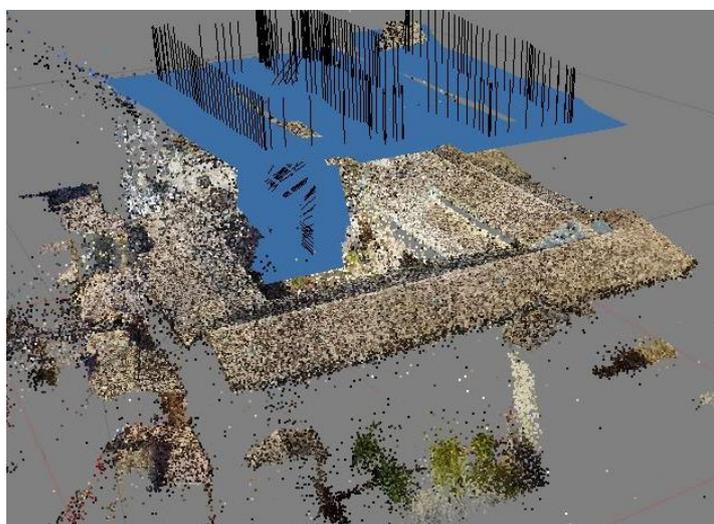


Figura 6.55- Allineamento fotogrammi estratti video 0048

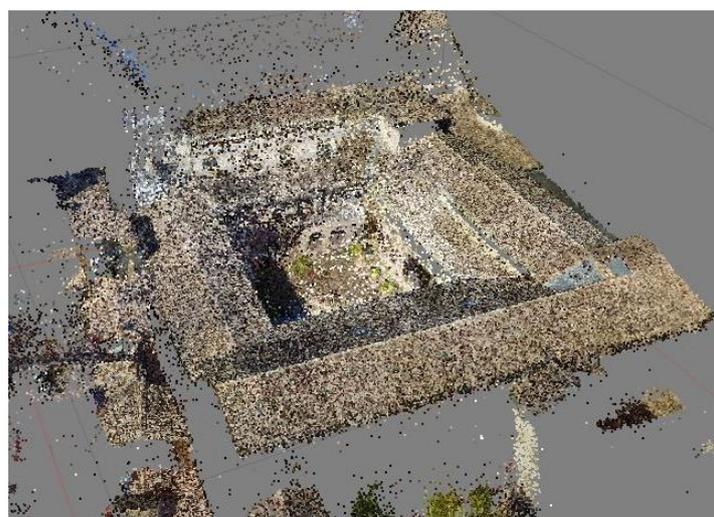


Figura 6.56- Nuvola sparsa, chiostrò Tolentino, acquisizione Mavic Pro, Febbraio 2017

Tabella 6.23- Caratteristiche nuvola sparsa di punti-Chunck 2

Risultati generazione della nuvola sparsa	
Numero di camere	261
Accuracy	High
Pair preselection	Disabled
Matching time	1 ora e 57 minuti
Alignment time	1 ora e 37 minuti
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti

6.2.3.4 Georeferenziazione

La georeferenziazione del modello tridimensionale è realizzata mediante l’inserimento delle coordinate dei GCP-*Ground Control Point*, contenute in un *file .txt*, all’interno del *software* e la loro collimazione sulle immagini.

Una volta collimati tutti i punti di coordinate noti, è consigliabile una ri-ottimizzare dei parametri interni ed esterni della camera fotografica, in modo da eliminare la deformazione non lineare e minimizzare l’errore di proiezione.

- **Chunck 1**

Tabella 6.24- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)

Marker	XY Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
F1	0,018	-0,009	0,020
F10	0,002	0,01	0,010
F12	0,014	-0,006	0,015
F13	0,02	0	0,020
F14	0,045	-0,005	0,045
F18	0,028	0,021	0,035
F2	0,033	-0,019	0,038
F24	0,012	0,014	0,019
F25	0,017	0,003	0,017
F3	0,016	-0,018	0,024
F31	0,02	-0,016	0,026
F32	0,023	-0,013	0,026
F33	0,023	-0,003	0,023

Marker	XY Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
F34	0,025	0,003	0,025
F35	0,038	-0,005	0,038
F36	0,008	-0,007	0,011
F37	0,01	-0,001	0,010
F38	0,014	0,009	0,017
F4	0,017	-0,013	0,021
F41	0,03	0,002	0,03
F42	0,033	0,014	0,036
F46	0,034	0,01	0,036
F5	0,024	-0,004	0,025
F50	0,013	0,005	0,014
F53	0,016	0,002	0,016
F6	0,017	-0,0005	0,017
F9	0,023	0,021	0,032
RMS Error	0,023	0,011	0,024
Residui Max XYZ [m]	Residui Min XYZ [m]	Media [m]	SQM [m]
0,045	0,01	0,024	0,009

Tabella 6.25- Residui dei CP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)

Marker	XY Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
F51	0,062	0,015	0,064
F7	0,009	0,012	0,015
RMS Error	0,044	0,013	0,046
Residui Max XYZ [m]	Residui Min XYZ [m]	Media [m]	SQM [m]
0,064	0,015	0,040	0,034

- **Chunk 2**

Tabella 6.26- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)

Marker	XY Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
F31	0,017	0,022	0,028
F32	0,091	0,07	0,115
F33	0,061	0,003	0,061
F34	0,059	-0,019	0,062
F50	0,056	0,026	0,062
F51	0,058	0,048	0,076

F53	0,025	0,033	0,041
M00050	0,02	0,158	0,159
M00051	0,053	0,287	0,292
RMS Error	0,054	0,114	0,126
Residui Max XYZ [m]	Residui Min XYZ [m]	Media [m]	SQM [m]
0,292	0,028	0,1	0,082

Tabella 6.27- Residui dei CP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)

Marker	XY Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
F36	0,104	-0,085	0,135
F38	0,077	-0,103	0,129
RMS Error	0,092	0,094	0,132
Residui Max XYZ [m]	Residui Min XYZ [m]	Media [m]	SQM [m]
0,135	0,129	0,132	0,004

L'errore espresso in metri, restituito da PhotoScan, risulta in entrambi i *chunks* maggiore della tolleranza ammissibile, pari a 0.04 m. L'errore in questo caso risulta maggiore principalmente per due motivi. In primis le immagini utilizzate sono state estratte dai video e ciò ha comportato una diminuzione della qualità dell'immagine e una difficile determinazione dei parametri di orientamento interno ed esterni della camera fotografica. Inoltre, i video sono stati realizzati prima di collocare i *marker* artificiali sulle pareti del chiostro e per tale motivo la georeferenziazione si è effettuata collimando esclusivamente i punti naturali. Pertanto si è deciso di procedere con l'allineamento e unione dei due *chunks* per poter poi generare la nuvola densa.

6.2.3.5 Unione dei chunks

In seguito all'allineamento dei due *chunks*, realizzato mediante il comando "Workflow - Align Chunks" basato su *Marker*, è possibile unire i due modelli in un unico blocco attraverso il comando "Workflow - Merge Chunks". La prima operazione fondamentale da effettuare è la ri-ottimizzazione dei parametri della camera fotografica e infatti prima di procedere con la generazione della nuvola densa si devono nuovamente osservare gli errori residui dei GCP (TABELLA 6.28) e CP (TABELLA 6.29).

Tabella 6.28- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)

Marker	XY Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
F1	0,012	-0,013	0,019
F2	0,02	-0,025	0,032
F3	0,006	-0,026	0,026
F4	0,01	-0,022	0,025
F5	0,014	-0,015	0,021
F6	0,003	-0,012	0,013
F7	0,013	0,0002	0,013
F9	0,025	0,024	0,035
F10	0,002	0,014	0,015
F12	0,007	0,001	0,008
F13	0,028	0,008	0,029
F18	0,023	0,036	0,043
F24	0,007	0,016	0,017
F25	0,017	0,004	0,017
F31	0,023	-0,026	0,035
F32	0,013	-0,021	0,025
F33	0,027	-0,008	0,028
F35	0,016	-0,007	0,018
F36	0,025	-0,008	0,026
F37	0,006	0,001	0,006
F38	0,003	0,015	0,002
F41	0,034	0,005	0,034
F42	0,019	0,024	0,031
F46	0,034	0,005	0,035
F50	0,013	0,013	0,019
F53	0,011	0,015	0,019
RMS Error	0,018	0,017	0,025
Residui Max XYZ [m]	Residui Min XYZ [m]	Media [m]	SQM [m]
0,043	0,002	0,023	0,010

Tabella 6.29- Residui dei CP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)

Marker	XY Error [m]	Z Error [m]	XYZ Error [m]
F14	0,051	0,01	0,052
F34	0,045	0	0,045
F51	0,02	0,26	0,033
M00050	0,053	0,173	0,182
M00051	0,019	0,173	0,174
RMS Error	0,041	0,11	0,118

Residui Max XYZ [m]	Residui Min XYZ [m]	Media [m]	SQM [m]
0,182	0,033	0,097	0,074

Si può osservare come con l'unione dei due modelli (FIGURA 6.57 e FIGURA 6.58) l'errore è diminuito notevolmente, nonostante sia leggermente maggiore della precisione, pari a 0.02 m. Tale errore può essere ritenuto accettabile considerando le motivazioni espresse precedentemente e pertanto si può generare la nuvola densa.

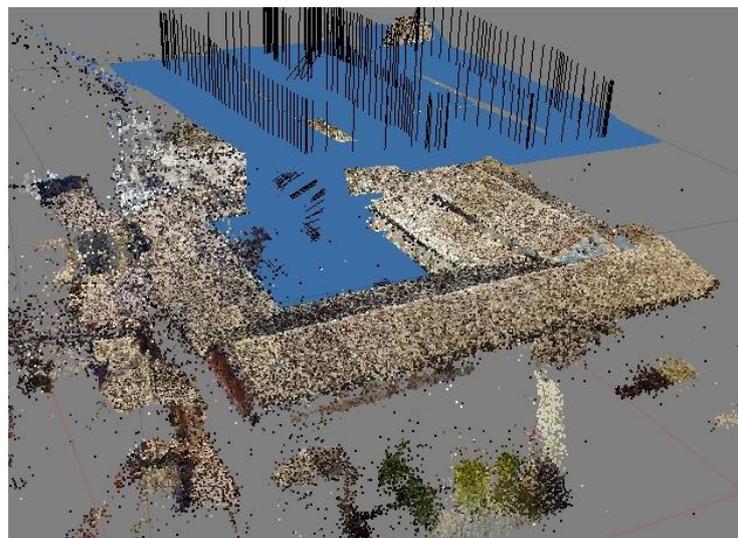


Figura 6.57- Unico modello tridimensionale dato dall'unione dei due chunks

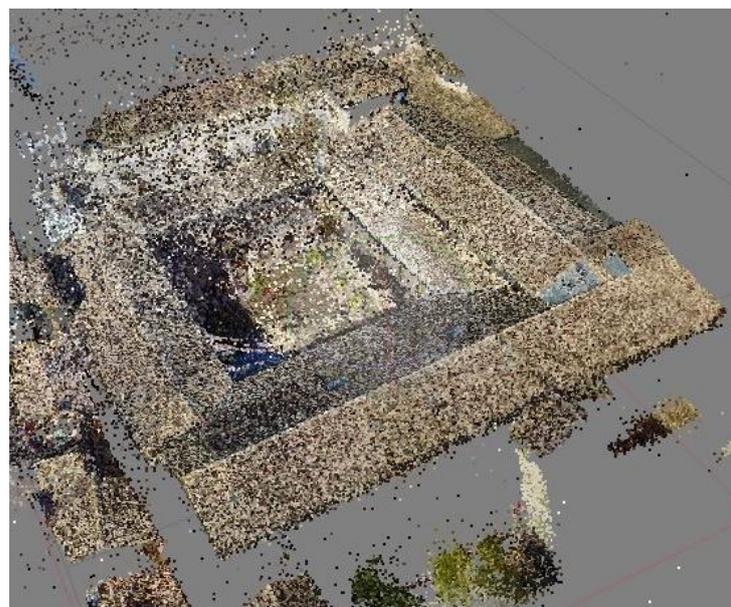


Figura 6.58- Nuvola sparsa, chiostro Tolentino, ottenuta dall'unione dei due chunks

6.2.3.6 Generazione nuvola densa

La nuvola densa (FIGURA 6.59) generata dal *software* delinea in maniera accurata la geometria dell'oggetto esaminato. Il prodotto finale generato presenta le caratteristiche indicate in TABELLA 6.30.

Tabella 6.30- Caratteristiche nuvola densa di punti

Risultati generazione della nuvola densa	
Quality	High
Depth Filtering modes	Moderate
Punti creati	47074330
Tempo necessario alla creazione	4 ore e 27 minuti
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti

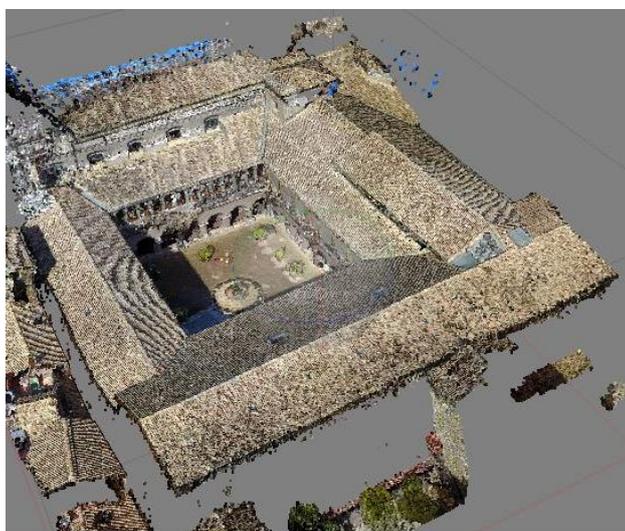


Figura 6.59- Nuvola densa, chiostro Tolentino, ottenuta dopo l'unione dei due chunks



Figura 6.60- Nuvola densa, chiostro Tolentino, ottenuta dopo l'unione dei due chunks con marker

Di seguito si riporta il grafico, FIGURA 6.61, contenente le tempistiche in percentuali di tutti i principali passaggi effettuati per giungere a un risultato corretto.

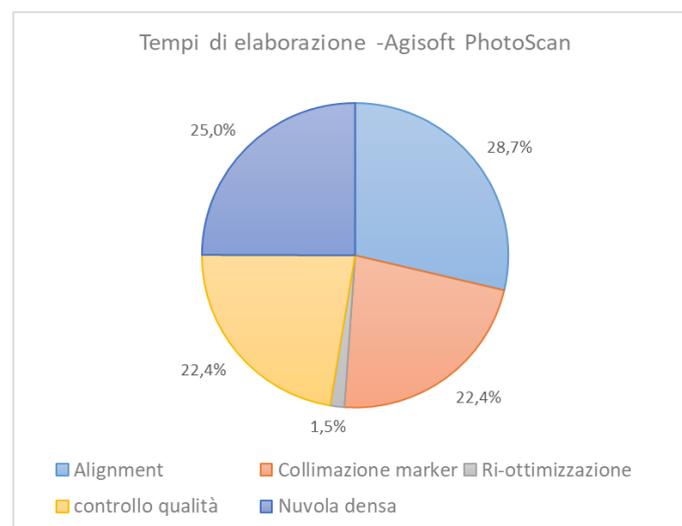


Figura 6.61- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio

6.2.3.7 Generazione dei prospetti

Le operazioni effettuate per la realizzazione delle quattro ortofoto dei prospetti sono identiche a quelle eseguite nel PARAGRAFO 6.2.2.5. Si è duplicato il *chunk* quattro volte e in ognuno di questi si sono cancellati i punti in corrispondenza degli altri tre lati del chiostro. Nella FIGURA 6.62 si illustra la nuvola di punti densa relativa al prospetto Nord-Ovest.



Figura 6.62- Nuvola densa, chiostro Tolentino, parete Nord-Ovest

Dopo aver ripulito la nuvola densa si può generare la *Mesh* e la *Texture* per delineare la forma dell'oggetto rilevato e renderlo così un modello fotorealistico. Si riportano i parametri e i tempi necessari per la realizzazione del prospetto Nord-Ovest nella TABELLA 6.31.

Tabella 6.31- Caratteristiche modello tridimensionale della sola parete Nord-Ovest

Risultati generazione del modello 3D	
Tipo di superficie	Arbitrary
Dati di partenza	Nuvola densa
Interpolazione	Disabled
Quality Mesh	High
Depth Filtering modes	Moderate
Facce creati	2311224
Tempo necessario alla creazione	16 minuti e 50 secondi
Mapping mode	Adaptive Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4.096 · 4.096
Blending time	5 minuti e 31 secondi
Caratteristiche del pc utilizzato	
Processore	Intel Core i7-2600 – 3.40GHz
RAM	32 GB
Scheda video	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti

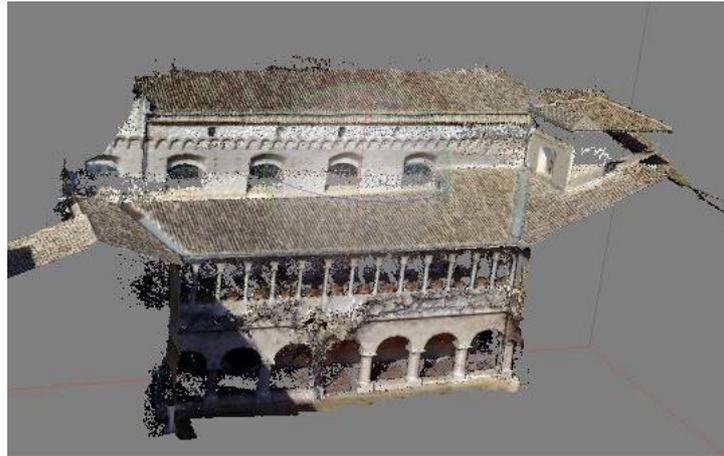


Figura 6.63- Mesh3D texture, chiostro Tolentino, parete Nord-Ovest

A questo punto prima di generare l'ortofoto è necessario un ulteriore passaggio. Infatti si devono individuare su ciascun prospetto tre *marker* che se collegati possono rappresentare una terna di assi cartesiani perfetta. Poiché è difficile rispettare questa condizione utilizzando quelli posizionati in loco, si è pensato di utilizzare un *marker* generico misurato, come punto d'origine della terna di assi cartesiani, di creare un nuovo punto costituito dalle coordinate E, N di un altro GCP presente, mentre la componente lungo l'asse Z viene posta uguale a quella del primo punto per creare un'asse perfettamente orizzontale, e infine il terzo punto è ottenuto traslando lungo l'asse Z l'origine del sistema cartesiano. In questo modo è possibile creare un sistema di riferimento cartesiano ad *hoc* da utilizzare come base per la realizzazione dell' "ortofoto *planar*" del singolo prospetto.

Nella FIGURA 6.64 si sono messi in evidenza i *marker* creati (TABELLA 6.32) per poter generare il prospetto Nord-Ovest.

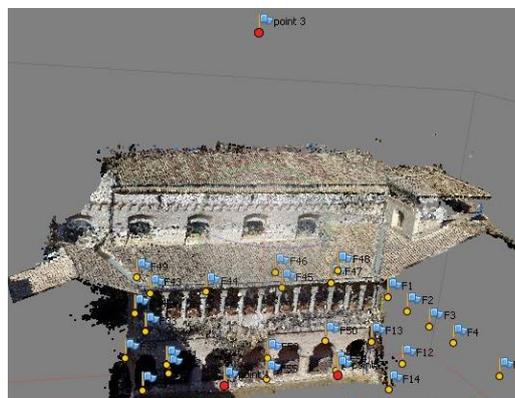


Figura 6.64-Modello tridimensionale con marker creati per generare il prospetto

Tabella 6.32- Marker creati ad hoc per la generazione del prospetto

Marker	Easting [m]	Northing [m]	Altitude [m]
Point1≡ L38	747.709	343.062	225.479
Point2	757.904	347.120	225.479
Point3	747.709	343.062	255.479

I file di output che si genera è il prospetto del singolo lato FIGURA 6.65 dimensione del pixel pari a 0.004 m in formato .TIFF.

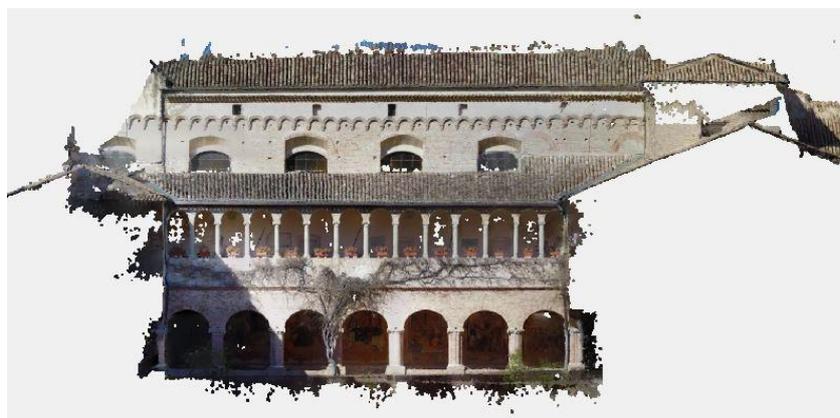


Figura 6.65- Prospetto Nord-Ovest

Di seguito si riporta il grafico, FIGURA 6.66, contenente le tempistiche in percentuali di tutti i principali passaggi effettuati per giungere a un risultato corretto.

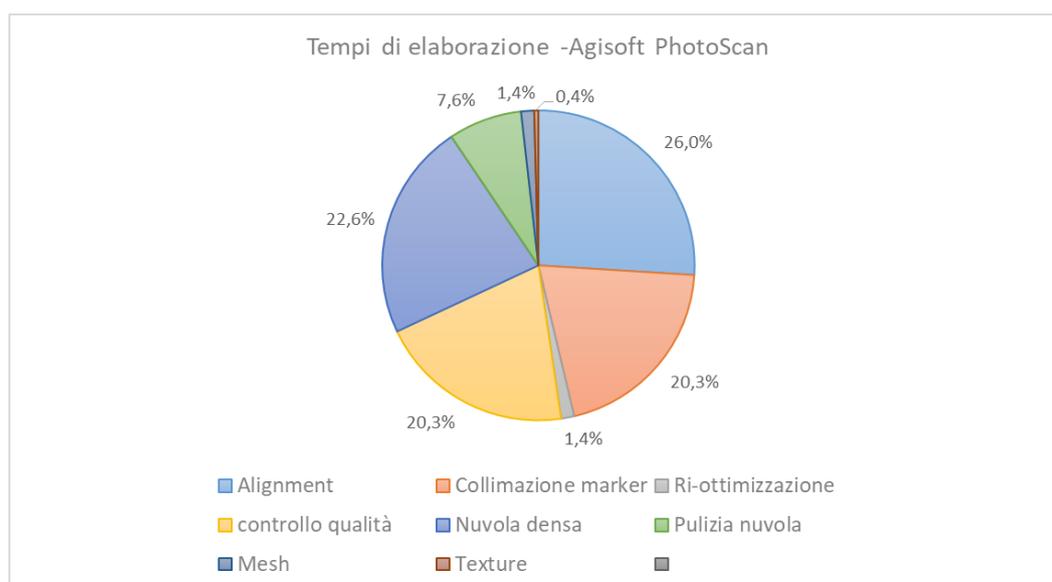


Figura 6.66- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio

7 Elaborazione delle nuvole di punti

7.1 Comparazione nuvole a scala territoriale

L'elaborazione tecnica delle nuvole di punti prevede un'analisi dei risultati generati dai *software* Pix4D, PhotoScan e VisualSFM, con lo scopo di evidenziarne le differenze.

Nella TABELLA 7.1 sono evidenziate le caratteristiche e i tempi di elaborazione delle singole fasi.

Tabella 7.1- Confronto caratteristiche software

Confronto nuvole di punti				
		Pix4D	PhotoScan	VisualSFM
Interfaccia		Grafica	Grafica	Grafica
Licenza		Commerciale	Commerciale	Open source
Autocalibrazione camera		Si	Si	Si
Immagini input		440	440	440
Inserimento GCP		Manuale e semi-automatico	Manuale e semi-automatico	Manuale
Numero di punti nuvola densa		90842558	70650129	15956868
Densità punti		Alta	Alta	Variabile
Risoluzione Nuvola		Alta	Alta	Non selezionabile
Output	Nuvola densa	Si	Si	Si tramite tool PMVS/CMVS
	Mesh	Si	Si	No
	DSM	Si	Si	No
	Ortofoto	Si	Si	No
Tempi di elaborazione				
Allineamento		2 ore	14 ore	3 ore
Inserimento GCP		2 ore	2 ore	4 ore
Nuvola Densa		10 ore	18 ore	4 ore

Dalla TABELLA 7.1 si evince come Pix4D e PhotoScan sono due *software* completi che consentono la selezione dei parametri delle singole fasi di elaborazione, determinando così la risoluzione ottimale dell'elaborato finale, mentre VisualSFM favorisce elaborazioni più rapide a scapito della precisione e della completezza.

Si è inoltre effettuato un confronto tra le nuvole dense di punti generate dai singoli *software*, FIGURA 7.1, esaminando la caratteristica di *number of neighbors*.

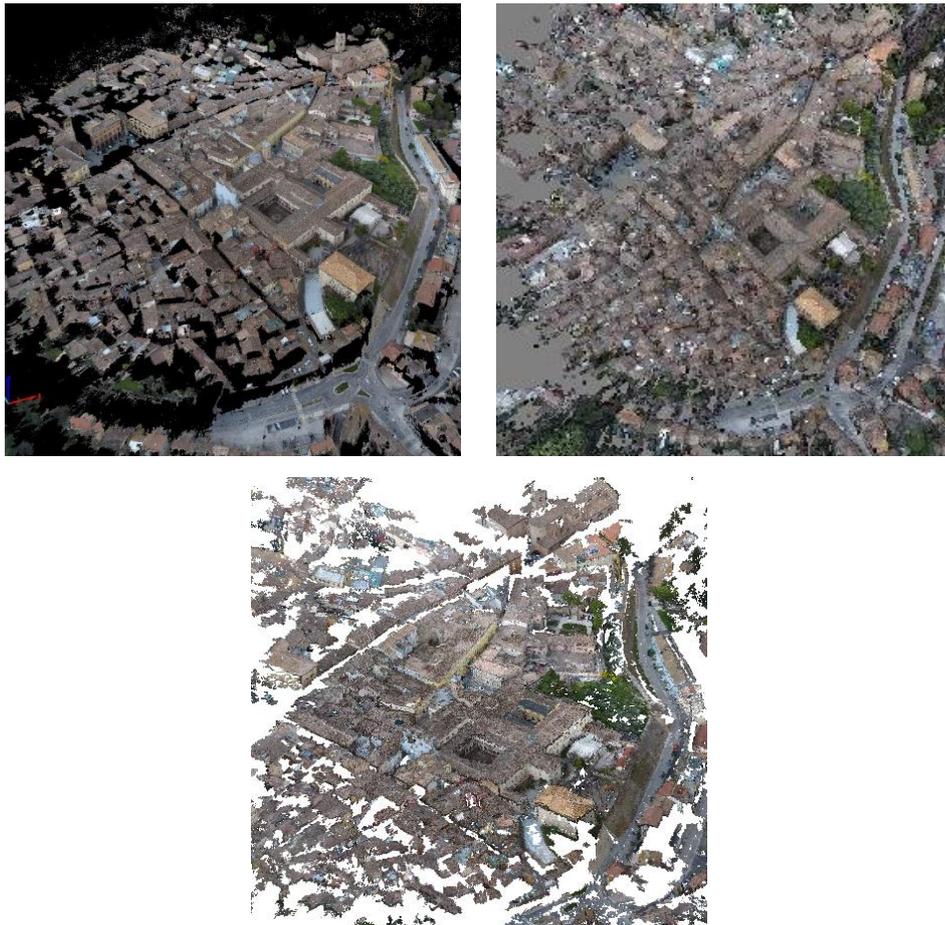


Figura 7.1- Nuvole di punti restituite da A) Pix4D B) PhotoScan C) VisualSFM

Il *software* utilizzato per effettuare le analisi dei dati tridimensionali è *Cloud Compare*, *open source*, che permette il confronto metrico tra le nuvole rappresentate in FIGURA 7.1 mediante gli strumenti di base.

Dall'analisi di *number of neighbors* (FIGURA 7.2), ovvero numero di punti compresi in un intorno di raggio in questo caso di 0.2m, si evince come la nuvola restituita da Pix4D presenta nella zona di ampio ricoprimento fotografico una densità di punti nettamente

maggiore rispetto alle nuvole generate dagli altri due *software*. Inoltre, in questa zona, si può osservare una distribuzione omogenea della nuvola di punti restituita da PhotoScan a differenza degli altri due programmi in cui ci sono anche aree con minore o maggiore densità di punti, rispettivamente VisualSFM e Pix4D.

I colori sono stabiliti in base ad una scala di rappresentazione che cambia tonalità a seconda del dato riscontrato. Per confrontare correttamente le tre nuvole si è impostata la stessa scala cromatica, modificando il numero massimo di punti nell'intorno considerato. Per tale motivo si è scelto il valore massimo pari al minimo valore di densità delle tre nuvole, questo è relativo alle nuvole di Photoscan (FIGURA 7.2-B) e VisualSFM (FIGURA 7.2-C) che presentano all'incirca lo stesso numero di punti. L'area verde indica le aree a media densità con valori compresi tra 34 e 78 punti per raggio, mentre la zona in rosso indica le aree ad alta densità con valori contenuti tra 145 e 179.

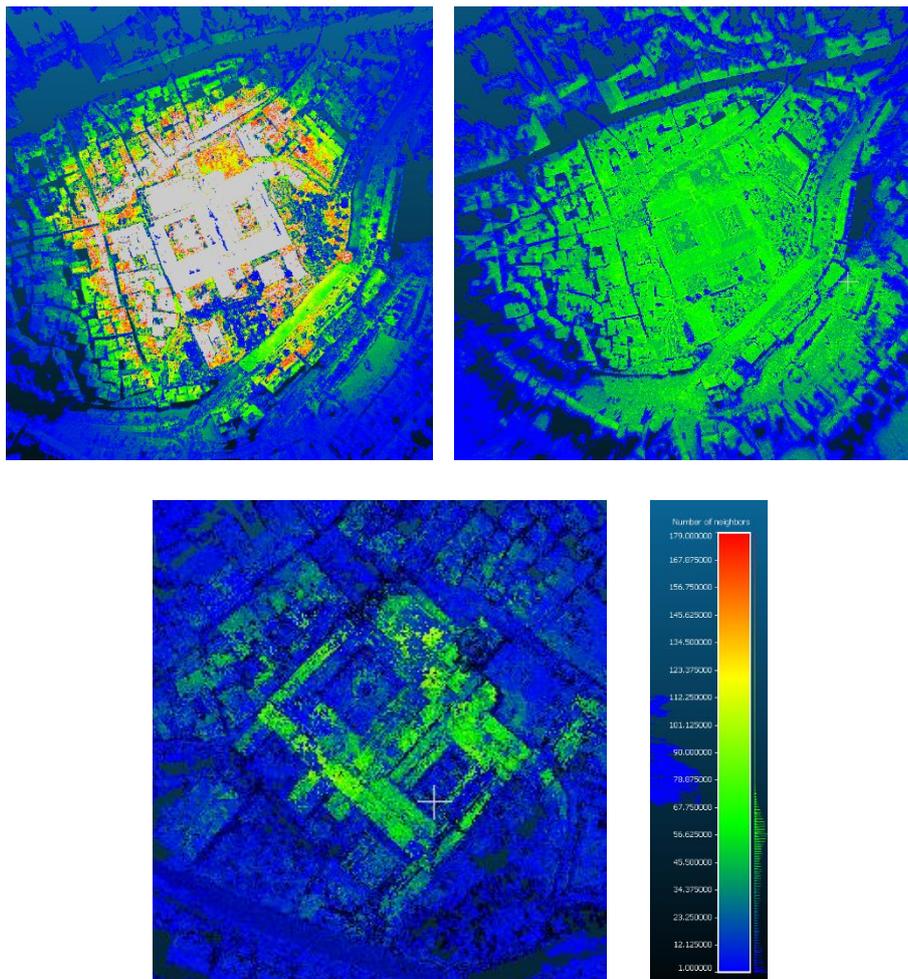


Figura 7.2- Analisi number of neighbors e scala di riferimento

Come affermato precedentemente la nuvola di punti generata da Pix4D possiede una densità maggiore rispetto alle altre nella zona di alto ricoprimento fotografico, che pertanto presenta un valore cromatico omogeneo grigio (FIGURA 7.2-A).

Cloud Compare restituisce gli stessi dati della FIGURA 7.2 sotto forma di istogramma FIGURA 7.3 mediante il comando *show histogram*, in cui sono indicate la media dei punti e la deviazione standard relative a ciascun nuvola di punti.

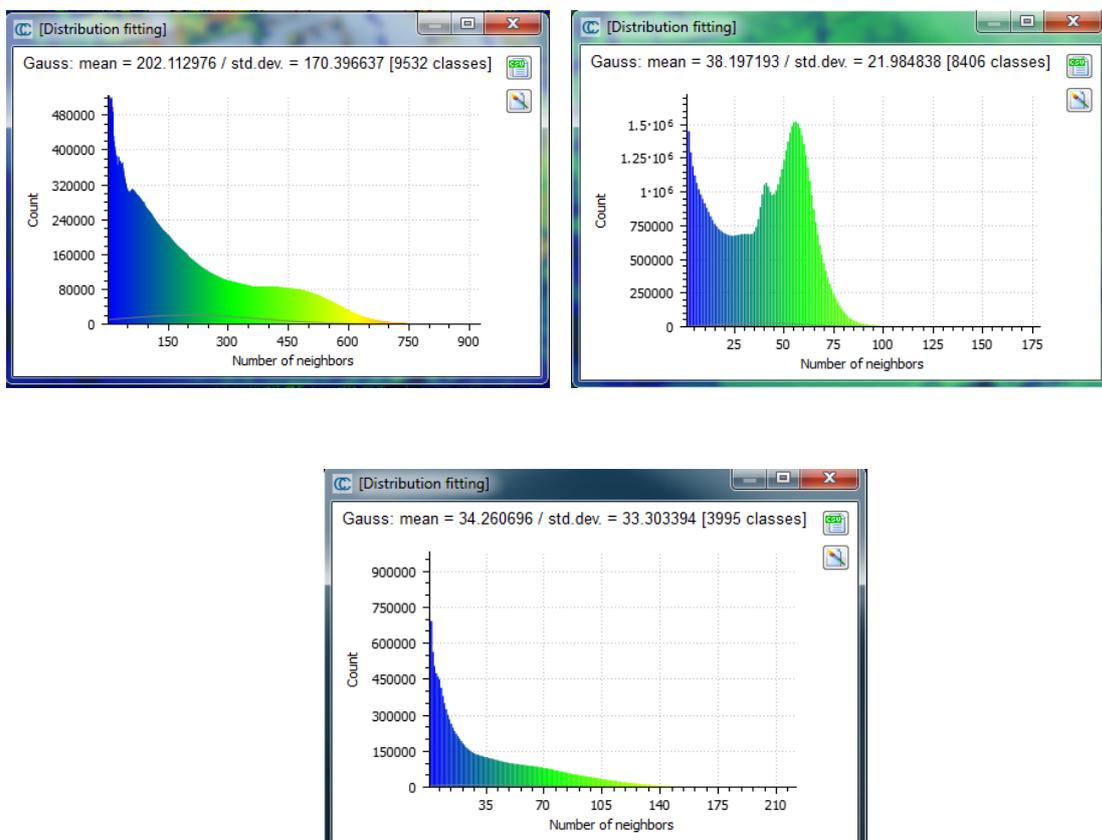


Figura 7.3-Istogramma sul number of neighbors relative alla nuvola di punti restituita A) Pix4D B) PhotoScan e C) VisualSFM

Inoltre si è valutata la completezza del modello altimetrico rispetto alla sua griglia, ovvero si sono evidenziate le zone in cui la densità risulta nulla. (Linee guida-Ortofotografie 1:10000 e Modelli altimetrici)

In Figura 7.4 e FIGURA 7.5 si illustrano i risultati ottenuti, schematizzati in TABELLA 7.2.

Tabella 7.2- Completezza modelli altimetrici realizzati con i software Pix4D e PhotoScan

Completezza Modello Altimetrico		
	Pix4D	PhotoScan
Griglia modello [m]	0.05·0.05	0.05·0.05
Colonne · Righe	10658x10214	24553x18048
Completezza=No Data	96734847	405129112



Figura 7.4- Modello Altimetrico realizzato con il software Pix4D, la completezza è rappresentata in rosso

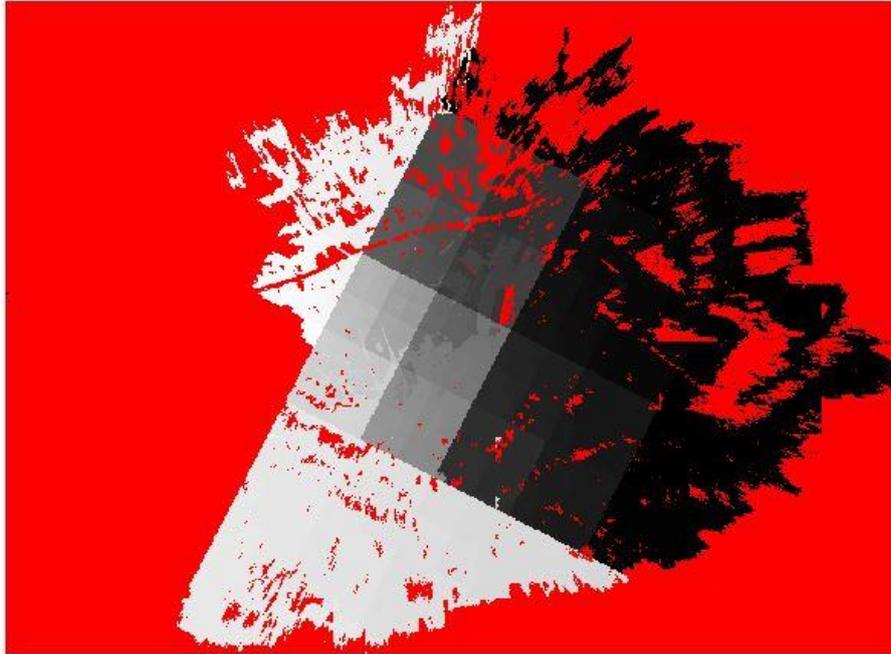


Figura 7.5- Modello Altimetrico realizzato con il software Photoscan, la completezza è rappresentata in rosso

7.2 Comparazione nuvole a scala architettonica

L'oggetto di studio è stato rilevato, come spiegato precedentemente, con tecniche differenti, quali *laser scanner*, fotogrammetria terrestre e aerea mediante UAV. Per tale motivo, si è effettuata un'analisi delle nuvole di punti restituite dai *software* per verificare la correttezza e la loro congruenza. Con il programma Cloud Compare è stato possibile effettuare l'analisi della densità dei punti e la distanza assoluta "Cloud to Cloud" tra porzioni uguali delle nuvole generate con l'elaborazione dei dati, con lo scopo di determinare le nuvole di punti da utilizzare come base per il modello parametrico tridimensionale realizzato in Revit.

Il chiostro di San Nicola da Tolentino è stato suddiviso nei quattro prospetti sia per la parte interna affrescata sia per la parte esterna caratterizzata dal colonnato e nella copertura. Sono state dunque effettuate le seguenti comparazioni:

- Parete affrescata – comparazione tra la nuvola acquisita mediante *laser scanner* e quella con fotogrammetria terrestre;
- Parete esterna – comparazione tra la nuvola acquisita mediante *laser scanner* e quella con fotogrammetria aerea mediante UAV;

- Copertura– comparazione tra la nuvola acquisita mediante *laser scanner* e quella con fotogrammetria aerea mediante UAV.

Analisi di densità

Come si evince dalla FIGURA 7.7 la densità dei punti della nuvola acquisita dal *laser scanner* è circa 2 volte maggiore rispetto a quella fotogrammetrica. Inoltre, la distribuzione della nuvola dei punti risulta in entrambi i casi omogeneamente distribuita.

Di seguito si riporta un esempio dell'analisi effettuata relativa al prospetto Nord-Ovest (FIGURA 7.7), delle restanti si riportano solo i dati caratteristici quali media e deviazione standard nella TABELLA 7.3, mentre i grafici e la visualizzazione della distribuzione sono riportati nell' ALLEGATO A4.

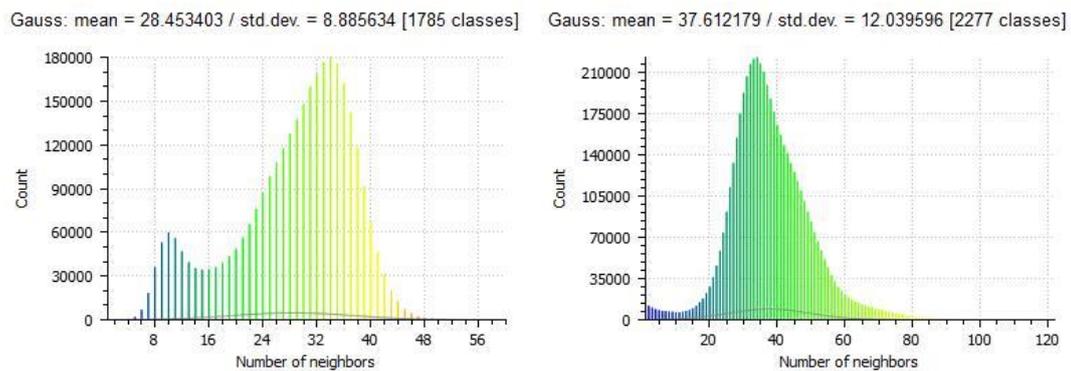


Figura 7.6- Grafici del number of neighbors A) Fotogrammetria terrestre B) Laser scanner

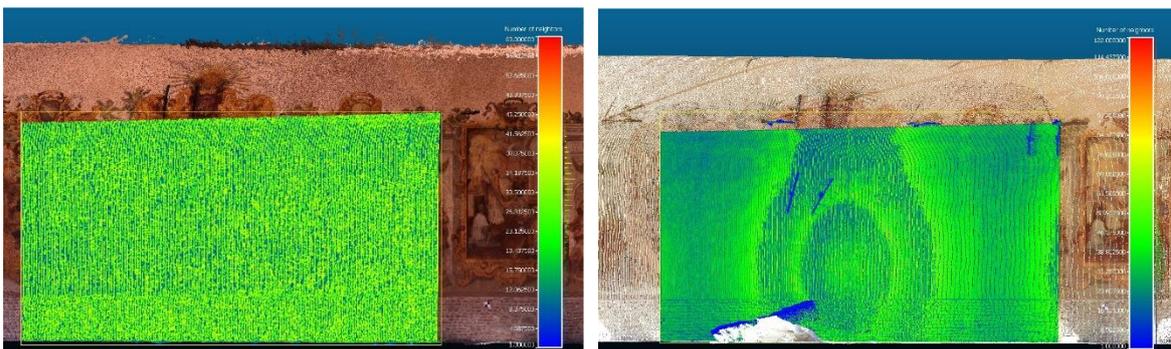


Figura 7.7- Visualizzazione della distribuzione dei number of neighbors A) Fotogrammetria terrestre B) Laser scanner

Tabella 7.3- Tabella riassuntiva dei parametri di media e deviazione standard relativi ai quattro prospetti

	Fotogrammetria terrestre		Laser scanner	
	Media	Deviazione standard	Media	Deviazione standard
Prospetto Nord-Ovest	28.45	8.88	37.61	12.04
Prospetto Nord-Est	30.73	10.82	40.33	14.43
Prospetto Sud-Est	29.34	9.98	37.28	10.75
Prospetto Sud-Ovest	28.94	9.19	35.36	10.08

Inoltre, è stata effettuata tale analisi anche per la parte esterna confrontando questa volta le nuvole di punti acquisite dalla fotogrammetria aerea con UAV, mediante video, e tecnica *laser scanner*.

Come si evince dalla FIGURA 7.9 la densità dei punti della nuvola acquisita dal *laser scanner* è circa 8 volte maggiore rispetto a quella fotogrammetrica.

Di seguito si riporta un esempio dell'analisi effettuata relativa al prospetto Nord-Ovest (FIGURA 7.9), delle restanti si riportano solo i dati caratteristici quali media e deviazione standard nella TABELLA 7.4, mentre i grafici e la visualizzazione della distribuzione sono riportati nell' ALLEGATO A4.

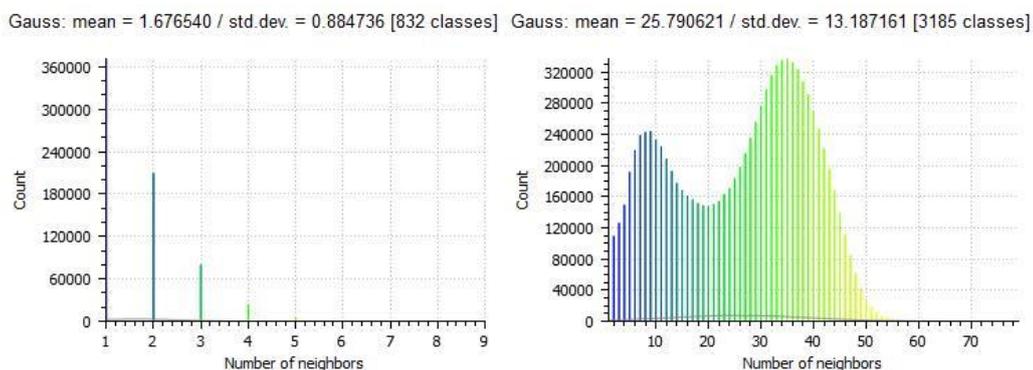


Figura 7.8- Grafici del number of neighbors A) Fotogrammetria aerea con UAV B) Laser scanner

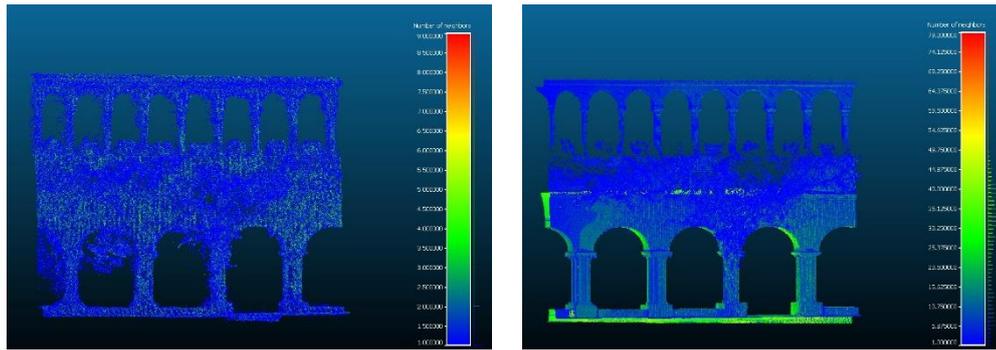


Figura 7.9- Visualizzazione della distribuzione dei number of neighbors A) Fotogrammetria aerea con UAV B) Laser scanner

Tabella 7.4- Tabella riassuntiva dei parametri di media e deviazione standard relativi ai quattro prospetti

	Fotogrammetria aerea mediante UAV		Laser scanner	
	Media	Deviazione standard	Media	Deviazione standard
Prospetto Nord-Ovest	1.68	0.88	25.79	13.19
Prospetto Nord-Est	1.73	0.89	26.44	12.54
Prospetto Sud-Est	1.57	0.77	23.27	11.96
Prospetto Sud-Ovest	1.68	0.87	19.61	11.79

Analisi “Cloud to cloud”

Si sono effettuate analisi “Cloud to Cloud” per verificare la congruenza dei risultati ottenuti con le differenti tecniche di rilevamento. Infatti, si può osservare come la distanza fra le nuvole di punti risulta inferiore all’errore massimo ammissibile.

Di seguito si riporta un esempio dell’analisi effettuata relativa al prospetto Nord-Ovest (FIGURA 7.11), delle restanti si riportano solo i dati caratteristici quali media e deviazione standard nella TABELLA 7.5, mentre i grafici e la visualizzazione della distribuzione sono riportati nell’ ALLEGATO A4.

Gauss: mean = 0.003148 / std.dev. = 0.001771 [1785 classes]

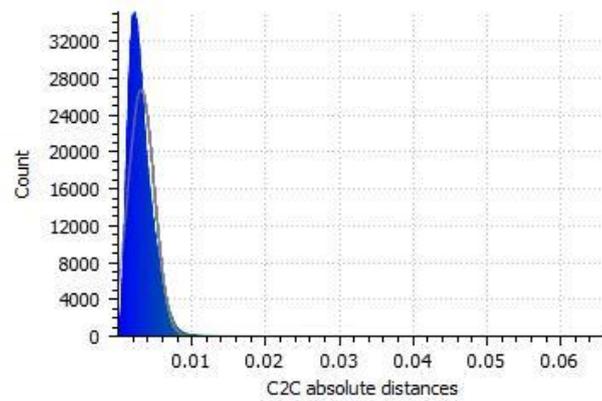


Figura 7.10- Grafico relativo alla distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con laser scanner e fotogrammetria terrestre

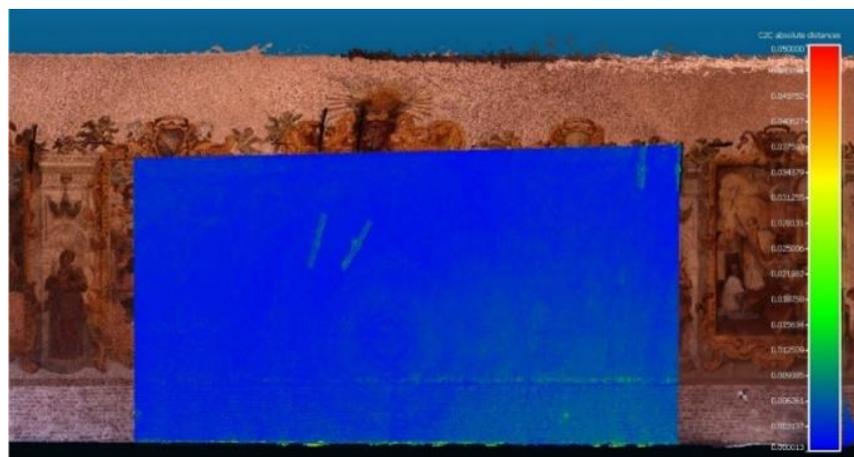


Figura 7.11- Visualizzazione della distribuzione della distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con laser scanner e fotogrammetria terrestre

Tabella 7.5- Tabella riassuntiva dei parametri di media e deviazione standard relativi ai quattro prospetti

Distanza Assoluta tra le nuvola di punti		
	Media [mm]	Deviazione standard [mm]
Prospetto Nord-Ovest	3,1	1,7
Prospetto Nord-Est	3,7	1,7
Prospetto Sud-Est	3,4	3,4
Prospetto Sud-Ovest	2,7	1,3

Inoltre, è stata effettuata tale analisi anche per la parte esterna confrontando questa volta le nuvole di punti acquisite mediante fotogrammetria aerea con UAV e tecnica *laser scanner*. In questo caso la distanza tra le nuvole risulta maggiore rispetto a quella ottenuta

precedentemente, in quanto i dati di *input* relativi sono *frame* estratti dal video registrato dal Dji Mavic. Per tale motivo, la qualità del dato risulta inferiore e di conseguenza il risultato ottenuto con l'elaborazione dei dati presenta un errore dell'ordine del centimetro, come spiegato nel PARAGRAFO 6.2.3, accettabile per la scala di rappresentazione finale.

Di seguito si riporta un esempio dell'analisi effettuata relativa al prospetto Nord-Ovest (Figura 7.13), delle restanti si riportano solo i dati caratteristici quali media e deviazione standard nella TABELLA 7.6, mentre i grafici e la visualizzazione della distribuzione sono riportati nell' ALLEGATO A4.

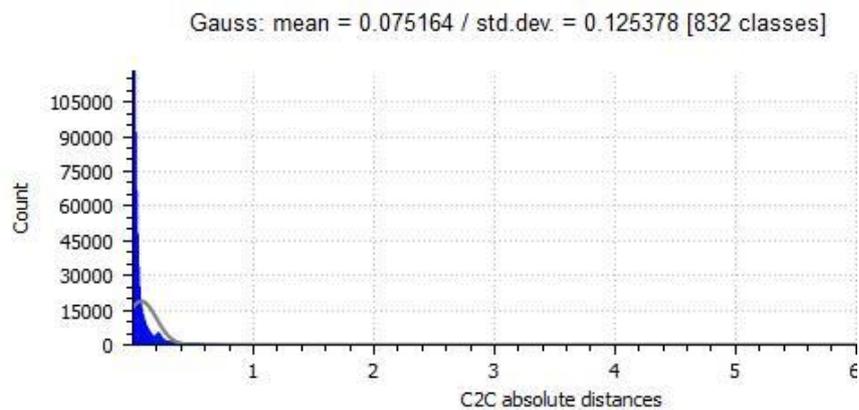


Figura 7.12- Grafico relativo alla distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con laser scanner e fotogrammetria aerea mediante UAV.

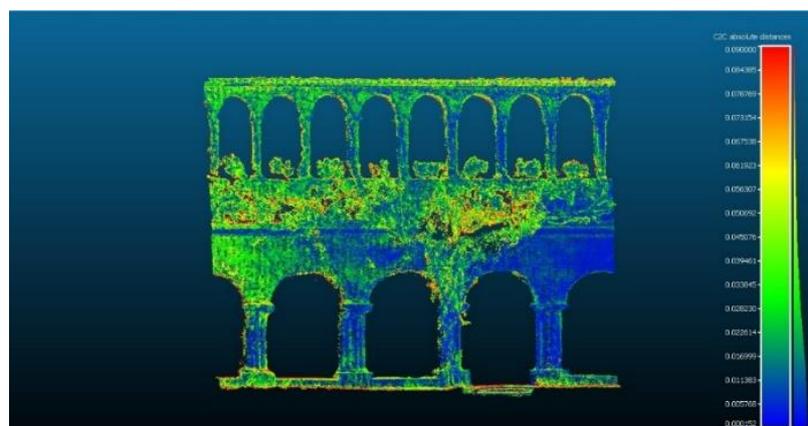
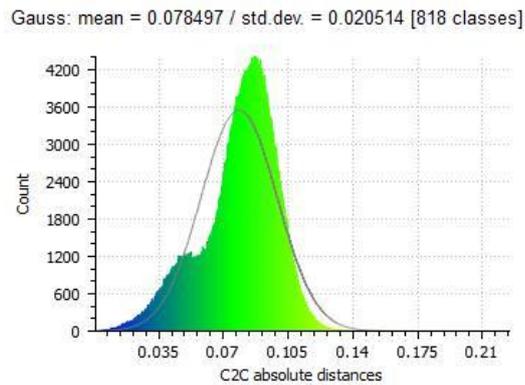
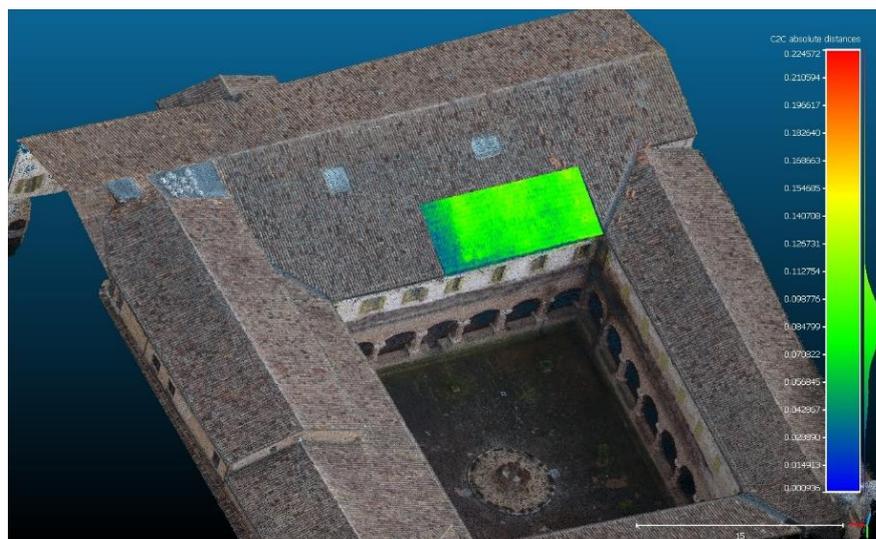


Figura 7.13- Visualizzazione della distribuzione della distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con laser scanner e fotogrammetria aerea mediante UAV.

Tabella 7.6- Tabella riassuntiva dei parametri di media e deviazione standard relativi ai quattro prospetti

Distanza Assoluta tra le nuvole di punti		
	Media [mm]	Deviazione standard [mm]
Prospetto Nord-Ovest	75	125
Prospetto Nord-Est	96	177
Prospetto Sud-Est	54	74
Prospetto Sud-Ovest	35	45

Infine è stata condotta un'analisi per confrontare la porzione di copertura acquisita sia dal *laser scanner* sia dal *Dji Mavic*. Come si evince dal grafico (FIGURA 7.14) la distanza media è dell'ordine del centimetro, paragonabile ai risultati ottenuti nella precedente analisi.

Figura 7.14- Grafico relativo alla distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con *laser scanner* e fotogrammetria aerea mediante UAV.Figura 7.15- Visualizzazione della distribuzione della distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con *laser scanner* e fotogrammetria aerea mediante UAV.

7.3 Preparazione nuvole di punti per Revit

Una volta effettuate le analisi precedentemente elencate, è necessario elaborare le nuvole di punti per poter ottenere un unico modello utilizzabile in AutoDesk Revit. Per generare tale modello si è adoperato inizialmente il *software* 3D RESHAPER per la pulizia, l'alleggerimento del peso delle scansioni e l'unione delle nuvole di punti e successivamente il *software* RECAP 360 per suddividere la nuvola in componenti architettoniche esportate nel formato .rcs supportato da AutoDesk Revit.

7.3.1 Pulizia e taglio

Dalle analisi di comparazione delle nuvole di punti, PARAGRAFO 7.2, si evince come la parte inferiore del chiostro, rilevato con tecnica laser scanner, presenta con una completezza maggiore. Per tale motivo si è proceduto al taglio di tale parte come mostrato in FIGURA 7.16.



Figura 7.16- Sezione inferiore del Chiostro

La copertura, invece, non è stata rilevata interamente dal *laser scanner* e per tale motivo è necessario procedere al mantenimento dei punti della nuvola fotogrammetrica. Si è proceduto così al taglio (FIGURA 7.17), eliminando completamente la parte inferiore della nuvola di punti.



Figura 7.17- Sezione superiore del Chiostro

Il *software* 3D RESHAPER consente di unire nuvole acquisite con tecniche di rilevamento differenti, come in questo caso, importabile e utilizzabile nei *software* PointCab e RECAP 360. Prima di procedere con l'esportazione della nuvola di punti è necessario filtrarla a causa dell'elevato peso e numero di punti, che non consentono la sua elaborazione con i successivi programmi. Per fare ciò è sufficiente selezionare la nuvola di punti, cliccare "Nuvola - Filtra/divide nuvola" e impostare la percentuale di punti da mantenere, in questo caso il 60%.

Il *software* PointCab è stato adoperato per verificare che la nuvola dei punti (FIGURA 7.18) ottenuta dall'unione sia metricamente corretta e infatti il programma consente la generazione di piani e sezioni bidimensionali dettagliati, vettorizzati in AutoCAD e riportate nelle TAVOLA DA 9 A 15.

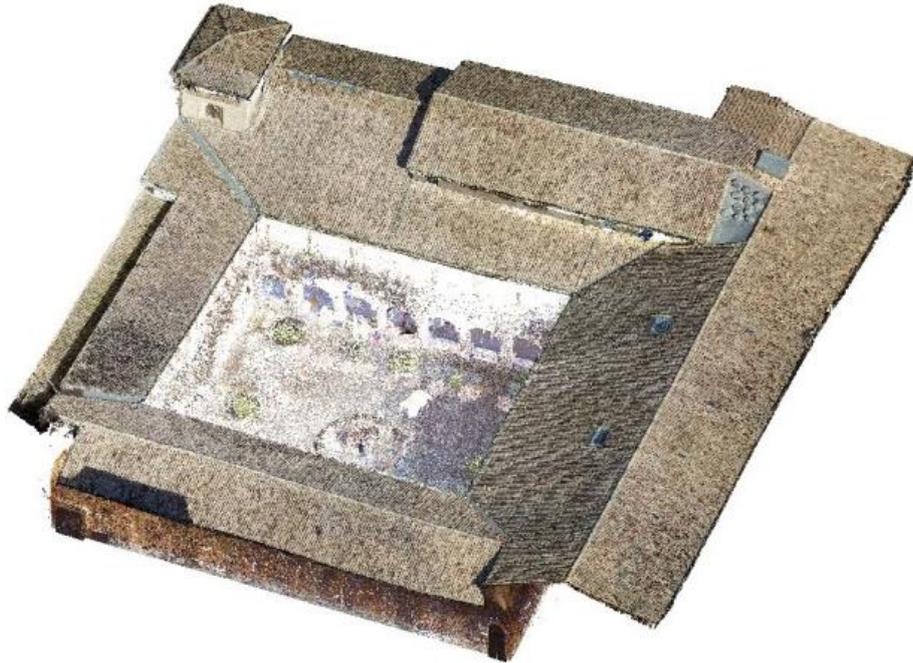


Figura 7.18- Modello tridimensionale del Chiostro da Tolentino

7.3.2 Suddivisione della nuvola di punti per componenti architettoniche

Il *software* Revit, utilizzato per generare il modello tridimensionale parametrico, è in grado di gestire le nuvole di punti, ma per agevolare la loro elaborazione si è deciso di suddividere tale nuvola in regioni considerando le componenti architettoniche.

Le componenti architettoniche individuate (FIGURA 7.19) sono:

- Copertura;
- Muri interni;
- Muri esterni;
- Volte a botte;
- Volta a crociera.

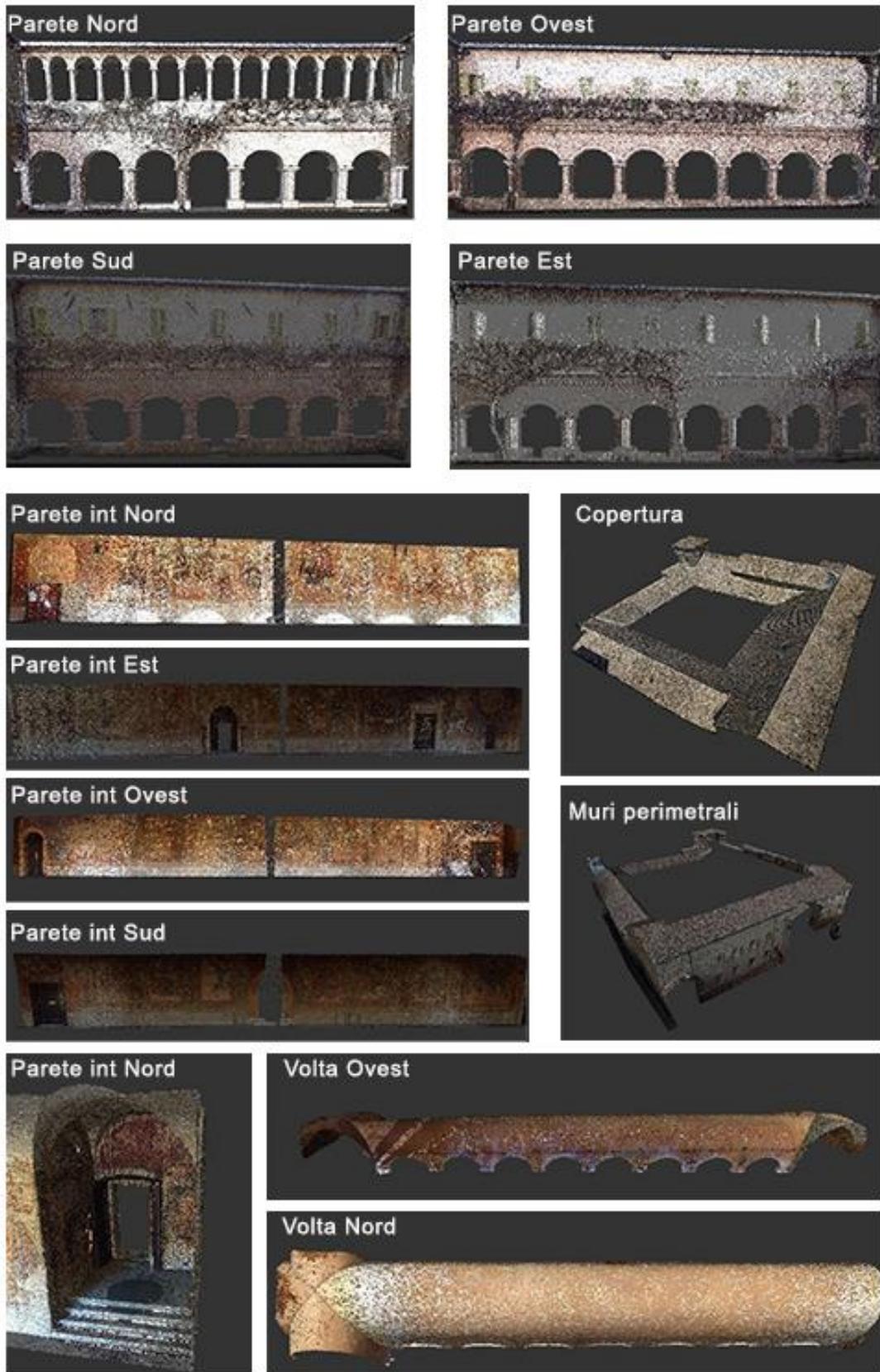


Figura 7.19- Componenti architettoniche

8 Schedatura della conoscenza di base dei beni architettonici

La conoscenza della costruzione storica è un presupposto fondamentale per la realizzazione di un modello parametrico utilizzabile per la scelta di un efficace intervento di miglioramento.

In loco si è deciso di compilare la scheda per il monitoraggio dello stato di conservazione dei beni architettonici elaborata dal Ministero per i Beni e le Attività Culturali e riportata nella Linee Guida BBCC del 2010.

Il grado di affidabilità del modello dipende dall'accuratezza delle operazioni di rilievo, dalle ricerche storiche e dalle indagini sperimentali effettuabili sul manufatto storico.

Di seguito si riportano le principali attività che possono essere sufficienti per la conoscenza del bene architettonico:

- Identificazione della costruzione, la sua localizzazione, il contesto urbano;
- rilievo geometrico della costruzione, ovvero individuazione delle caratteristiche plano-altimetriche degli elementi costruttivi;
- individuazione della evoluzione del manufatto, considerando l'ipotetica struttura originaria e quella attuale;
- identificazione dei materiali, delle loro proprietà meccaniche;
- la conoscenza del sottosuolo e delle fondazioni.

Le informazioni acquisite sono state schematizzate nella TABELLA 8.1, in cui si riportano i dati per individuare in modo univoco il manufatto, e TABELLA 8.2, in cui si descrivono gli elementi strutturali.

Tabella 8.1- Dati riguardanti l'aspetto anagrafico identificativo dell'elemento oggetto di studio

A1	Qualificazione giuridica del soggetto proprietario	Ente Pubblico
A2	Riferimenti del soggetto proprietario	Comune di Tolentino (Macerata)
A3	Denominazione del bene	Basilica e Chiostro di San Nicola da Tolentino
A4	Toponomastica	Marche, Macerata, Tolentino, Piazza S. Nicola, 1
A5	Coordinate geografiche	1848065.08 E, 4792728.81 N - Monte mario / Gauss Boaga
A6	Dati catastali	-
A7	Confinanti	-
A8	Periodo di realizzazione	XIII- XIV secolo
A9	Destinazione d'uso	Luogo di culto - Convento
A10	Documentazione fotografica	ALLEGATO A.5
A11	Stralcio planimetrico	-
A12	Descrizione Morfologica	Il chiostro è di forma rettangolare sviluppato su due livelli. Al livello inferiore vi sono i portici, costituiti da otto e sette arcate ribassate per ciascuna coppia di lati che poggiano su 30 colonne di forma differenti. Al livello superiore si colloca il convento, ad eccezione del lato Nord dove è presente un loggiato sostenuto da 16 colonne.
A13	Presenza di elementi di pregio	La galleria del chiostro presenta pareti con affreschi barocchi eseguiti da Giovanni Anastasi e Agostino Orsoni tra il 1690 e il 1695. Negli affreschi sono raffigurati gli stemmi delle famiglie gentilizie che hanno commissionato l'opera. Nella cornice posta al di sopra delle arcate sono inseriti dei bacini ceramici con decori tipici della maiolica arcaica. (Centro studi Agostino Trapè,2008)
A14	Altra documentazione	ALLEGATO A.6
A15	Valutazione di interesse culturale	Elevata

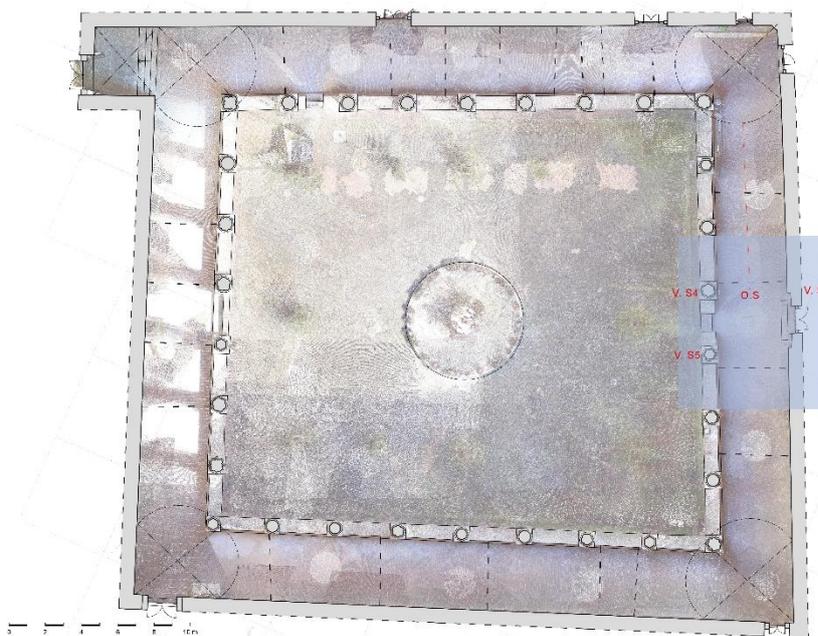


Figura 8.1- Codifica degli elementi strutturali della porzione esaminata del chiostro

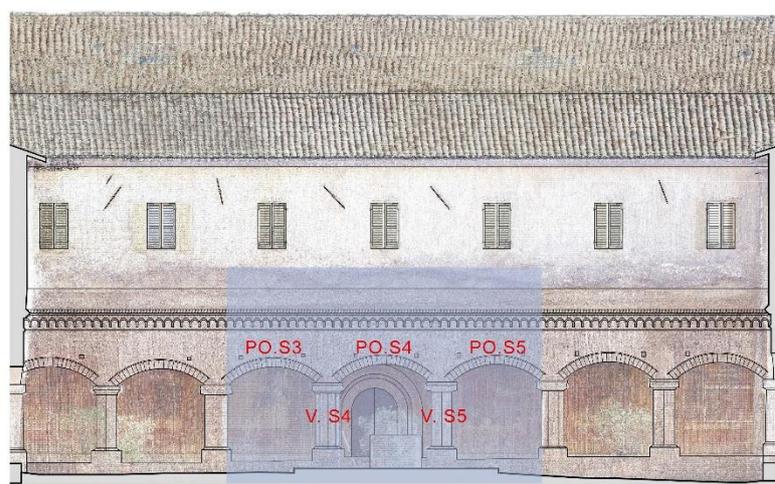


Figura 8.2- Codifica degli elementi strutturali della porzione esaminata del chiostro

Tabella 8.2- Dati riguardanti la morfologia degli elementi

		Codifica degli elementi strutturali	
C1	Elementi verticali		V.S4
			V.S5
			V.S
	Elementi orizzontali		O.S
	Elementi portanti orizzontali		PO.S3
			PO.S4
		PO.S5	

C2	Ispezionabilità	
	V.S4	Ispezionabile
	V.S5	Ispezionabile
	V.S	Ispezionabile
	O.S	Parzialmente ispezionabile
	PO.S3	Parzialmente ispezionabile
	PO.S4	Parzialmente ispezionabile
	PO.S5	Parzialmente ispezionabile
C3	Morfologia	
	V.S4	Colonna a sezione poligonale, a fiore con 6 lati
	V.S5	Colonna a sezione esagonale
	V.S	Setto continuo.
	O.S	Resistente per forma
	PO.S3	Arco ribassato
	PO.S4	Arco ribassato
	PO.S5	Arco ribassato
C4	Tipologia elementi strutturali	
	V.S4	Portante in laterizio e in marmo.
	V.S5	Portante in laterizio e in marmo.
	V.S	Portante in laterizio e in marmo.
	O.S	Volta a botte.
	PO.S3	Arco ribassato ad un centro.
	PO.S4	Arco ribassato ad un centro.
	PO.S5	Arco ribassato ad un centro.
C5	Tipologia finiture	
	V.S4	Base e fusto in mattoni (Non intonacato) e capitello in marmo.
	V.S5	Base e fusto in mattoni (Non intonacato) e capitello in marmo.
	V.S	Interno- Intonaco, Esterno-Parte inferiore: Mattoni Parte superiore: Intonaco.
	O.S	Intradosso- Intonaco, Estradosso- pavimento
	PO.S3	Intradosso- Intonaco, Fronte-Mattoni, Retro- Intonaco
	PO.S4	Intradosso- Intonaco, Fronte-Mattoni, Retro- Intonaco
	PO.S5	Intradosso- Intonaco, Fronte-Mattoni, Retro- Intonaco
C6	Tecnica costruttiva elementi strutturali	
	V.S4	Colonne sono costituite da conci in laterizio realizzati ad hoc per riproporre la sezione desiderata, poggiano su un plinto in laterizio ed è formata da base, fusto (mattoni) e capitello (marmo) con decorazioni vegetali
	V.S5	Colonne sono costituite da conci in laterizio realizzati ad hoc per riproporre la sezione desiderata, poggiano su un plinto in laterizio ed è formata da base, fusto (mattoni) e capitello (marmo) con decorazioni vegetali.
	V.S	Muratura con mattoni.

	O.S	Fasi essenziali per la costruzione di una volta: 1. Costruzione delle armature e delle centine 2. Esecuzione della volta sull'armatura 3.Rinfiacco 4.Riempimento 5.Aggiunta di tiranti, catene e capochiavi
	PO.S3	Fronte- Realizzato in laterizio, i giunti sono disposti verso il centro.
	PO.S4	Fronte- Realizzato in laterizio, i giunti sono disposti verso il centro.
	PO.S5	Fronte- Realizzato in laterizio, i giunti sono disposti verso il centro.
C7	Tecnica costruttiva finiture	-
C8	Parametri meccanici	Non sono state effettuate indagini diagnostiche per verificare le proprietà meccaniche dei materiali.
	Elementi di pregio storico artistico	
	V.S	La parete esterna presenta nella parte superiore affreschi riguardanti la storia di San Nicola e gli stemmi delle principali famiglie gentilizie della località.
C9	PO.S3	Nella cornice posta al di sopra delle arcate sono inseriti dei bacini ceramici.
	PO.S4	Nella cornice posta al di sopra delle arcate sono inseriti dei bacini ceramici.
	PO.S5	Nella cornice posta al di sopra delle arcate sono inseriti dei bacini ceramici.
	Materiali finiture	
	V.S	Tinteggiatura ad affresco
C10	PO.S3	Elementi ceramici monocromi verdi e marroni, decori tipici della maiolica arcaica (1280-1350)
	PO.S4	Elementi ceramici monocromi verdi e marroni, decori tipici della maiolica arcaica (1280-1350)
	PO.S5	Elementi ceramici monocromi verdi e marroni, decori tipici della maiolica arcaica (1280-1350)

9 Historical Building Information Modelling

Il modello digitale del chiostro di San Nicola da Tolentino è stato realizzato a partire dalla nuvola dei punti precedentemente elaborata.

9.1 La metodologia BIM

Al giorno d'oggi la metodologia più ricorrente tra ingegneri e architetti per la gestione dell'intero processo edilizio, dalla pianificazione fino a un'eventuale demolizione, è rappresentata dal BIM, acronimo di *Building Information Modelling*. I modelli tridimensionali creati con questa metodologia non si limitano a un'informazione di tipo grafica e dimensionale, ma racchiudono dati relativi alla localizzazione geografica, alle proprietà dei materiali e degli elementi tecnici, alle operazioni di manutenzione ecc. Infatti, l'obiettivo centrale di questa metodologia è quello di creare un edificio virtuale basato su *standard* informativi unici e condivisibili, gestibili mediante un *database*. (M. Lo Turco, 2015)

Il BIM rappresenta il metodo di pianificazione ottimizzata (*modelling*) e la capacità di far collaborare e mettere a confronto tutte le parti coinvolte nella costruzione e non è una semplice immagine digitale dell'oggetto (*model*). L'elemento cardine del metodo è l'interoperabilità, che, consentendo a due o più sistemi di interagire e scambiare dati, favorisce la collaborazione simultaneamente di diverse figure professionali. (A. Osello, 2012)

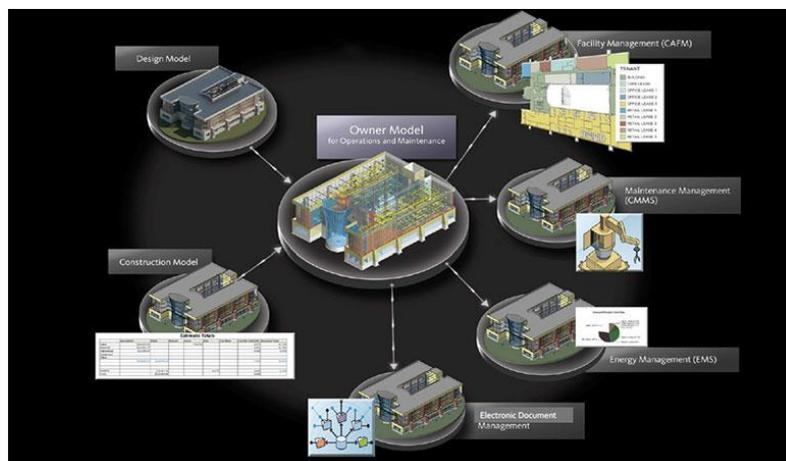


Figura 9.1- Il BIM- fonte: www.bimon.it

Questa nuova metodologia, quindi, non rappresenta un passaggio dal 2D al 3D; infatti se con il CAD si disegnano gli oggetti, con il BIM questi si modellano introducendo misure, quantità, materiali ecc., che consentono così un controllo di qualità del modello tridimensionale, la programmazione del tempo e la stima dei costi. (A. Osello, 2012)

L'acronimo BIM, nel settore delle costruzioni, può assumere differenti significati (A. Osello, 2012):

- *Building Information Model*: se consente una riproduzione delle caratteristiche tecniche e funzionali dell'edificio;
- *Beyond Information Models*: quando si indica il BIM come un sistema di informazioni che determina dati a lungo termine, capace di recepire e tener conto delle innovazioni, permette inoltre di precisare le stime economiche e le relazioni tra le persone e l'edificio;
- *Building Information Modeling*: se si riferisce alla creazione di un modello geometrico preciso contenente informazioni di supporto alla costruzione e alle procedure di realizzazione;
- *Building Information Modelling*: se si definisce la metodologia che fa convergere le differenti discipline riferite all'edificio. Quindi, in questo modello si possono trovare specifiche tecniche, specifici elementi costruttivi, costi e programmi manutentivi.

In questa tesi si è rappresentato il complesso architettonico e si sono gestite le informazioni di ogni suo elemento, che possono essere utilizzabili in futuro per eventuali studi di manutenzione e restauro. Per tale motivo, la definizione più consona per il modello architettonico è *Building Information Modelling*.

9.2 La metodologia BIM applicata al patrimonio edilizio esistente

Ad oggi il BIM è la metodologia maggiormente adoperata per la progettazione di nuovi edifici. Nonostante ciò, in ambito internazionale sono presenti applicazioni di sistemi BIM per la gestione del patrimonio immobiliare esistente, utilizzati per analizzare le conseguenze degli interventi programmabili. (M. Lo Turco, 2015)

L'applicazione del BIM all'edilizia storica è definita *Historic Building Information Modelling (HBIM)*. Esso è definito come un *database* semantico riguardante gli edifici storici, nel quale

il modello geometrico è connesso con informazioni descrittive multifunzionali. La forma architettonica deve essere ricostruita a partire da nuvole di punti acquisite mediante tecnica LiDAR o fotogrammetrica, che registrano i dati relativi alla geometria degli elementi architettonici con precisione elevata. Il *workflow* da effettuare per la realizzazione di un corretto modello parametrico può essere schematizzato in FIGURA 9.2 (A. Spanò, 2016)

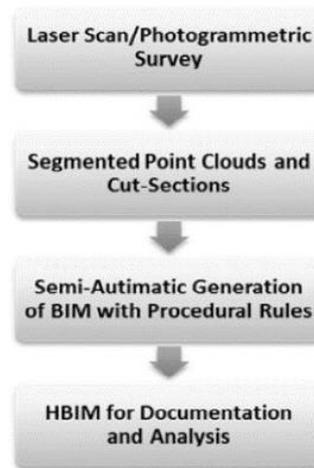


Figura 9.2- Workflow per la realizzazione di HBIM- A. Spanò 2016

L'approccio parametrico del BIM è molto complesso quando l'edificio esistente presenta una geometria eterogenea ed elementi singolari, che devono essere modellati manualmente per conservare la loro eccezionalità. (A. Spanò, 2016)

Questo concetto ostacola i principi della rappresentazione BIM che prevedono la modellazione di un oggetto all'interno della famiglia in modo da poterlo replicare. Una soluzione a questa problematica è rappresentata dalla creazione di oggetti parametrici che possono essere sovrapposti alla nuvola di punti, in modo da individuarne le differenze e recuperare così l'unicità dell'elemento storico.

9.3 I Level of Development (LOD)

I modelli digitali realizzati con la metodologia BIM sono caratterizzati da un *database* contenente informazioni condivisibili con gli attori del processo edilizio. La gestione dell'informazione è uno dei principi basilari e per tale motivo per garantire lo scambio di dati coerenti sono stati introdotti i Livelli di Sviluppo (LOD) intesi come misura della sicurezza e affidabilità delle informazioni. (S. Garagnani, 2016)

I LOD (*Level of Development*) non devono essere confusi con i *Level of Detail (LOD)*, che si riferiscono invece a un aumento di contenuto grafico negli elaborati di progetto.

La normativa americana G202-2013, *Project Building Information Modeling Protocol Form* di AIA (*American Institute of Architects*) classifica i livelli di sviluppo in sei classi in base all'aumento di contenuto informativo:

- LOD 100: gli elementi del modello devono essere graficamente rappresentati con un simbolo o un'altra rappresentazione generica, dando quindi una sola informazione grafica.
- LOD 200: gli elementi del modello sono rappresentati come un sistema generico, un oggetto o un insieme con quantità approssimative, dimensione, forma, localizzazione e orientamento. Devono essere incluse anche le informazioni non grafiche.
- LOD 300: gli elementi del modello sono rappresentati come un sistema specifico, un oggetto o un insieme in termini di quantità, dimensione, forma, localizzazione e orientamento. Al pari del LOD 200, anche in questo caso devono essere legate agli elementi del modello informazioni non grafiche.
- LOD 350: gli elementi del modello sono rappresentati come un sistema specifico, un oggetto o un insieme in termini di quantità, dimensione, forma, localizzazione, orientamento e i rapporti con gli altri sistemi dell'edificio. Si possono qui integrare parametri di relazione con altri insiemi di elementi presenti nel progetto. In questo modo, distanze reciproche, lunghezza di tracciati o componenti, vincoli e rispetti possono essere quantificati direttamente dal modello.
- LOD 400: gli elementi del modello sono rappresentati come un sistema specifico, un oggetto o un insieme in termini di dimensioni, forma, localizzazione, quantità e orientamento con dettagli, indicazioni sulla fabbricazione e le modalità di installazione.
- LOD 500: gli elementi di questo modello sono stati verificati sul campo in termini di misura, forma, localizzazione, quantità e orientamento.

La normativa italiana UNI 11337:2017-4, introdotta a fine gennaio 2017, codifica i LOD con le lettere da "A" a "G". Gli ultimi due LOD sono una novità rispetto alla norma americana e

sono relativi al patrimonio esistente. I LOD sono così descritti nella quarta parte della norma:

- *LOD A* (Oggetto simbolico): rappresentazione simbolica in 2D o anche in 3D se necessario. Non vengono espressi vincoli di geometria e le caratteristiche qualitative e quantitative sono puramente indicative.
- *LOD B* (Oggetto generico): rappresentazione geometrica generica o la geometria d'ingombro. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono approssimate.
- *LOD C* (Oggetto definito): rappresentazione geometrica definita. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono definite in via generica. Sono applicabili a tutte le entità simili.
- *LOD D* (Oggetto dettagliato): rappresentazione geometrica dettagliata. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono specifiche di una pluralità di prodotti simili. Vengono inserite informazioni utili al monitoraggio e alla manutenzione.
- *LOD E* (Oggetto specifico) Rappresentazione geometrica specifica. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono specifiche di un singolo sistema. Sono presenti informazioni relative a fabbricazione, assemblaggio e installazione (oltre a quanto utile per la manutenzione).
- *LOD F* (Oggetto eseguito): rappresentazione geometrica specifica di quanto eseguito (verificata sul luogo). Le caratteristiche qualitative e quantitative sono quelle specifiche del prodotto posato. Sono presenti informazioni relative a fabbricazione, assemblaggio e installazione (oltre a quanto utile per la manutenzione) valide per tutto il ciclo vitale dell'opera.
- *LOD G*: rappresentazione storicizzata specifica dello specifico oggetto (verificata sul luogo). Le caratteristiche qualitative e quantitative sono quelle specifiche del prodotto posato ed aggiornate rispetto ad un precedente stato di fatto. Sono presenti informazioni relative a gestione, manutenzione e/o riparazione/sostituzione valide per tutto il ciclo vitale dell'opera. Viene inoltre registrato il livello di degrado dell'oggetto.

I LOD presenti nella normativa possono essere schematizzati in [FIGURA 9.3](#)



Figura 9.3- Schematizzazione suddivisione LOD -http://www.ingegno-web.it/immagini/Articoli/PDF/BIM_I_LOD_nella_UNI_11337_2017_1To9.pdf

Nella parte 4 viene infine definito il concetto di LOD e delle informazioni grafiche (LOG- *Level of Geometry*) e di attributi (LOI- *Level of Information*), schematizzato in FIGURA 9.4, che devono contenere gli oggetti nella progettazione BIM *oriented*.

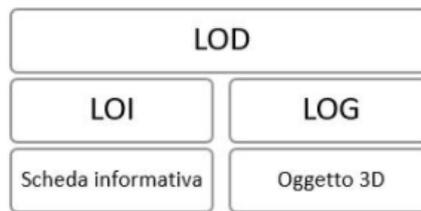


Figura 9.4- Schema LOD – http://www.ingegno-web.it/immagini/Articoli/PDF/BIM_I_LOD_nella_UNI_11337_2017_1To9.pdf

9.4 L'elaborazione del modello

Per la modellazione digitale del chiostro di San Nicola da Tolentino è stato utilizzato il *software* Autodesk Revit, che consente la progettazione a partire dalla una nuvola di punti e da disegni 2D.

Questo programma permette la creazione di un *file* centrale definito anche *file* di progetto, nel quale è possibile generare il modello tridimensionale, e i *file* di famiglia in cui sono stati creati gli elementi singolari tipici dell'edificio storico oggetto di studi.

“Le famiglie rappresentano la totalità degli oggetti che è possibile utilizzare per la redazione di un progetto: con totalità non si intende solo gli elementi che compongono il modello architettonico ma tutto ciò che contribuisce alla stesura di un progetto” (Pozzoli et al, 2015)

Il programma presenta tre tipologie di famiglie (Pozzoli et al, 2015):

- Famiglie di sistema: elementi presenti all'interno del *file* di progetto utilizzabili per creare gli elementi basilari quali muro, tetti, pavimenti, ecc. La modifica di questi

elementi mediante i parametri preimpostati può avvenire solo dopo la duplicazione della famiglia;

- Famiglie caricabili: elementi messi a disposizione dalle aziende per rispondere alle varietà di oggetti esistenti. Sono collocate in librerie esterne al *file* di progetto, per non sovraccaricarlo eccessivamente, e devono essere caricate al suo interno per il loro utilizzo.
- Famiglie locali: elementi che sono considerati specifici di un progetto, perché sono modellati e parametrizzati sulla base di oggetti singoli caratterizzanti l'edificio. La loro creazione è simile a quella delle famiglie caricabili.

Le famiglie presentano tre differenziazioni di base (Pozzoli et al, 2015):

- Le categorie: la classe di appartenenza della famiglia, come ad esempio porte;
- Il tipo: elementi che appartengono alla stessa famiglia, ma che hanno caratteristiche costruttive differenti;
- L'istanza: elemento preso separatamente.

Le famiglie sopra elencate sono state utilizzate per modellare correttamente l'elemento esaminato nella seguente tesi.

9.4.1 Modellazione del terreno tramite il *software* ENVI LIDAR

Il *software* ENVI LIDAR consente la generazione del DSM (*Digital Surface Model*), modello tridimensionale del terreno, poiché è in grado di riconoscere gli alberi e gli edifici. È necessario impostare dei parametri (FIGURA 9.5 e FIGURA 9.6) quali ad esempio l'unità di misura, il sistema di coordinate, la tipologia di area urbana o rurale, l'altezza e raggio minimo e massimo degli alberi, la dimensione degli edifici e ecc.

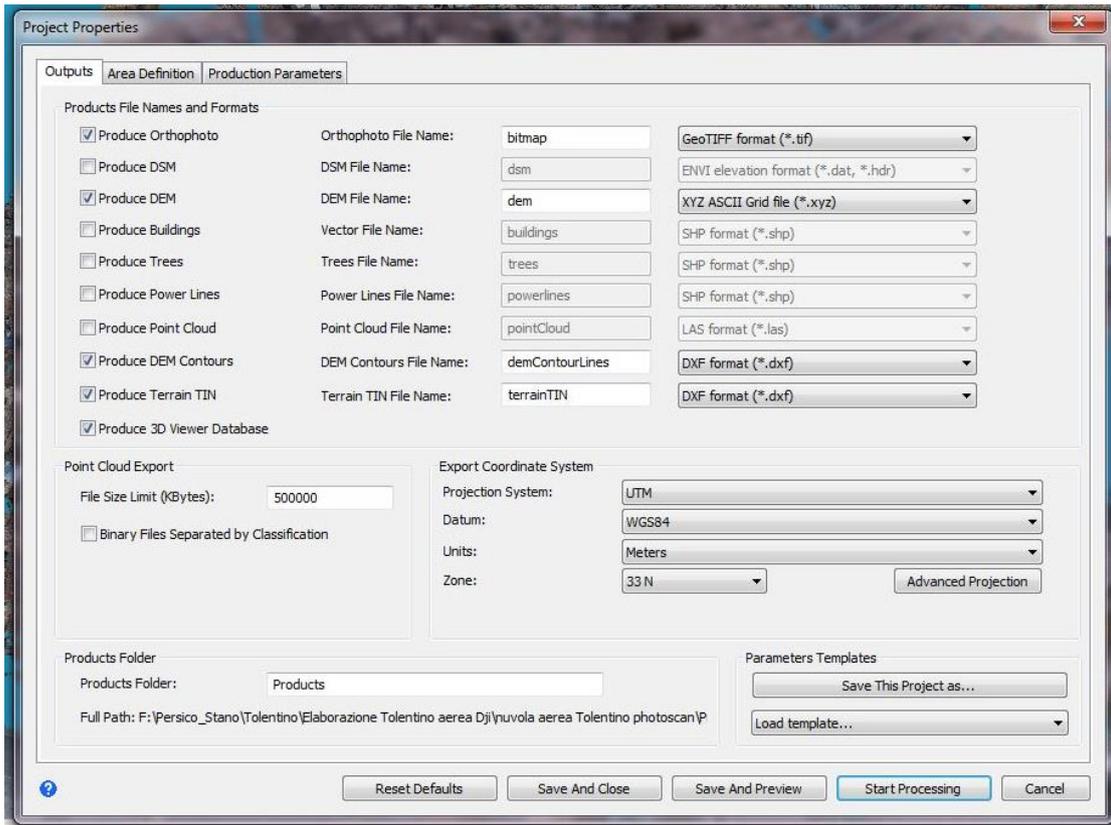


Figura 9.5- Settaggio dei parametri degli outputs

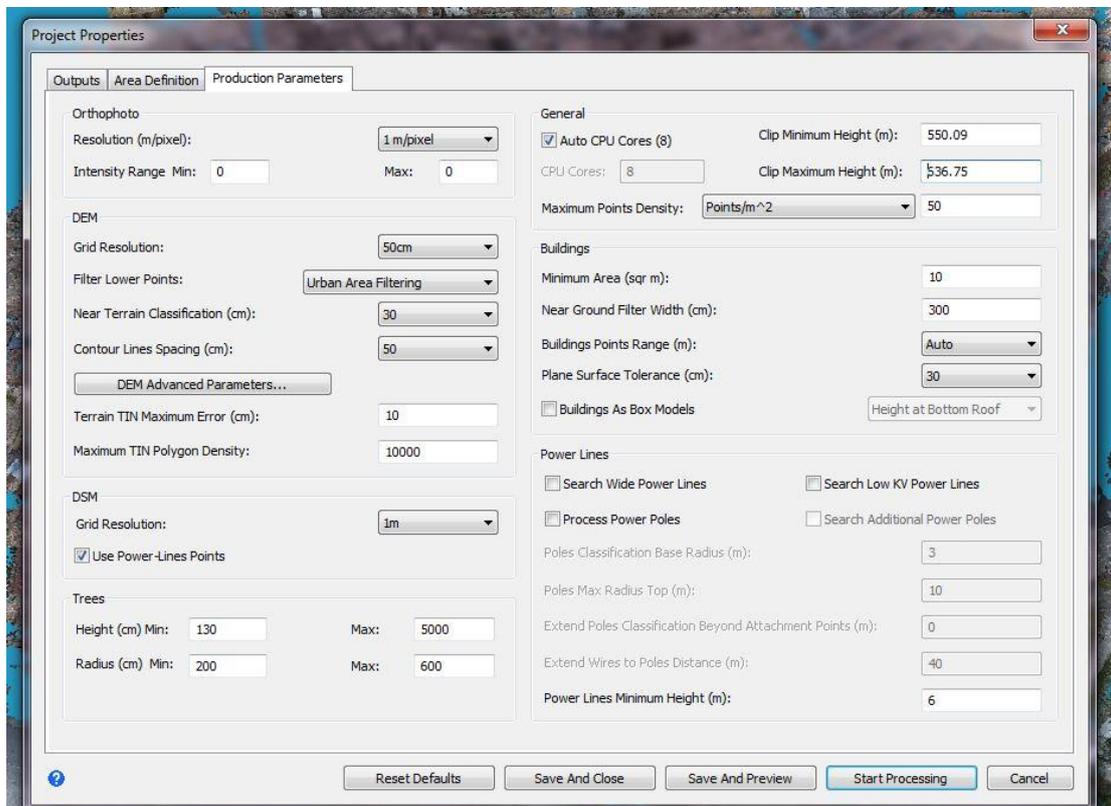


Figura 9.6- Settaggio dei parametri

Per modellare il terreno in Revit è necessario un formato .cvs e per questo motivo si è deciso esportare il DSM in formato .xyz dal *software* ENVI LIDAR, poiché importabile in 3D Reshaper dal quale infine è possibile esportarlo in formato .cvs. È necessario inserire un punto sul DEM prima dell’esportazione per poter successivamente collocare l’edificio nella posizione corretta.

A questo punto mediante il comando “Superficie topografica- Crea da importazione” è possibile generare la superficie del terreno conservando le coordinate nel sistema WGS 84/UTM-zone 33N.

9.4.2 Importazione della nuvola di punti

Il primo passo da effettuare è il caricamento della nuvola di punti, precedentemente suddivisa in componenti architettoniche (PARAGRAFO 7.3.2) e salvata in formato .rcs con il *software* ReCap 360. Tale operazione può essere effettuata mediante il comando “Inserisci- Nuvola di punti” che a sua volta apre una finestra (FIGURA 9.7) all’interno della quale si può scegliere il *file* da collegare. Prima di completare il caricamento bisogna impostare il parametro “Posizionamento” che per la prima nuvola deve essere “Da origine a origine”, mentre per le successive “Da origine ad ultimo posizionamento” (FIGURA 9.7). Questo parametro permette di importare le nuvole mantenendo un sistema di riferimento locale.

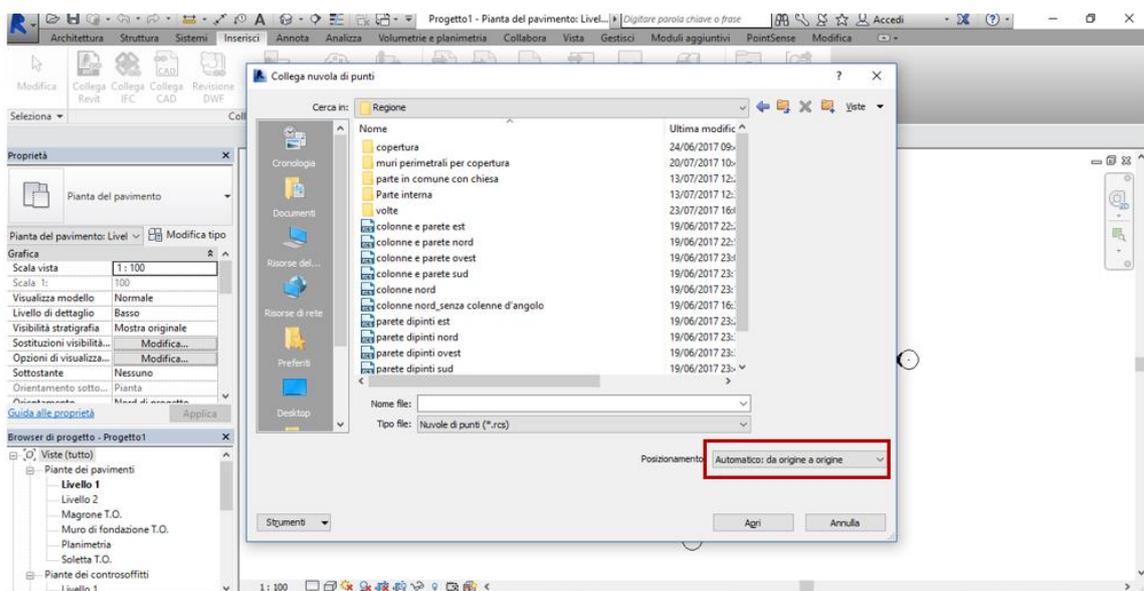


Figura 9.7- Importazione della nuvola di punti con posizionamento da origine a origine

A questo punto si nota la perdita della georeferenziazione della nuvola di punti, infatti si colloca lontana dal modello del terreno precedentemente creato (FIGURA 9.8). Per questo motivo, essa deve essere riposizionata nella posizione corretta.

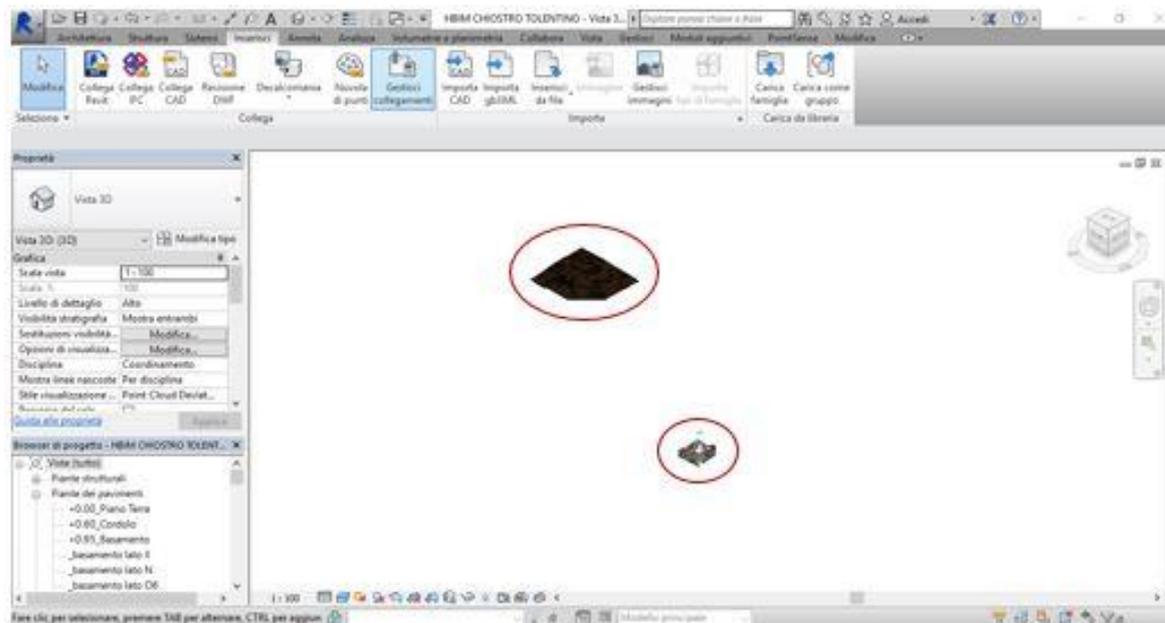


Figura 9.8- Differente posizione a causa della perdita di georeferenziazione della nuvola di punti relativa all'edificio

9.4.3 Plug-in PointSense

“Il riconoscimento di oggetti in progetti HBIM include l’identificazione, l’estrazione delle relazioni e le informazioni semantiche. I metodi e i tools per il riconoscimento dell’oggetto differiscono in base alla complessità geometrica dell’edificio, il livello di dettaglio richiesto, la tecnica di cattura, il formato dei dati, il tempo di processamento” (A. Spanò, 2016)

Oggigiorno sono disponibili molteplici metodi supportati da algoritmi che consentono il riconoscimento e la creazione degli oggetti della nuvola di punti.

In questa attività è stato utilizzato il *plug-in* PointSense della FARO che ha consentito di ricreare le ortofoto, i muri e le coperture dell’edificio.

Si riportano di seguito i principali procedimenti eseguiti per l’elaborazione dei dati.

9.4.3.1 Creazione di muri

La modellazione dei muri a partire dalla nuvola di punti è stata eseguita mediante il comando “Fit Wall” del *plug-in* PointSense. Nel momento in cui si seleziona il comando si apre una finestra, nella quale bisogna specificare i dati relativi al muro da realizzare come

il livello superiore del muro, altezza del muro e attivare *"Fit only Wall Face"*. Una volta impostati i parametri si può procedere con *"Start Wall Fitting"* che consente di scegliere due punti del muro della nuvola di punti. A questo punto si apre un'ulteriore finestra (FIGURA 9.9) che mostra il profilo del muro e consente di scegliere lo spessore e la tipologia di muro tra *"Best Fit"*, ovvero quelli ipotizzati dal programma, oppure *"Loaded Wall Types"*, quelli già caricati e utilizzati nel *file* di progetto.

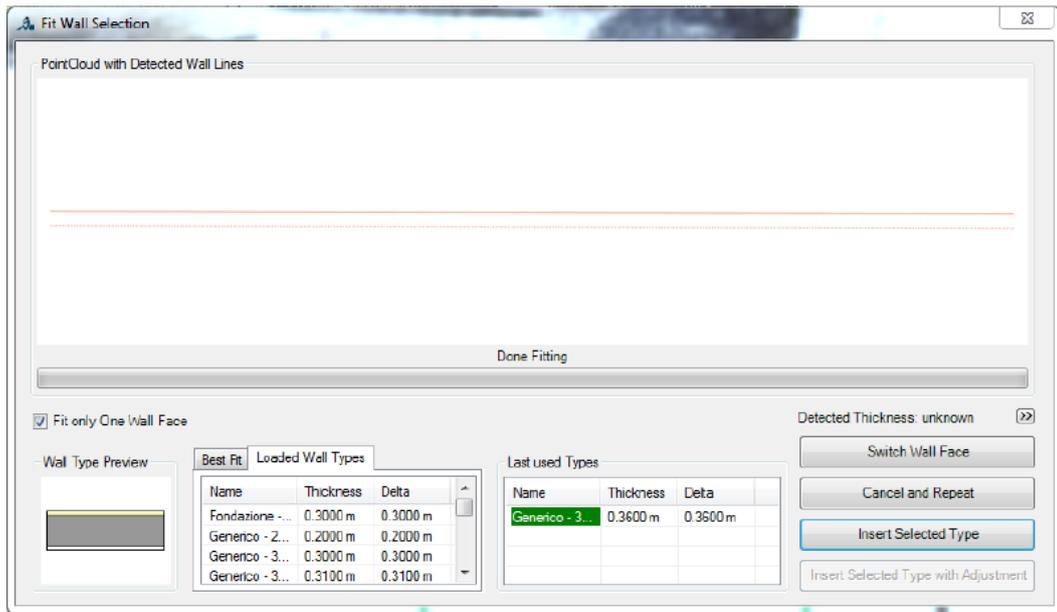


Figura 9.9- Finestra "Fit Wall Selection" per il controllo del profilo e l'impostazione dello spessore del muro

Viene così creato un muro con proprietà ancora modificabili. In questo caso si sono usati muri di 80 cm, perché misurati dalla nuvola di punti. Il risultato finale (FIGURA 9.10) risulta accettabile in quanto coerente con la nuvola di punti.

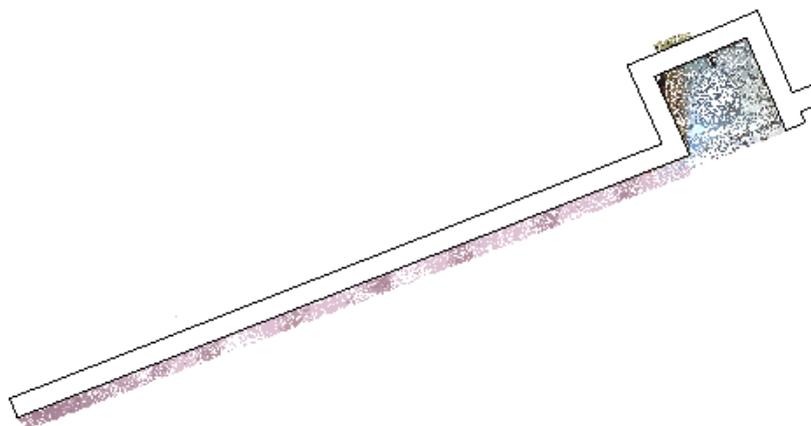


Figura 9.10- Creazione del muro

9.4.3.2 Creazione di ortofoto

L'ortofoto può essere creata con il *plug-in* PointSense mediante il comando "Ortho Image". La prima operazione da effettuare è la scelta della porzione di prospetto del quale si vuole elaborare l'ortofoto. Cliccando il comando si apre una finestra, nella quale è importante impostare la dimensione del pixel. Si è deciso di utilizzare 8 millimetri, valore ideale per la scala di rappresentazione.

Al termine dell'elaborazione è possibile salvare l'immagine sul computer oppure inserirla direttamente nella vista prescelta (FIGURA 9.11). Si può notare come l'ortofoto tenda a infittire la nuvola di punti e per tale motivo può essere utilizzato per individuare elementi architettonici che non sono facilmente riconoscibili con la sola nuvola di punti.



Figura 9.11- Ortofoto generata a sinistra, a destra la nuvola di punti utilizzata per generare l'ortofoto.

9.4.3.3 Creazione di coperture

La modellazione della copertura con il *plug-in* PointSense è piuttosto semplice. Innanzitutto è necessario realizzare un piano di appoggio mediante il comando "Tetto da perimetro" di Autodesk Revit (FIGURA 9.12). Successivamente mediante il comando "Model line" di PointSense è possibile definire in maniera corretta la linea di colmo della copertura (FIGURA 9.13), segnandola sulla nuvola di punti. Infine utilizzando il comando "Deform shape" selezionando la linea di colmo e la base di appoggio è possibile creare la copertura (FIGURA 9.14).

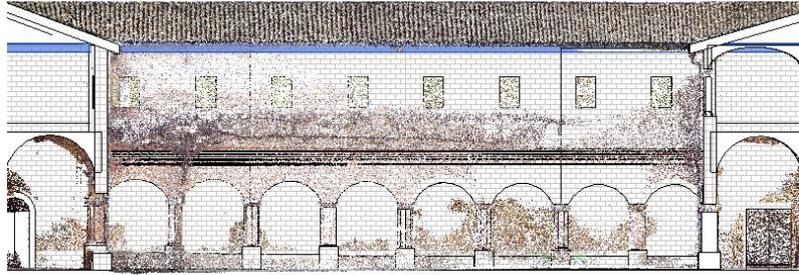


Figura 9.12- Comando "Tetto da perimetro"

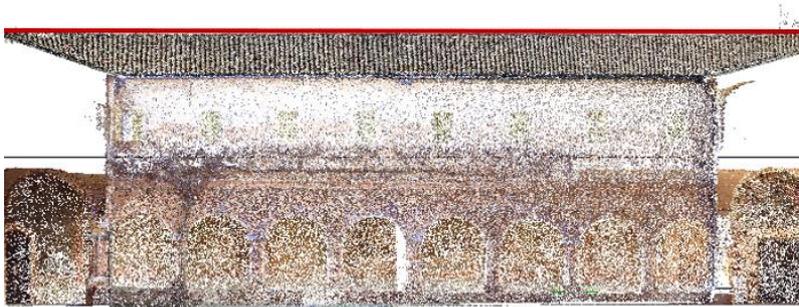


Figura 9.13- Comando "Model line" per individuazione linea di colmo

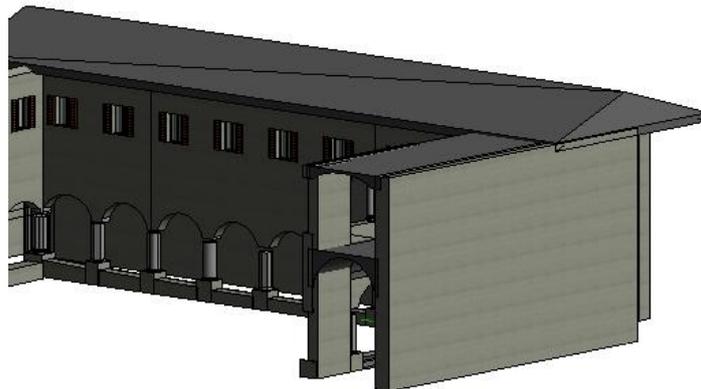


Figura 9.14- Creazione della copertura

9.4.4 Modello generico metrico

Gli elementi di dettaglio, tipici dell'edificio storico, sono stati modellati come "Modelli generici metrici". Nelle famiglie locali non è possibile collegare la nuvola di punti e per questo motivo si è scelto di utilizzare i *file* estratti da PointCab e vettorizzati in AutoCAD come base per le misure principali.

Le colonne sono state modellate utilizzando i comandi "Forme- Estrusione, Estrusione su percorso e Unione" come mostrato in FIGURA 9.15.

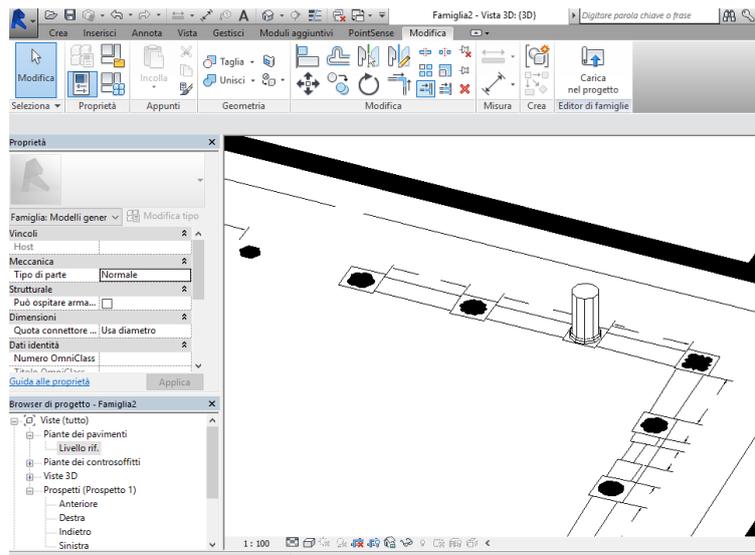


Figura 9.15- Modellazione colonne

Lo stesso procedimento è stato effettuato per tutti gli altri elementi di dettaglio che compongono il modello, come le porte, i capitelli e le colonne sul loggiato Nord-Est.

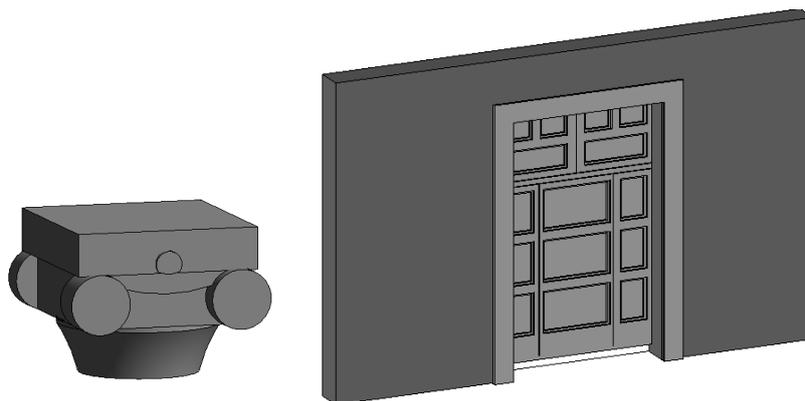


Figura 9.16- Alcuni elementi di dettaglio a sinistra capitello loggiato Nord-Est - a destra la prima porta collocata sul lato Sud-Ovest

9.4.5 Modello generico metrico adattativo

Il modello generico metrico adattativo è una famiglia locale che consente di creare elementi in grado di adattarsi ai differenti scenari di progettazione. Per tale motivo esso viene utilizzato per modellare elementi singoli che si ripetono nel modello, ma che presentano proprietà differenti come ad esempio la dimensione. In questo caso si è utilizzato per modellare le volte a botte e a crociera.

La procedura eseguita per ognuna di queste è simile e per tale motivo si riporta di seguito la realizzazione della volta a botte, il caso più semplice.

Dopo aver creato un nuovo modello metrico adattativo sono stati posizionati quattro elementi di tipo punto resi “adattativi” e successivamente si sono collegati con due *spline* rese questa volta “linee di riferimento” (FIGURA 9.17). (Tutorial Volta a botte parametrica, a cura del Laboratorio di ricerca e didattica al Politecnico di Torino *Drawing to the future*)

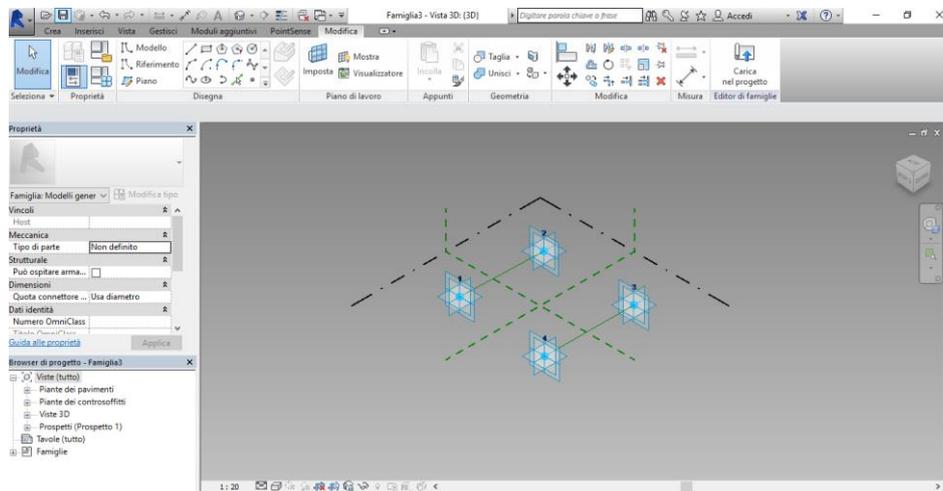


Figura 9.17- "Elementi punto" resi adattivi e "Spline" resi linee di riferimento

Successivamente sono stati inseriti sulle *spline* punti caratterizzanti la chiave di volta. Questi sono stati quotati per poter parametrizzare tale grandezza, infatti selezionando la quota è possibile aggiungere un nuovo parametro nell’elenco Testo Etichetta, impostando il tipo di parametro e la tipologia di grandezza (FIGURA 9.18)

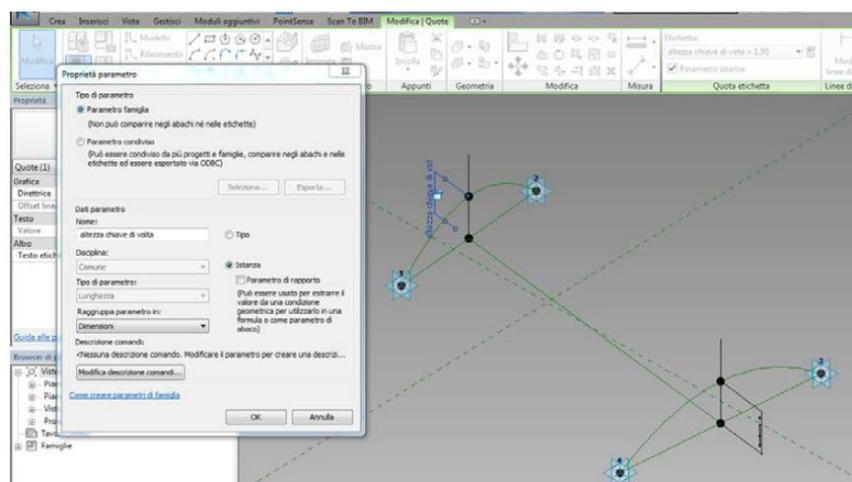


Figura 9.18- Parametrizzazione chiave di volta

Infine si selezionano i due archi e mediante il comando “Crea forma- vuoto” è possibile generare la volta a botte, FIGURA 9.19.

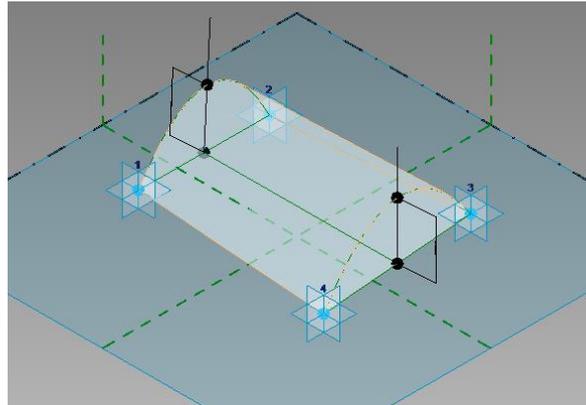


Figura 9.19- Volte a botte generata come solido di sottrazione

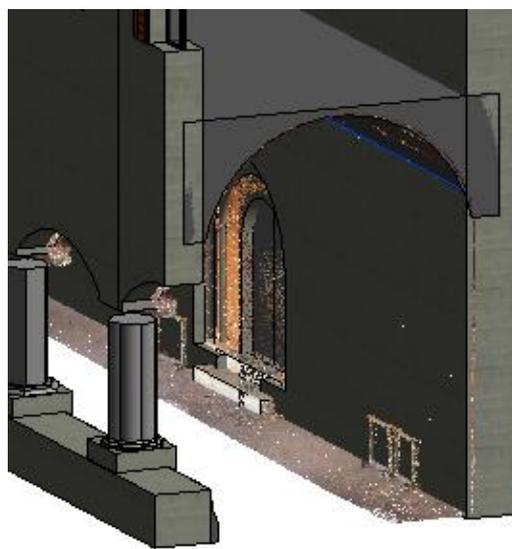


Figura 9.20- Creazione della volta a botte mediante il solido di sottrazione

La modellazione della volta a crociera si basa su quella a botte, dal momento che si ottiene dall'intersezione di due volte a botte. Per tale motivo si è utilizzato il modello precedentemente descritto al quale sono stati aggiunti due archi generatori laterali.

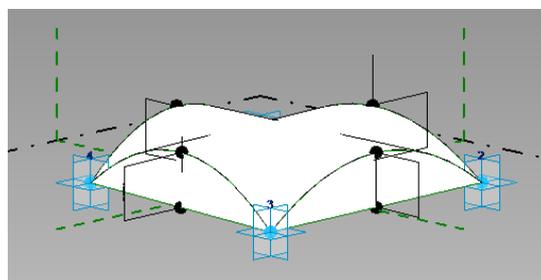


Figura 9.21-Volte a crociera generata come solido di sottrazione



Figura 9.22- Creazione delle volte a crociera mediante il solido di sottrazione

9.5 Comparazione tra modello e la nuvola di punti

La bontà del lavoro effettuato finora è valutato confrontando la nuvola di punti e il modello tridimensionale realizzato. Si è deciso di utilizzare il *plug-in* Pointsense che consente di misurarne la differenza fornendo risultati sia grafici sia numerici mediante il comando “Calculate”.

Si è deciso di confrontare porzioni dei modelli per non pregiudicare il risultato finale, dal momento che la presenza di elementi non modificabili, come ad esempio le scale, ma anche la modellazione di dettagli, quali capitelli, ha fatto sì che alcune sue componenti si discostassero maggiormente dalla realtà.

9.5.1 Le volte

È stato innanzitutto verificato il confronto tra la nuvola relativa alla volta a botte degli ambulacri e il modello BIM, in quanto la costruzione di volte parametriche adattative è, ad oggi, l’unico strumento per avvicinarsi maggiormente alla nuvola di punti.

Dopo aver esportato i valori si è potuto calcolare la media dello scostamento e lo scarto quadratico medio, schematizzate in TABELLA 9.1, valori minori della tolleranza ammissibile richiesta dalla scala di rappresentazione 1:100.

Tabella 9.1- Valori di scostamento e sqm ottenuti dal confronto tra la nuvola di punti e il modello HBIM

	Volte a botte			
	EST	NORD	OVEST	SUD
Scostamento medio [mm]	22	26	25	25
SQM [mm]	5	14	18	15
Minimo [mm]	0,002	0,005	0,008	0,004
Massimo[mm]	60	54	70	57



Figura 9.23- Esempio di confronto tra la volte a botte ovest e la nuvola di punti

9.5.2 L'involucro esterno

L'analisi è stata effettuata anche per gli elementi costituenti l'involucro esterno, come i muri, le colonne e la copertura.

La copertura presenta un errore maggiore, giustificato dal fatto che nel modello non sono stati inseriti i coppi e non è stato possibile realizzarla rispettando le deformazioni che ha subito nel corso dei secoli. Analizzando i valori ottenuti (FIGURA 9.24) in un *file* Excel si è potuto calcolare la media dello scostamento pari a 47 mm e lo scarto quadratico medio pari a 29 mm.

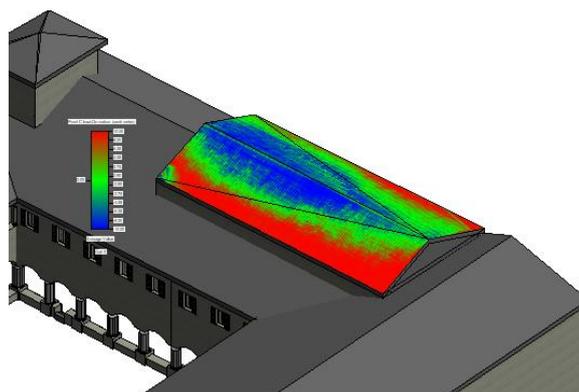


Figura 9.24- Confronto tra la copertura e la nuvola di punti

Per quanto riguarda i muri che si affacciano sul cortile l'errore medio di discostamento e lo scarto quadratico medio, schematizzati in **TABELLA 9.2**, risultano maggiori della tolleranza ammissibile per la scala di rappresentazione scelta. Infatti, nella realtà sono presenti elementi, quali vegetazione naturale e fregio, che non sono stati realizzati nel modello.

Tabella 9.2- Valori dello scostamento, sqm, il minimo e il massimo in valore assoluto ottenuti dal confronto tra la nuvola di punti e il modello HBIM

	Parete			
	EST	NORD	OVEST	SUD
Scostamento medio [mm]	53	49	39	48
SQM [mm]	31	26	25	30
Min [mm]	0,002	0,0009	0,0003	0,004
Max[mm]	10	10	10	10

Si è ripetuta l'analisi su una porzione della parete ovest (**FIGURA 9.25- SINISTRA**), in quanto si è osservato l'assenza di elementi naturali. Il valore dello scostamento ottenuto è di 27mm con uno scarto quadratico medio pari a 22 mm. A questo punto esaminando la distribuzione cromatica dei valori dello scostamento (**FIGURA 9.25- SINISTRA**), si è osservato come i valori più alti, rappresentati in rosso, sono in corrispondenza del fregio, elemento non modellato. Per questo motivo si è ripetuta ulteriormente l'analisi considerando la porzione di muro compreso tra il fregio e la linea d'imposta dell'arco (**FIGURA 9.25- DESTRA**). In questo caso i valori ottenuti sono accettabili per una scala di rappresentazione 1:100 e infatti il valore dello scostamento è pari a 19 mm, mentre lo scarto quadratico medio è di 16 mm.

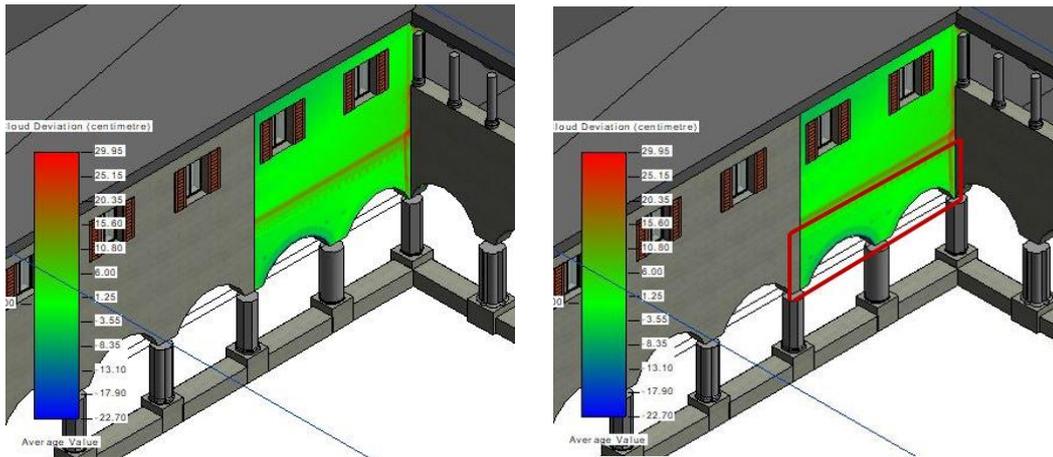


Figura 9.25- A sinistra) porzione di parete ovest senza elementi naturali, a destra) porzione di parete ovest senza il fregio

Per quanto riguarda i muri interni FIGURA 9.26 l'errore dello scostamento ottenuto è minore, circa 14 mm, accettabile per la scala di rappresentazione finale del modello.

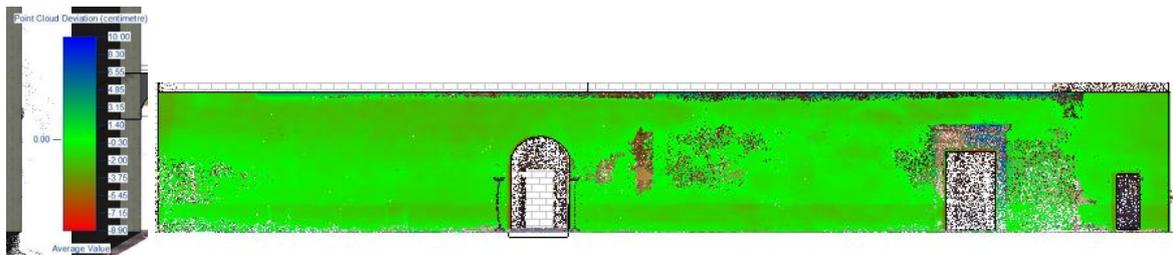


Figura 9.26- Esempio di confronto tra la parete interna est e la nuvola di punti

Infine, si sono analizzate anche le colonne, poiché nella realtà esse sono inclinate a causa del terremoto del 1703, mentre nel modello sono state realizzate perfettamente verticali. In TABELLA 9.3 e

TABELLA 9.4 si sono riportati i valori dello scostamento e lo scarto quadratico medio ottenuti per ciascuna colonna, FIGURA 9.27.

Tabella 9.3- Valori dello scostamento e sqm ottenuti dal confronto tra la nuvola di punti e il modello HBIM

	Colonna														
	NE	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	ES	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Scostamento medio [mm]	17	12	23	24	20	23	19	12	11	7	11	12	14	11	10
SQM [mm]	17	10	18	21	18	19	18	12	10	8	12	15	14	15	13
Min[mm]	0,008	0,008	0,009	0,01	0,015	0,004	0,04	0,006	0,02	0,005	0,01	0,006	0,018	0,011	0,010
Max[mm]	99	75	99	98	99	97	98	98	76	78	94	99	96	92	99

Tabella 9.4- Valori dello scostamento e sqm ottenuti dal confronto tra la nuvola di punti e il modello HBIM

Colonna												
	SO	O8	O7	O6	O5	O4	O3	O2	NO	N7	N6	N5
Scostamento medio [mm]	12	10	11	10	8	6	7	7	12	14	9	7
SQM [mm]	18	8	12	7	10	6	10	5	11	15	11	8
Min [mm]	0,007	0,006	0,005	0,007	0,0038	0,006	0,007	0,010	0,005	0,005	0,007	0,003
Max[mm]	98	56	84	32	69	67	71	38	88	97	84	50

Colonna				
	N4	N3	N2	NN9
Scostamento medio [mm]	10	13	13	5
SQM [mm]	10	14	12	5
Min [mm]	0,007	0,011	0,006	0,002
Max[mm]	75	98	82	22

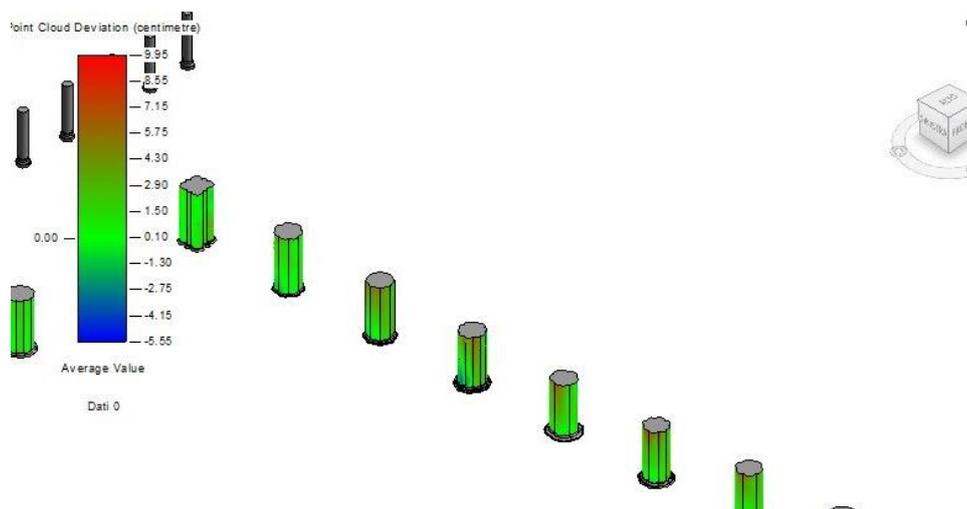


Figura 9.27- Confronto tra le colonne e la nuvola di punti

9.6 I LOD al Chiostro di San Nicola a Tolentino

Sulla base della classificazione riportata nella UNI 11337 è stato suddiviso il LOD G così come segue:

- LOD G.01-FIGURA 9.28-SINISTRA: il livello corrisponde alla fase di rilievo il quale può essere condotto con diverse tecniche, quali fotogrammetria da UAV, laser scanner e ecc.;
- LOD G.02-FIGURA 9.28-DESTRA: il livello di dettaglio contiene la modellazione del terreno, a partire da una nuvola di punti oppure dalle curve di livello;

- LOD G.03-FIGURA 9.29- SINISTRA: il livello include gli edifici rappresentati da semplici masse, senza le geometrie delle coperture;
- LOD G.04-FIGURA 9.29-DESTRA: il livello prevede gli edifici rappresentati da masse con la realizzazione della geometria delle coperture;
- LOD G.05-FIGURA 9.30-SINISTRA: il livello include l'edificio modellato nel dettaglio. Tutti gli elementi del modello sono noti per quantità, forma, dimensioni, posizione e orientamento;
- LOD G.06-FIGURA 9.30-DESTRA: il livello prevede l'associazione di informazioni al modello come ad esempio i dati riportati nella schedatura della conoscenza dei beni architettonici riportati in TABELLA 8.1 e TABELLA 8.2.



Figura 9.28- A sinistra LOD G.1- A destra LOD G.2

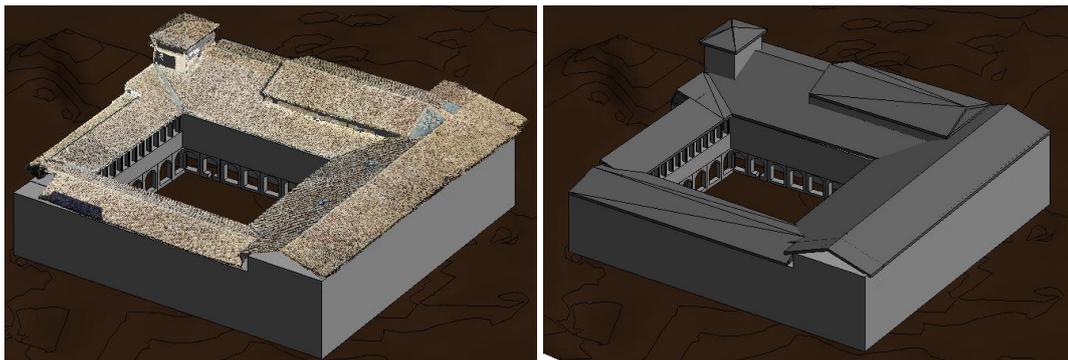


Figura 9.29- A sinistra LOD G.3- A destra LOD G.4

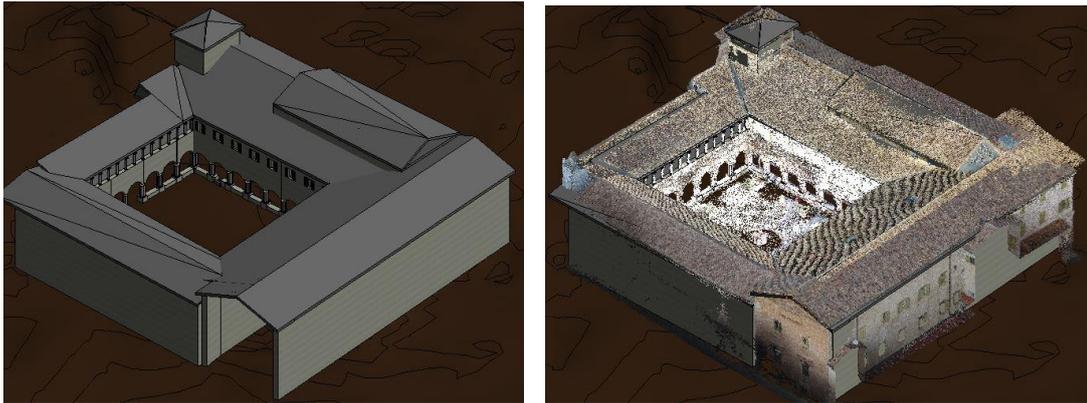


Figura 9.30- A sinistra LOD G.5- A destra LOD G.6

<0. Abaco dei muri>						
A	B	C	D	E	F	G
Codifica elemento strutturale	Denominazione del bene	Elementi di pregio storico	Ispezionabilità	Materiale	Morfologia	Periodo di realizza
V.S	Basilica e Chiostro di San	Affreschi barocchi es	Ispezionabile	Portante in laterizio	Setto continuo	XIII-XIV secolo
PO.S5	Basilica e Chiostro di San	Elementi ceramici	Parzialmente ispezionabile	Intradosso intonaco, Fronte Mattoni, Retro Intonac	Arco ribassato ad un centro	XIII-XIV secolo
PO.S3	Basilica e Chiostro di San	Elementi ceramici	Parzialmente ispezionabile	Intradosso intonaco, Fronte Mattoni, Retro Intonac	Arco ribassato ad un centro	XIII-XIV secolo
PO.S4	Basilica e Chiostro di San	Elementi ceramici	Parzialmente ispezionabile	Intradosso intonaco, Fronte Mattoni, Retro Intonac	Arco ribassato ad un centro	XIII-XIV secolo

<Abaco pilastri>							
A	B	C	D	E	F	G	H
Codifica elemento struttura	Denominazione del bene	Elementi di pregio storico	Ispezionabilità	Materiale	Periodo di realizzazione	Orientamento	Morfologia
V.S4	Basilica e Chiostro di San Nicola	Nessuno	Ispezionabile	Portante in laterizio	XIII-XIV secolo	Sud	Colonna a sezione poligonale, a fiore con 6 lati
V.S5	Basilica e Chiostro di San Nicola	Nessuno	Ispezionabile	Portante in laterizio	XIII-XIV secolo	Sud	Colonna a sezione esagonale

Figura 9.31- Abachi dei componenti strutturali

Di seguito si propone una scheda consultativa e compilativa (FIGURA 9.32) per la descrizione dei livelli di dettaglio (LOD – *Level of Detail*), riferita alla precisione grafica di ciascun componente architettonico.

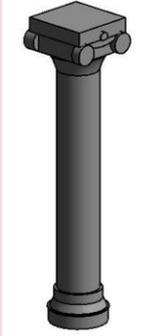
METODO DI MODELLAZIONE		CRITICITA' RISCOSE	
<p>COLONNA</p> 		<p>DATI: Nome complesso: Basilica di San Nicola da Tolentino Nome edificio: Chostro di San Nicola da Tolentino Id elemento:</p> <p>DISCIPLINA: Architetonico <input type="checkbox"/> Strutturale <input type="checkbox"/> Elementi di dettaglio <input type="checkbox"/> Altro <input type="checkbox"/></p>	
Standard	Fam. Modello gen. metrico <input type="checkbox"/> Fam. Modello locale <input type="checkbox"/> Fam. Modello adattivo <input type="checkbox"/> Componente <input type="checkbox"/> Altro <input type="checkbox"/>	Non è stato possibile modellare le colonne con loro corretta inclinazione, inoltre i capitelli sono stati semplificati. Sono necessari procedimenti più affidabili e precisi.	
INFORMAZIONE	RISULTATI	LOD HBIM	
Grafica <input type="checkbox"/> Strutturale <input type="checkbox"/> Materiale <input type="checkbox"/> Storica <input type="checkbox"/> Interventi <input type="checkbox"/> Degrado <input type="checkbox"/> Altro <input type="checkbox"/>	La colonna è stata modellata utilizzando la Famiglia Modello generico metrico, poiché ha consentito una rappresentazione simile alla realtà.	LOD 0 <input type="checkbox"/> LOD 1 <input type="checkbox"/> LOD 2 <input type="checkbox"/> LOD 3 <input type="checkbox"/> LOD 4 <input type="checkbox"/> LOD 5 <input type="checkbox"/>	

Figura 9.32-Scheda del level of Detail di una colonna

Conclusioni

L'elaborato di tesi contiene i risultati delle operazioni effettuate in seguito alla campagna di rilievo realizzata a Tolentino dal *team* DIRECT del Politecnico di Torino. Le attività di acquisizione dei dati relativi al Chiostro di San Nicola, oggetto di studio, hanno previsto l'integrazione di metodi multi-sensore, quali fotogrammetria aerea con UAV, fotogrammetria terrestre e tecnica LiDAR con scansioni *laser*. L'elaborazione delle informazioni acquisite ha consentito la generazione di una nuvola di punti accurata e geo-referenziata utilizzabile come base per la costruzione del modello HBIM.

Si è osservato come i metodi di rilevamento tridimensionale presentano un tempo di acquisizione relativamente breve in relazione alla successiva elaborazione dei dati e realizzazione del modello parametrico.

L'acquisizione delle informazioni metriche è stata realizzata utilizzando molteplici tecniche con lo scopo di confrontare in termini di precisione gli *output* finali e di integrare i modelli tridimensionali generati al fine di ottenere una descrizione più completa dell'oggetto studiato. Infatti, la diversa natura dei dati utilizzati per la generazione dei modelli tridimensionali ha fatto sì che questi ultimi siano caratterizzati da un contenuto informativo multiscala, nello specifico si sono ottenuti modelli stereoscopici e ortofoto dell'area urbana, generati da voli a bassa quota da UAV e modelli tridimensionali del chiostro, generati a partire dalle scansioni registrate dal *laser scanner*, dai fotogrammi acquisiti con la fotogrammetria terrestre e da UAV.

Per il rilievo architettonico si è voluto sperimentare la fotogrammetria da UAV con acquisizioni dati video, tecnica che consente di ottimizzare i tempi e i costi delle operazioni di rilievo. Nonostante i *file di input*, ovvero *frame* estratti dai video, siano di qualità inferiore rispetto alle immagini acquisite con la stessa camera, è stato possibile generare un modello del chiostro con precisioni accettabili per una scala di rappresentazione 1:100.

I dati acquisiti con tecnica fotogrammetrica sono stati elaborati con *software* che utilizzano i principi della *Structure from motion* e gli algoritmi di *dense image matching*, come Agisoft

PhotoScan, Pix4D e Visual SFM. L'utilizzo di differenti programmi, commerciali e non, ha permesso di individuare i vantaggi e gli svantaggi di ciascuno. I *software* commerciali presentano lunghi tempi di elaborazione, PhotoScan genera una nuvola di punti omogenea indipendentemente dal numero di fotogrammi acquisiti, Pix4D genera una nuvola di punti con una densità maggiore nella zona d'interesse; invece Visual SFM, *open source*, predilige tempi di elaborazione ridotti a scapito della precisione.

L'elaborazione dei dati acquisiti con tecnica LiDAR è stata realizzata con il *software* FARO SCENE, che ha permesso di registrare le scansioni acquisiti nel sistema di riferimento con un residuo di 1 centimetro, ideale per una rappresentazione finale in scala 1:50.

In realtà il rilievo è risultato idoneo a una scala di rappresentazione 1:100, in quanto mancano le informazioni relative alla stratigrafia dei muri, fondamentali per una scala di rappresentazione maggiore.

Il chiostro è stato modellato a partire sia dalla nuvola di punti *laser* sia dai dati fotogrammetrici da drone. Dopo averli elaborati è stato deciso di integrare i modelli tridimensionali ottenuti per rappresentare al meglio l'intero oggetto. Infatti, la prima elaborazione presenta alcune lacune nei punti più in alto, carenza causata dall'elevata altezza del bene. Per tale motivo, si sono mantenuti i punti delle scansioni *laser* per la parte inferiore del chiostro, mentre dalla fotogrammetria da UAV si sono tenute le coperture.

A questo punto ottenuta un'unica nuvola è possibile procedere con la modellazione digitale parametrica. È stato utilizzato il *software* Autodesk Revit e il *plug-in* PointSense che consentendo un riconoscimento semi-automatico dei punti della nuvola, ha permesso la realizzazione di un modello dell'edificio simile alla realtà.

Durante la modellazione si sono evidenziati alcune criticità, come la difficoltà nella modellazione di elementi complessi esistenti, quali capitelli e colonne. Per questi dettagli è stato scelto di utilizzare la famiglia "modello generico metrico" per avvicinarsi maggiormente alla realtà, nonostante ciò non è stato possibile modellarli con la corretta inclinazione.

Inoltre la presenza in Revit di elementi poco modificabili nelle loro parti fa sì che il modello si distacchi maggiormente dal reale; ad esempio le scale hanno una proporzione fissa tra alzata e pedata e per tale motivo l'asimmetria dei gradini dovuta sia all'usura sia a questioni costruttive non è rappresentabile nel modello digitale.

Al termine della modellazione è stato effettuato un'analisi di comparazione tra la nuvola di punti e il modello parametrico costruito per verificare l'affidabilità di quest'ultimo. Infatti, si è calcolato lo scostamento medio per ciascuno elemento del modello ottenendo valori minori della tolleranza ammissibile in scala 1:100, perdendo la precisione millimetrica dei modelli stereoscopici.

In conclusione, per il rilievo metrico tridimensionale di un elemento architettonico, con rappresentazione finale in scala 1:100, la fotogrammetria da UAV con acquisizioni dati video rappresenta un'ottima alternativa ai metodi tradizionali, come ad esempio LiDAR, sia in termini di precisione dell'elaborato finale, sia per l'ottimizzazione dei tempi e dei costi delle operazioni di rilievo. La modellazione HBIM di un bene architettonico, mediante Autodesk Revit, a partire da una nuvola di punti risulta affidabile con precisioni centimetriche, ma il *software* deve essere ancora implementato con *plug-in* in grado di riconoscere automaticamente la nuvola di punti e con elementi strutturali realizzabili anche fuori piombo, per riprodurre fedelmente l'esistente. Nonostante ciò risulta una valida alternativa alla progettazione tradizionale; infatti può contenere informazioni utilizzabili per studi di manutenzione programmata ed altro ancora.

Oggigiorno questi metodi di acquisizione dati sono tra quelli più all'avanguardia e permettono la registrazione, in tempi rapidi, di una grande quantità di informazioni relativi a un edificio architettonico esistente. L'elaborazione è un processo semi-automatico e l'unico aspetto che ha richiesto un maggior contributo da parte di un operatore è stata la realizzazione del modello digitale, in quanto non esistono *plug-in* in grado di modellare automaticamente gli elementi a partire dalla nuvola di punti.

La metodologia effettuata in questa tesi non è attualmente utilizzata in campo professionale, in quanto si predilige un rilievo tradizionale con tempistiche di gran lunga maggiori rispetto a quelle proposte nel seguente elaborato.

Bibliografia

S. Pozzoli, M. Bonazza, Autodesk Revit Architecture 2016- Guida alla progettazione BIM, Tecniche nuove Editore, Milano 2015

A. Osello, Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti, Dario Flaccovio Editore, Torino 2012

R.Cannozzo, L. Cucchiarini, W. Meschieri, Misure, rilievo, progetto, Zanichelli 2012 (T1-T2-T3)

R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer Science & Business Media, 2010

D. Bartolucci, Principi di laser scanning 3D, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2009.

Centro studi Agostino Trapè, La basilica di san Nicola a Tolentino. Guida all'arte e alla storia, Biblioteca Egidiana, Roma, 2008

F.Crosilla S.Dequal, Laser scanning terrestre, CISM, Udine 2006

G. Bezoari, C. Monti, A. Selvini, La fotogrammetria per l'architettura, Liguori Editore, Napoli 1993

Tesi di Laurea

F. Matrone, Rilevamento metrico 3D e modellazione HBIM per la manutenzione programmata del patrimonio architettonico. Il caso studio del Sacro Monte di Varallo, Tesi di Specializzazione, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, A. A.2016/2017.

Articoli

Triggs B., McLauchlan P. F., Hartley R. I., Fitzgibbon A. W., (2000) "Bundle Adjustment -A Modern Synthesis"

Lo Brutto M., (2005) "Elementi di fotogrammetria digitale".

D'Amelio S., Lo Brutto M., (2007) "Valutazione delle procedure di calibrazione di camere digitali non metriche per il rilievo di beni architettonici".

Juan L. e Gwun O., (2009) "A Comparison of SIFT, PCA-SIFT and SURF".

Lingua A., Marenchino D., Nex F., (2008) "L'operatore SIFT per l'orientamento di immagini acquisite con prese non-normali".

Lingua A., Marenchino D., Nex F., (2009) "Performance Analysis of the SIFT Operator for Automatic Feature Extraction and Matching in Photogrammetric Applications".

M. Russo, F. Remondino, G. Guidi. (2011) "Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico".

Sarazzi D., Mancon L., Julitta F., Quartieri A., (2011) "Piattaforma UAV per l'acquisizione ed elaborazione fotogrammetrica di immagini di scavi archeologici e strutture architettoniche".

Chiabrando F., Lingua A., Maschio P., Rinaudo F., Spanò A., (2012) "Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico"

Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J. Reynolds, J.M., (2012) "Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications".

D.Santarsiero, (2015) "Tutti i software a 360 gradi per gli UAV. Pianificare, gestire, processare".

Lo Turco M., (2015) "Rappresentare e gestire patrimoni immobiliari: il BIM per il facility management".

Chiabrando F., Sammartano G., Spanò A., (2016) "Historical buildings models and their handling via 3D survey: from points clouds to user-oriented HBIM".

Chiabrando F., Grasso N., Lingua A. M., Noardo F., Spanò A., (2016) "UAV photogrammetry with blique images: first analysis on data acquisition and processing".

Garagnani S., (2016) "I Livelli di Sviluppo (LOD) nel progetto digitalizzato: La misura dell'informazione all'interno del percorso BIM".

Dispense

Tecniche innovative di rilievo UAV e fotogrammetria (D.Marenchino)

Tutorial

User Manual, Pix4D MAPPER 3.2

User Manual, Agisoft PhotoScan 1.2

Sitografia

Recensioni droni DJI-Phantom4 (recensionidroni.com/recensione-dji-phantom-4/)

www.3deffe.com/gsd-ground-sample-distance. Ultima consultazione 11/07/2017

G202-2013, Level of Development Specification, For Building Information Models, 22 August 2013. Disponibile online in PDF bimforum.org/wp-content/uploads/2013/08/2013-LOD-Specification.pdf. Ultima consultazione 14/09/2017

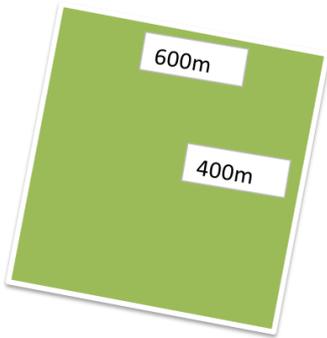
I LOD nella UNI 11337:2017 www.ingenioweb.it. Ultima consultazione 14/09/2017

Tutorial Volta a botte parametrica, a cura del Laboratorio di ricerca e didattica al Politecnico di Torino Drawing to the future <https://www.youtube.com/watch?v=61j1KoACZ-s>. Ultima consultazione 01/09/2017

ALLEGATO

A1-Pianificazione del GSD del rilievo realizzato con drone Phantom Dji 4

La pianificazione del GSD è stata effettuata utilizzando il *file* Excel realizzato dal prof. A. Lingua. Conoscendo la scala di rappresentazione, le caratteristiche della camera fotografica utilizzata per il rilievo e l'altezza media di volo del drone è possibile calcolare il GSD di progetto. Inoltre, stimando le dimensioni del lotto da rilevare è possibile calcolare il numero di fotogrammi da acquisire lungo la singola strisciata e il numero totali di strisciate. In questo modo si stima il tempo necessario per effettuare un buon rilievo. Di seguito si riportano i calcoli effettuati, stimando le dimensioni del lotto pari a 600 m e 400 m.



Dati iniziali del volo		
Ricoprimento longitudinale		0,7
Ricoprimento trasversale		0,6
Scala restituzione	1:	500
Velocità [m/s]		5
Velocità decollo[m/s]		2
Velocità atterraggio [m/s]		1
Precisione [mm]		100
Tolleranza [mm]		200
GSD massimo [mm]		50

Geometria della camera			
c	lx	ly	
3,6	6,24	4,68	mm
	4000	3000	pixel
	1,6	2,3	micron

Altezza relativa di volo		
H max	333333,3	mm
mb lim	32051,28	
H max	115,3846	m
Hpro	60000	mm
mb	16666,67	
GSD	26	mm

Abbracciamento al suolo e interassi					
Lx	104	m		Ly	78 m
base		23,4	m	temp tra scatti successivi	
sovrapp. Trasv.		62,4		Interasse	41,6 m
num strisciate		4,807692		Strisciate progetto	5

Tempo di volo			
Decollo		30	Secondi
Atterraggio		60	Secondi
Verso l'inizio della prima strisciata		44,72	Secondi
Ritorno a casa da fine volo		44,72	Secondi
Strisciate	5	400	Secondi

Spostamenti tra strisciate	5	104	Secondi
Strisciate di bordo	2	400	Secondi
Durata		18,05	Minuti
Durata sicurezza	0,1	1,8	Minuti
Tempo complessivo		19,8	Minuti

A2- Coordinate punti d'appoggio

Le coordinate dei punti d'appoggio, punti naturali e presegnalati posizionati a terra e sulla facciata del chiostro, sono stati ricavate attraverso la stazione totale posizionata su vertici di coordinata nota.

Marker	Coordinata EST	Coordinata NORD	Altitudine [m]
PT700	822,241	301,297	223.43
PT600	755,830	274,476	221.98
DMT1	816,355	282,217	223.60
DMT2	810,606	291,344	224.34
PT1	810,605	291,345	224.35
DMT3	791,670	294,335	222.98
DMT4	764,833	287,485	222.91
PT2	827,164	298,288	224.35
PT3	774,465	281,151	222.24
PT4	776,582	278,054	222.44
PT5	758,362	273,185	222.89
PT100	706,778	343,578	225.34
P1000	734,767	378,119	225.64
PT6	700,973	347,167	225.47
PT7	698,498	341,008	225.44
PT8	702,501	337,966	225.35
PT9	723,053	343,394	225.15
PT10	718,797	355,718	225.30
DG1	698,084	348,455	237.79
DG2	699,230	341,883	236.26
DG3	701,395	334,295	239.37
DG4	726,117	342,110	239.47
DG5	718,349	357,705	236.42
MM007	785,383	397,359	225.28
M001	739,974	375,506	225.71
M002	745,525	375,817	225.88
M003	742,146	383,331	225.78
M004	751,414	391,148	225.90
M005	764,469	396,373	225.74
M006	783,886	405,069	225.40
M00050	757,992	339,402	225.31
M00051	755,217	323,094	225.08

Marker	Coordinata EST	Coordinata NORD	Altitudine [m]
L1	764,7937	350,2512	225,8456
L2	766,7731	345,8108	225,5194
L3	770,8797	336,5635	225,8257
L4	772,1718	333,6491	225,5605
L5	774,2535	329,1909	226,9727
L6	768,6634	342,4583	227,1745
L7	776,0041	324,9896	225,7875
L8	774,4402	321,6052	227,0031
L9	769,5683	319,1384	225,5794
L10	765,6631	317,2705	225,8189
L11	762,1043	315,1559	227,0343
L12	758,5834	313,9839	225,8121
L13	756,0731	312,8214	225,428
L14	753,7806	311,7494	225,8093
L15	745,4024	312,6372	225,7767
L16	743,5152	317,4878	225,5952
L17	742,0822	321,1357	225,7972
L18	740,4189	325,4022	225,7832
L19	738,6233	330,0324	225,4506
L20	737,0608	334,0048	225,8076
L21	736,1648	336,2677	225,8022
L22	733,7015	341,5621	226,6524
L23	741,3869	345,5345	225,8157
L24	744,7402	346,865	225,4293
L25	748,017	348,1467	225,8267
L26	751,3305	349,4561	225,3906
L27	756,2359	351,379	225,455
L28	758,9345	352,4205	225,719
L29	763,2004	342,4996	226,5088
L30	767,0393	333,7083	226,7481
L31	769,4957	327,9684	225,8709
L32	764,8817	322,2369	225,8539
L33	755,6093	317,8882	225,6827
L34	747,8593	318,9897	225,4825
L35	745,6801	324,2471	226,639
L36	743,1506	330,734	226,6289
L37	741,8504	334,0168	226,3803
L38	747,7093	343,0627	225,4791
L39	751,7042	344,6415	226,4146
L40	757,9044	347,1209	226,9214

A3- Errore Faro Scene

Il *software* Faro Scene, in seguito alla registrazione “per forma”, calcola un errore medio tra i punti corrispondenti delle scansioni. Di seguito si riporta la tabella contenente gli errori delle scansioni utilizzate per generare il modello completo del chiostro.

Scansione/Gruppo	Errore dist punto medio di scansione [mm]
Arch_Tolentino_019	2,76
Arch_Tolentino_015	2,37
Arch_Tolentino_017	2,34
Arch_Tolentino_021	2,31
Inge_nicola_scan_027	2,05
Inge_nicola_scan_029	2,03
Inge_nicola_scan_026	1,99
Inge_nicola_scan_028	1,98
Inge_nicola_scan_030	1,97
Inge_nicola_scan_021	1,95
Arch_Tolentino_018	1,92
Inge_nicola_scan_024	1,87
Inge_nicola_scan_032	1,87
Inge_nicola_scan_025	1,83
Arch_Tolentino_022	1,8
Inge_nicola_scan_031	1,79
Arch_Tolentino_020	1,76
Inge_nicola_scan_023	1,74
Inge_nicola_scan_022	1,73
Arch_Tolentino_016	1,72
Inge_nicola_scan_014	1,59
Inge_nicola_scan_019	1,56
Inge_nicola_scan_018	1,54
Inge_nicola_scan_020	1,49
Inge_nicola_scan_016	1,3
Inge_nicola_scan_015	1,2

Statistiche complessive	
Medio[mm]	1,8837
<4mm [%]	76,9

Il *software* Faro Scene, inoltre, calcola l'errore, ovvero la differenza tra la posizione di ciascun *marker* collimato nella scansione 1 e nella scansione 2. A differenza dei programmi utilizzati precedentemente il *software* non genera un *report* e per tale motivo è possibile osservare l'errore attraverso il tasto *dx* sullo *Scanfit* generale. Di seguito si riporta una tabella contenente gli errori di ciascun *marker*.

Target	Errore dist. [mm]	Scansione 1	Scansione 2
L7	10,1	Inge_nicola_scan_021	References
L35	9,87	Inge_nicola_scan_029	References
L12	9,82	Arch_Tolentino_017	References
L28	9,71	Inge_nicola_scan_028	References
L33	9,3	Inge_nicola_scan_029	References
L22	9,21	Inge_nicola_scan_027	References
L39	9,2	Inge_nicola_scan_029	References
L7	9,18	Inge_nicola_scan_023	References
L20	8,99	Arch_Tolentino_020	References
L7	8,99	Inge_nicola_scan_022	References
L1	8,94	Arch_Tolentino_020	References
L24	8,57	Inge_nicola_scan_029	References
L31	8,46	Inge_nicola_scan_025	References
L3	8,31	Inge_nicola_scan_028	References
L35	8,17	Inge_nicola_scan_027	References
L17	8,16	Arch_Tolentino_017	References
L28	8,09	Inge_nicola_scan_015	References
L1	7,98	Arch_Tolentino_022	References
L1	7,89	Inge_nicola_scan_015	References
L16	7,83	Inge_nicola_scan_026	References
L9	7,82	Inge_nicola_scan_020	References
L13	7,81	Inge_nicola_scan_031	References
L5	7,69	Inge_nicola_scan_032	References
L7	7,62	Inge_nicola_scan_020	References
L25	7,61	Inge_nicola_scan_029	References
L19	7,53	Inge_nicola_scan_027	References
L14	7,41	Arch_Tolentino_016	References
L5	7,35	Inge_nicola_scan_020	References
L29	7,32	Inge_nicola_scan_026	References
L15	7,29	Arch_Tolentino_016	References
L32	7,24	Inge_nicola_scan_032	References
L36	7,21	Inge_nicola_scan_030	References
L20	7,04	Inge_nicola_scan_025	References
L23	6,81	Inge_nicola_scan_032	References

Target	Errore dist. [mm]	Scansione 1	Scansione 2
L25	6,7	Inge_nicola_scan_026	References
L21	6,68	Arch_Tolentino_019	References
L35	6,65	Inge_nicola_scan_026	References
L33	6,6	Arch_Tolentino_016	References
L6	6,52	Inge_nicola_scan_016	References
L16	6,51	Arch_Tolentino_016	References
L36	6,48	Inge_nicola_scan_028	References
L8	6,39	Inge_nicola_scan_020	References
L33	6,37	Inge_nicola_scan_032	References
L30	6,31	Inge_nicola_scan_031	References
L12	6,29	Inge_nicola_scan_031	References
L34	6,27	Inge_nicola_scan_032	References
L16	6,07	Inge_nicola_scan_032	References
L15	6,04	Inge_nicola_scan_025	References
L35	6,03	Inge_nicola_scan_024	References
L3	5,91	Inge_nicola_scan_031	References
L39	5,89	Inge_nicola_scan_027	References
L24	5,76	Arch_Tolentino_021	References
L5	5,72	Inge_nicola_scan_030	References
L16	5,69	Inge_nicola_scan_023	References
L12	5,63	Inge_nicola_scan_023	References
L11	5,57	Inge_nicola_scan_025	References
L25	5,37	Arch_Tolentino_021	References
L17	5,36	Arch_Tolentino_016	References
L28	5,33	Inge_nicola_scan_016	References
L28	5,28	Arch_Tolentino_022	References
L18	5,25	Arch_Tolentino_017	References
L24	5,23	Inge_nicola_scan_028	References
L1	5,11	Inge_nicola_scan_028	References
L22	5,11	Arch_Tolentino_019	References
L39	5,07	Inge_nicola_scan_026	References
L18	5,06	Inge_nicola_scan_032	References
L20	4,85	Arch_Tolentino_018	References
L29	4,84	Inge_nicola_scan_029	References
L33	4,83	Inge_nicola_scan_025	References
L19	4,77	Inge_nicola_scan_026	References
L27	4,75	Arch_Tolentino_022	References
L26	4,72	Arch_Tolentino_022	References
L19	4,7	Arch_Tolentino_018	References
L20	4,66	Arch_Tolentino_019	References
L1	4,65	Inge_nicola_scan_014	References

Target	Errore dist. [mm]	Scansione 1	Scansione 2
L6	4,64	Inge_nicola_scan_028	References
L20	4,62	Arch_Tolentino_021	References
L21	4,59	Inge_nicola_scan_026	References
L15	4,54	Arch_Tolentino_015	References
L12	4,53	Inge_nicola_scan_032	References
L33	4,52	Inge_nicola_scan_024	References
L23	4,51	Arch_Tolentino_020	References
L21	4,28	Arch_Tolentino_018	References
L3	4,25	Inge_nicola_scan_018	References
L24	4,2	Arch_Tolentino_020	References
L3	4,19	Inge_nicola_scan_029	References
L14	4,15	Arch_Tolentino_015	References
L23	4,13	Arch_Tolentino_019	References
L13	4,05	Inge_nicola_scan_023	References
L17	4,03	Inge_nicola_scan_025	References
L14	3,97	Inge_nicola_scan_024	References
L28	3,91	Inge_nicola_scan_029	References
L11	3,84	Inge_nicola_scan_022	References
L6	3,82	Inge_nicola_scan_029	References
L1	3,82	Inge_nicola_scan_029	References
L30	3,73	Inge_nicola_scan_030	References
L20	3,66	Inge_nicola_scan_032	References
L8	3,59	Inge_nicola_scan_019	References
L35	3,51	Inge_nicola_scan_025	References
L14	3,49	Inge_nicola_scan_023	References
L36	3,49	Inge_nicola_scan_027	References
L36	3,49	Inge_nicola_scan_024	References
L18	3,37	Inge_nicola_scan_025	References
L9	3,37	Inge_nicola_scan_021	References
L19	3,32	Arch_Tolentino_017	References
L26	3,23	Arch_Tolentino_021	References
L30	3,19	Inge_nicola_scan_032	References
L32	3,08	Inge_nicola_scan_030	References
L4	2,99	Inge_nicola_scan_019	References
L18	2,9	Inge_nicola_scan_026	References
L26	2,82	Inge_nicola_scan_028	References
L26	2,73	Inge_nicola_scan_027	References
L3	2,7	Inge_nicola_scan_030	References
L5	2,51	Inge_nicola_scan_019	References
L4	2,5	Inge_nicola_scan_018	References
L35	2,45	Inge_nicola_scan_032	References

Target	Errore dist. [mm]	Scansione 1	Scansione 2
L32	2,34	Inge_nicola_scan_031	References
L23	2,33	Inge_nicola_scan_026	References
L16	2,27	Inge_nicola_scan_025	References
L34	2,2	Inge_nicola_scan_025	References
L9	2,1	Inge_nicola_scan_031	References
L23	1,99	Inge_nicola_scan_027	References
L11	1,98	Inge_nicola_scan_031	References
L12	1,93	Inge_nicola_scan_022	References
L9	1,87	Inge_nicola_scan_019	References
L24	1,85	Inge_nicola_scan_027	References
L39	1,73	Inge_nicola_scan_028	References
L31	1,67	Inge_nicola_scan_030	References
L36	1,57	Inge_nicola_scan_026	References
L18	1,46	Inge_nicola_scan_027	References
L27	1,35	Inge_nicola_scan_028	References
L13	1,25	Inge_nicola_scan_032	References
L40	0,92	Inge_nicola_scan_028	References

Statistiche angolare/distanza					
MEDIA [mm]	5,21	0,008[°]	DEVIAZIONE[mm]	2,26	0,005[°]
Min[mm]	0,92	0,000[°]	Max [mm]	10,01	0,022[°]

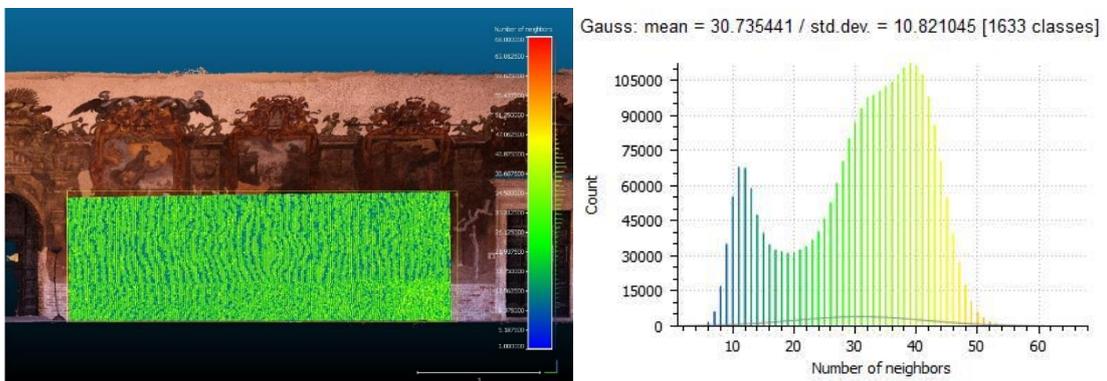
A.4- Analisi di number of neighbors e Cloud to Cloud

Sono state effettuate delle analisi con il *software* Cloud Compare con la finalità di confrontare i *file* di *output* generati con le differenti tecniche di acquisizione tridimensionale.

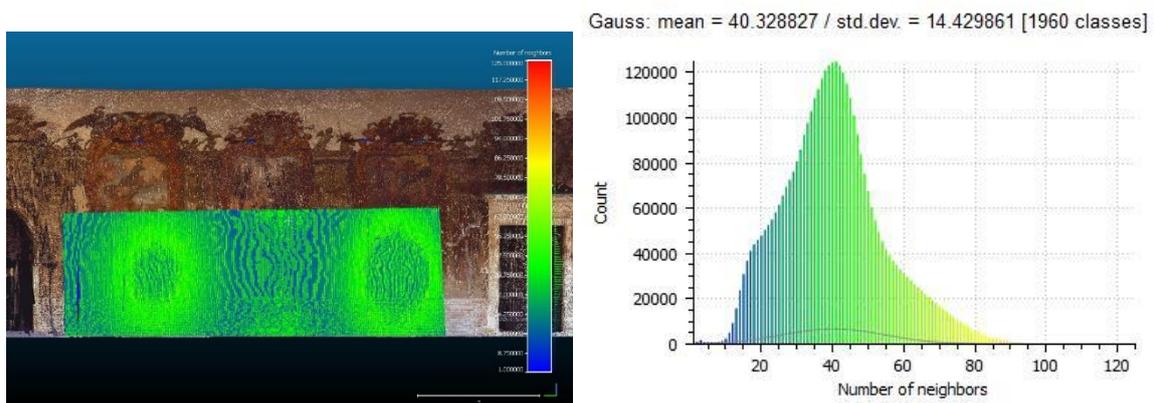
Analisi number of neighbors - Pareti affrescate acquisite con tecnica fotogrammetrica terrestre e *Laser scanner*

- Prospetto Est

Canon EOS 5D Mark II

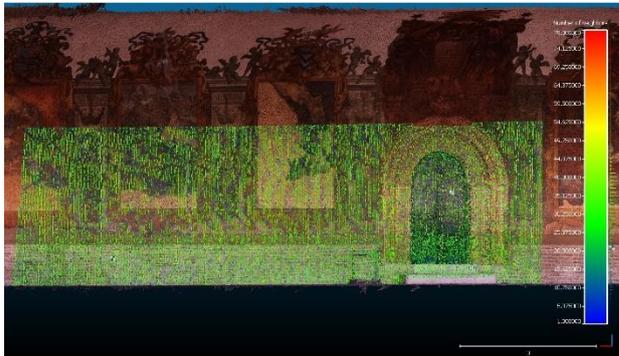


Faro Scene

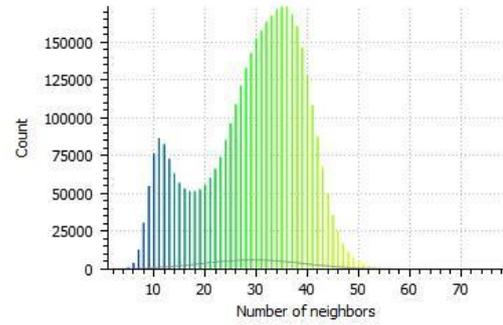


- Prospetto Sud

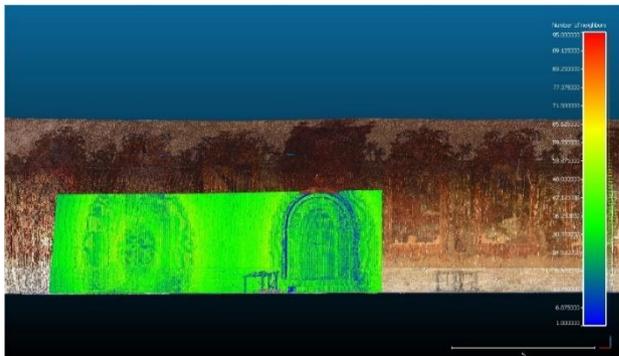
Canon EOS 5D Mark II



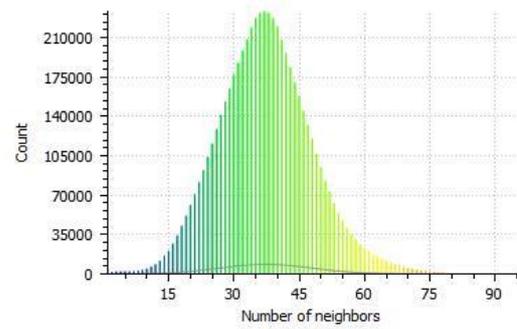
Gauss: mean = 29.339231 / std.dev. = 9.979849 [1972 classes]



Faro Scene

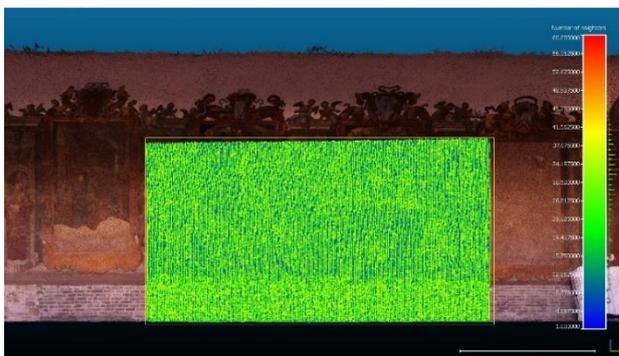


Gauss: mean = 37.278992 / std.dev. = 10.758017 [2418 classes]

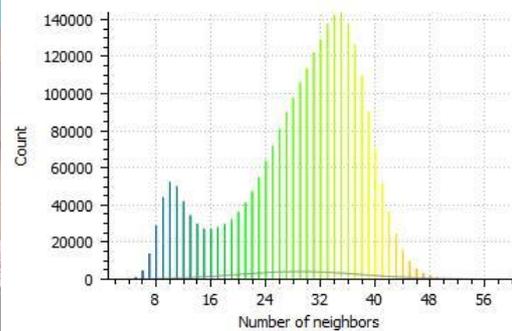


- Prospetto Ovest

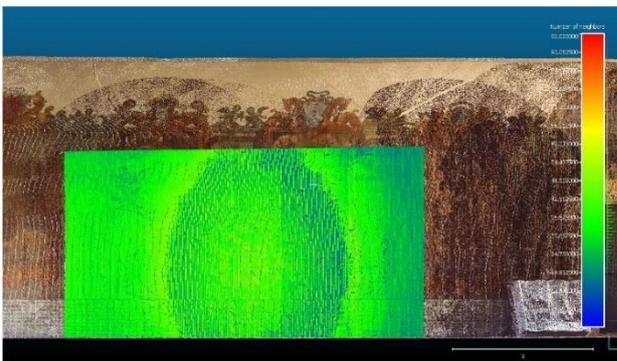
Canon EOS 5D Mark II



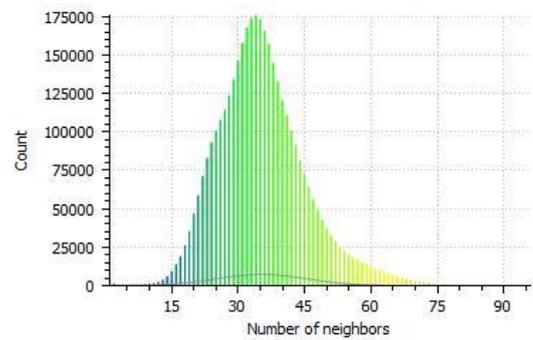
Gauss: mean = 28.941408 / std.dev. = 9.193889 [1617 classes]



Faro Scene

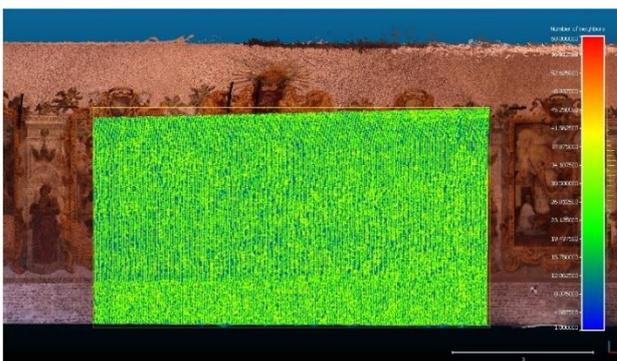


Gauss: mean = 35.357967 / std.dev. = 10.081979 [1941 classes]

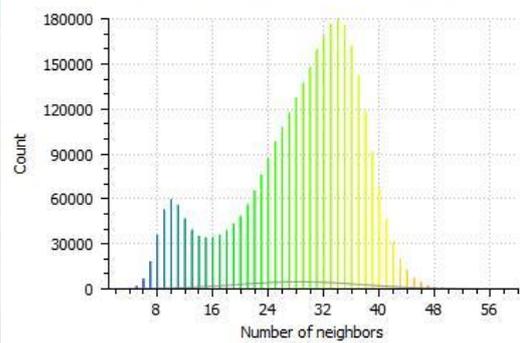


- Prospetto Nord

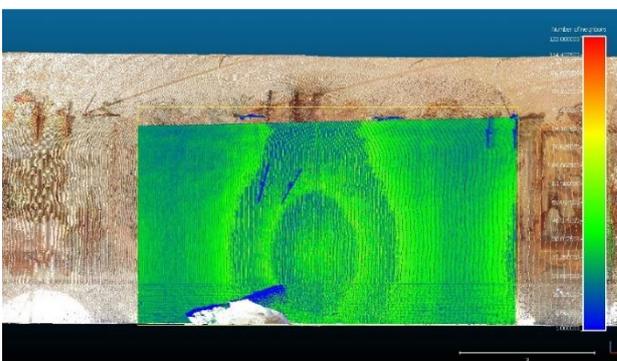
Canon EOS 5D Mark II



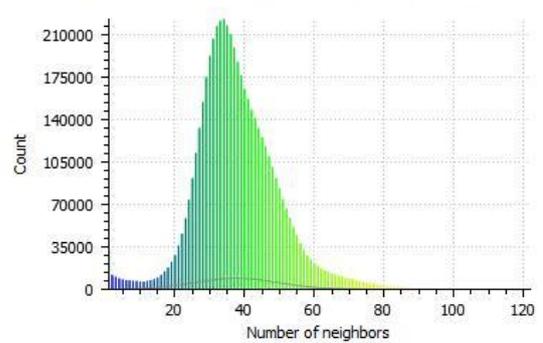
Gauss: mean = 28.453403 / std.dev. = 8.885634 [1785 classes]



Faro Scene



Gauss: mean = 37.612179 / std.dev. = 12.039596 [2277 classes]

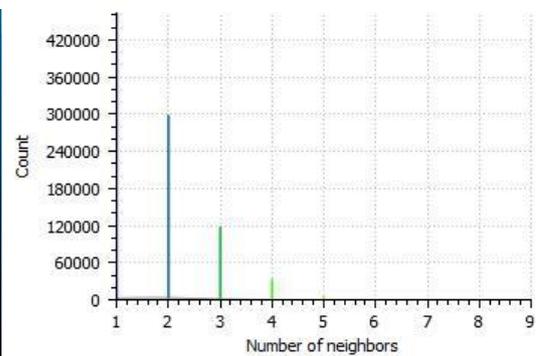
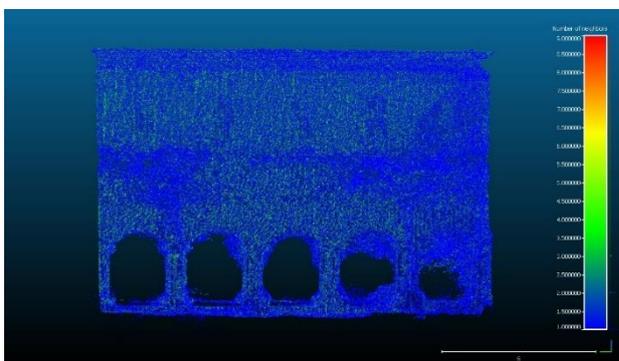


Analisi number of neighbors - Prospetti esterni-Colonne acquisite con tecnica fotogrammetrica aerea UAV e Laser scanner

- Prospetto Est

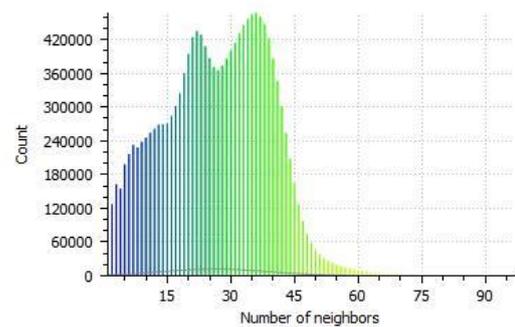
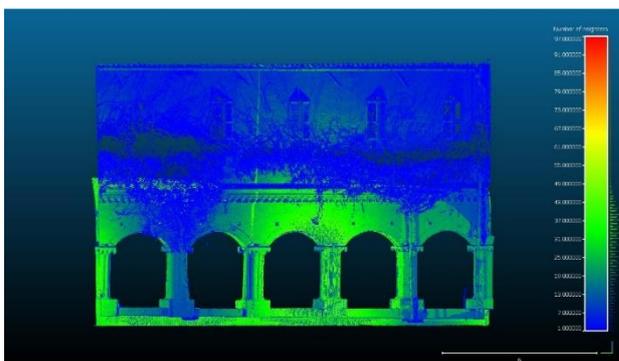
Drone DJI Mavic Pro

Gauss: mean = 1.727451 / std.dev. = 0.893818 [961 classes]



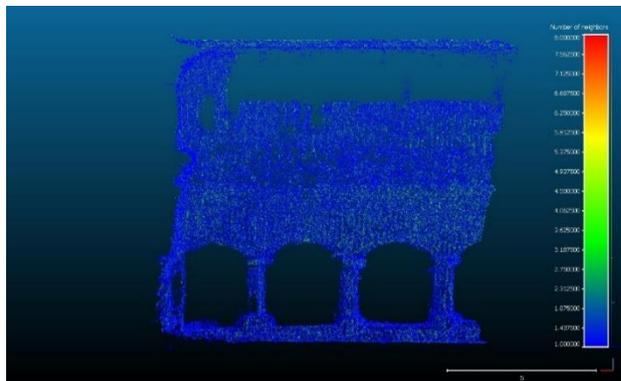
Faro Scene

Gauss: mean = 26.447540 / std.dev. = 12.546560 [3911 classes]

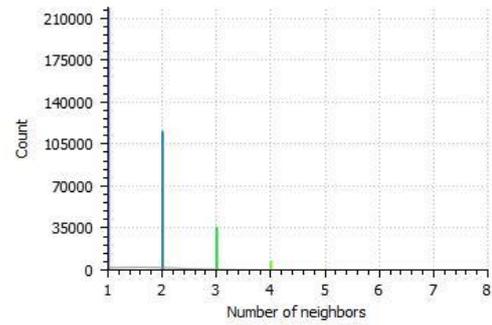


- Prospetto Sud

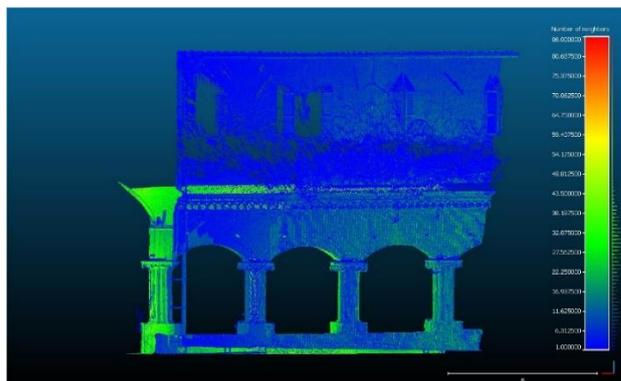
Drone DJI Mavic Pro



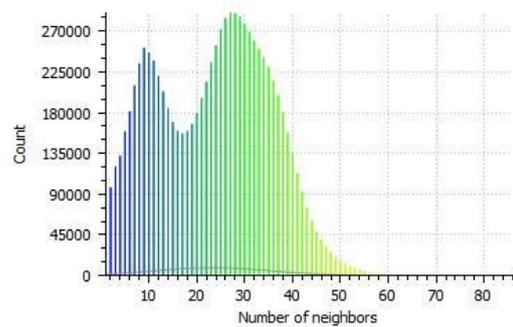
Gauss: mean = 1.568155 / std.dev. = 0.775857 [616 classes]



Faro Scene

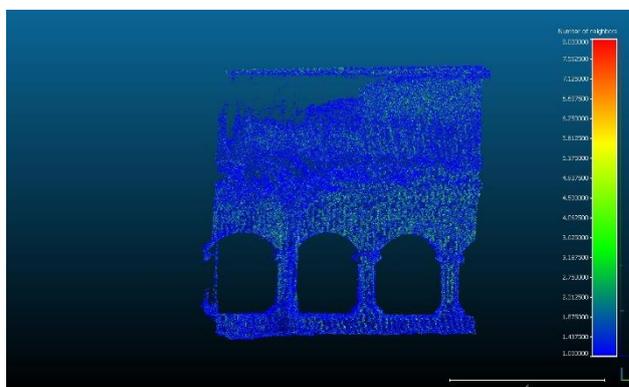


Gauss: mean = 23.271051 / std.dev. = 11.963330 [2985 classes]

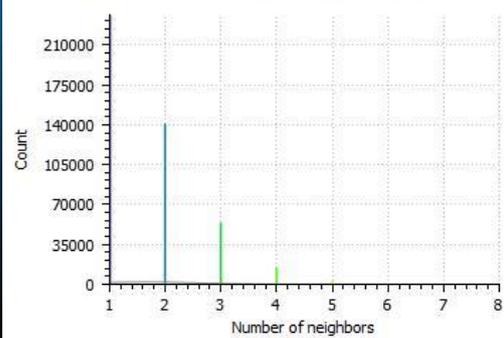


- Prospetto Ovest

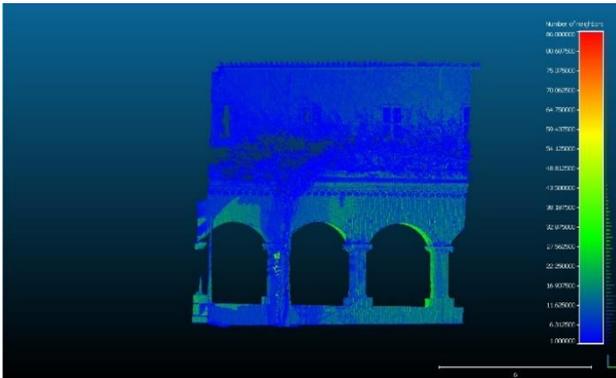
Drone DJI Mavic Pro



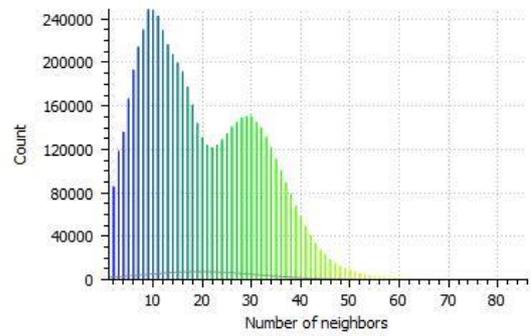
Gauss: mean = 1.685769 / std.dev. = 0.873713 [671 classes]



Faro Scene

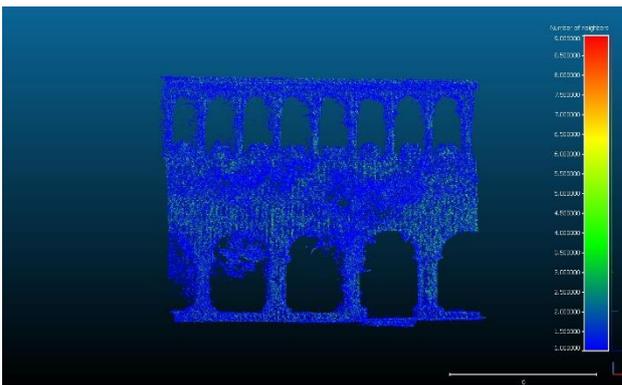


Gauss: mean = 19.611414 / std.dev. = 11.787714 [2519 classes]

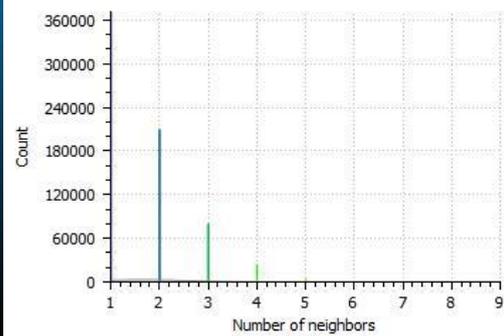


- Prospetto Nord

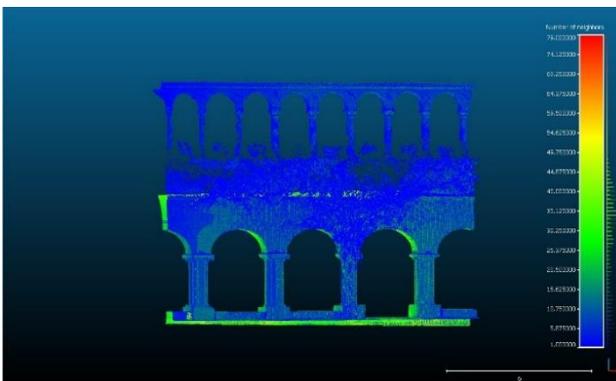
Drone DJI Mavic Pro



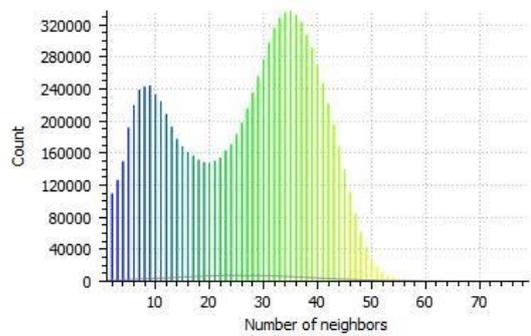
Gauss: mean = 1.676540 / std.dev. = 0.884736 [832 classes]



Faro Scene

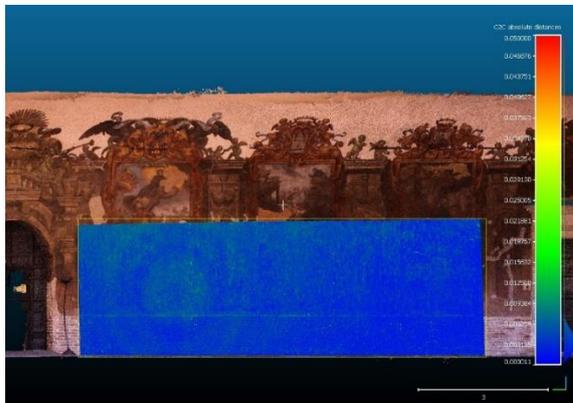


Gauss: mean = 25.790621 / std.dev. = 13.187161 [3185 classes]

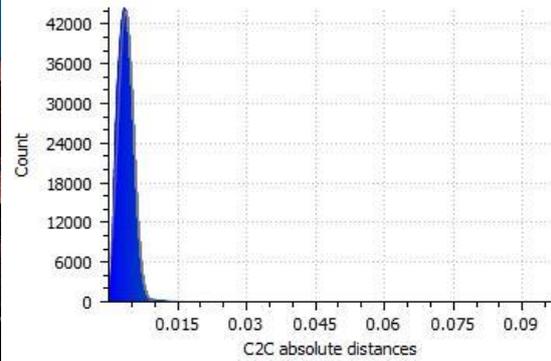


Analisi Cloud to Cloud - Pareti affrescate acquisite con tecnica fotogrammetrica terrestre e Laser scanner

- Prospetto Est



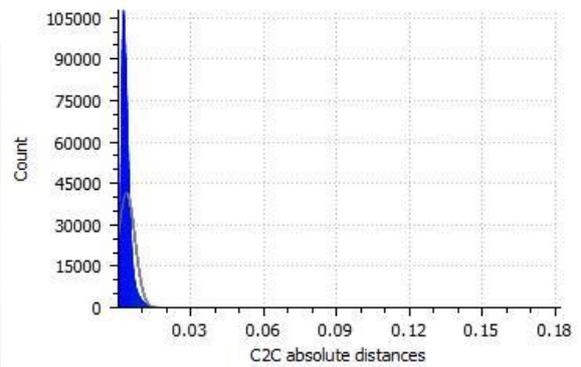
Gauss: mean = 0.003725 / std.dev. = 0.001717 [1957 classes]



- Prospetto Sud



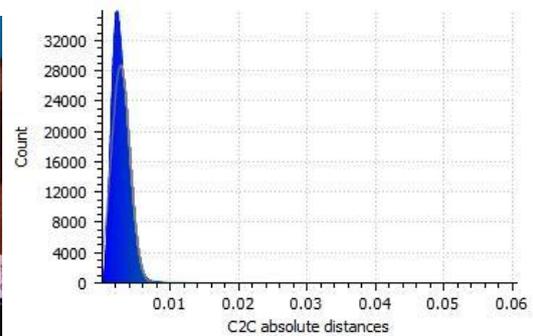
Gauss: mean = 0.003422 / std.dev. = 0.003446 [1972 classes]



- Prospetto ovest



Gauss: mean = 0.002715 / std.dev. = 0.001358 [1617 classes]



- Prospetto Nord

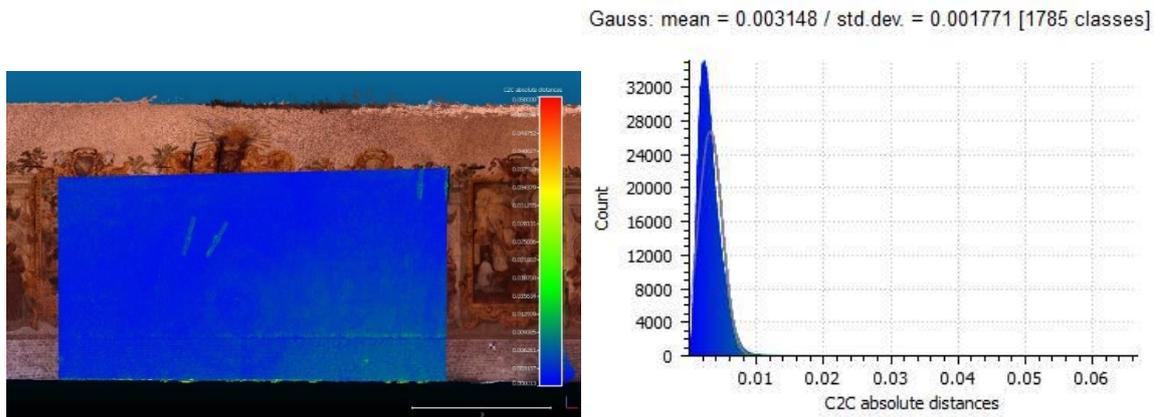
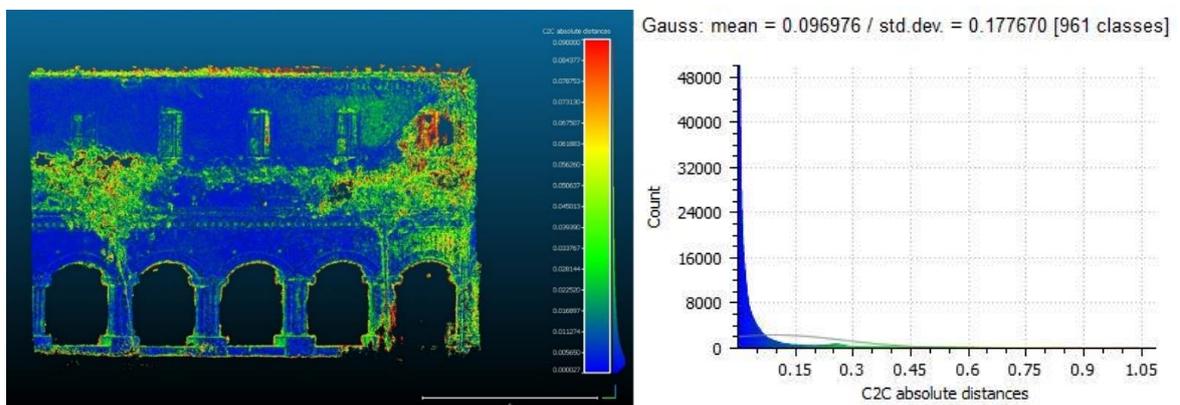


Tabella 0.1- Tabella riassuntiva contenente la media e la deviazione in m

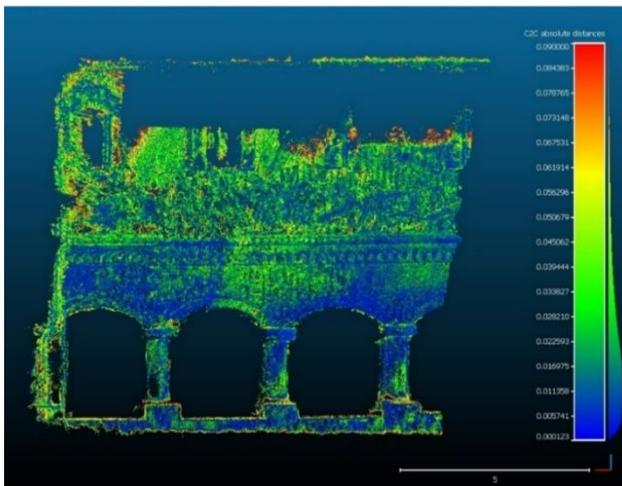
<i>Laser scanner → fotogrammetria terrestre</i>		
<i>Prospetto</i>	<i>Media [mm]</i>	<i>Deviazione[mm]</i>
<i>Est</i>	3,7	1,7
<i>Sud</i>	3,4	3,4
<i>Ovest</i>	2,7	1,3
<i>Nord</i>	3,1	1,7

Analisi Cloud to Cloud - Prospetti esterni-Colonne acquisite con tecnica fotogrammetrica aerea UAV e Laser scanner

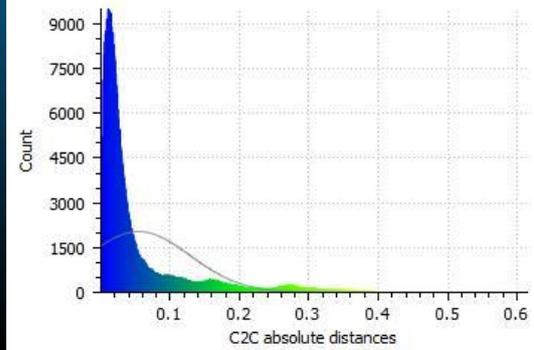
- Prospetto Est



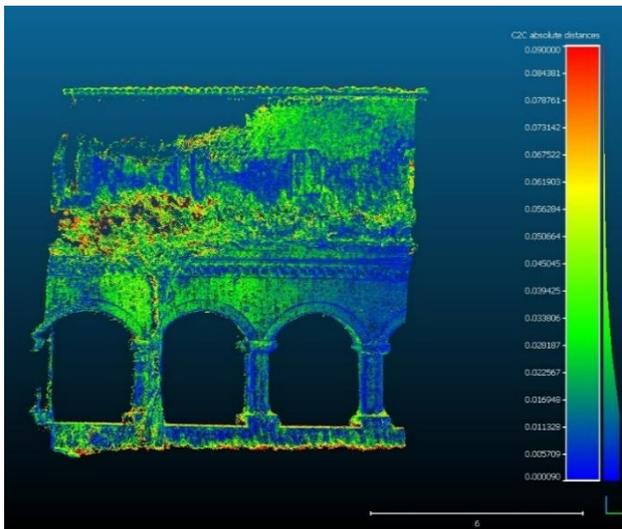
- Prospetto sud



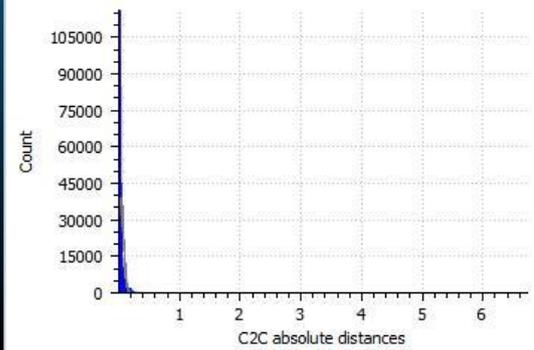
Gauss: mean = 0.054939 / std.dev. = 0.074091 [616 classes]



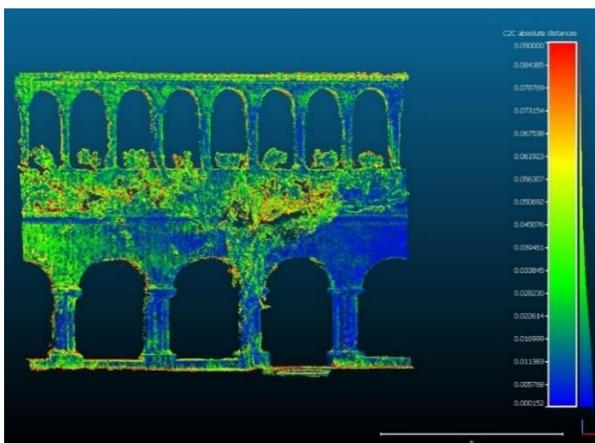
- Prospetto ovest



Gauss: mean = 0.035929 / std.dev. = 0.045609 [671 classes]



- Prospetto nord



Gauss: mean = 0.075164 / std.dev. = 0.125378 [832 classes]

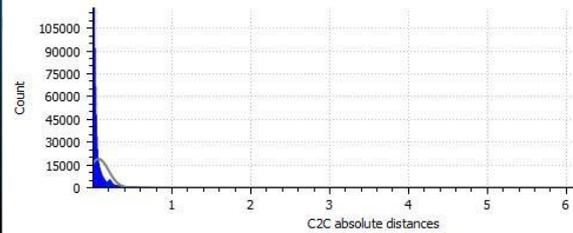
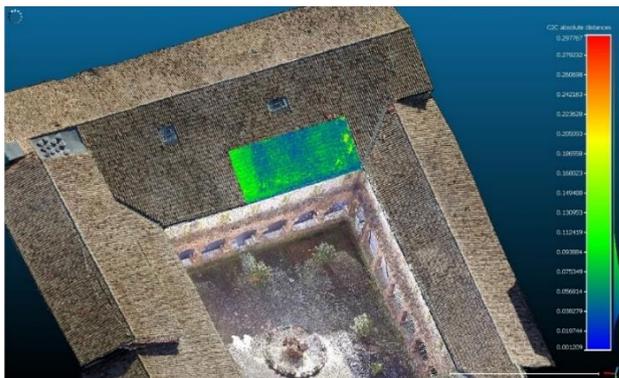


Tabella 0.2- Tabella riassuntiva contenente la media e la deviazione in m

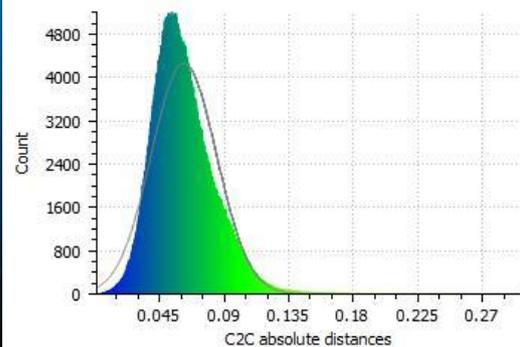
<i>Laser scanner → Fotogrammetria aerea UAV</i>		
<i>Prospetto</i>	<i>Media [mm]</i>	<i>Deviazione[mm]</i>
<i>Est</i>	96	177
<i>Sud</i>	54	74
<i>Ovest</i>	35	45
<i>Nord</i>	75	125

Analisi Cloud to Cloud – Copertura acquisita con tecnica fotogrammetrica aerea UAV e Laser scanner

- Prospetto Sud



Gauss: mean = 0.061995 / std.dev. = 0.022652 [818 classes]



A5- Documentazione fotografica



Figura 0.1-Foto Aerea –DJI Phantom 4



Figura 0.2- Foto Aerea –DJI Phantom 4



Figura 0.3- Foto Aerea –DJI Phantom 4



Figura 0.4- Foto - DJI Mavic Pro



Figura 0.5- Foto - DJI Mavic Pro



Figura 0.6- Foto - DJI Mavic Pro



Figura 0.7- Foto - DJI Mavic Pro



Figura 0.8- Foto - DJI Mavic Pro



Figura 0.9- Foto - DJI Mavic Pro

A6- Altra documentazione

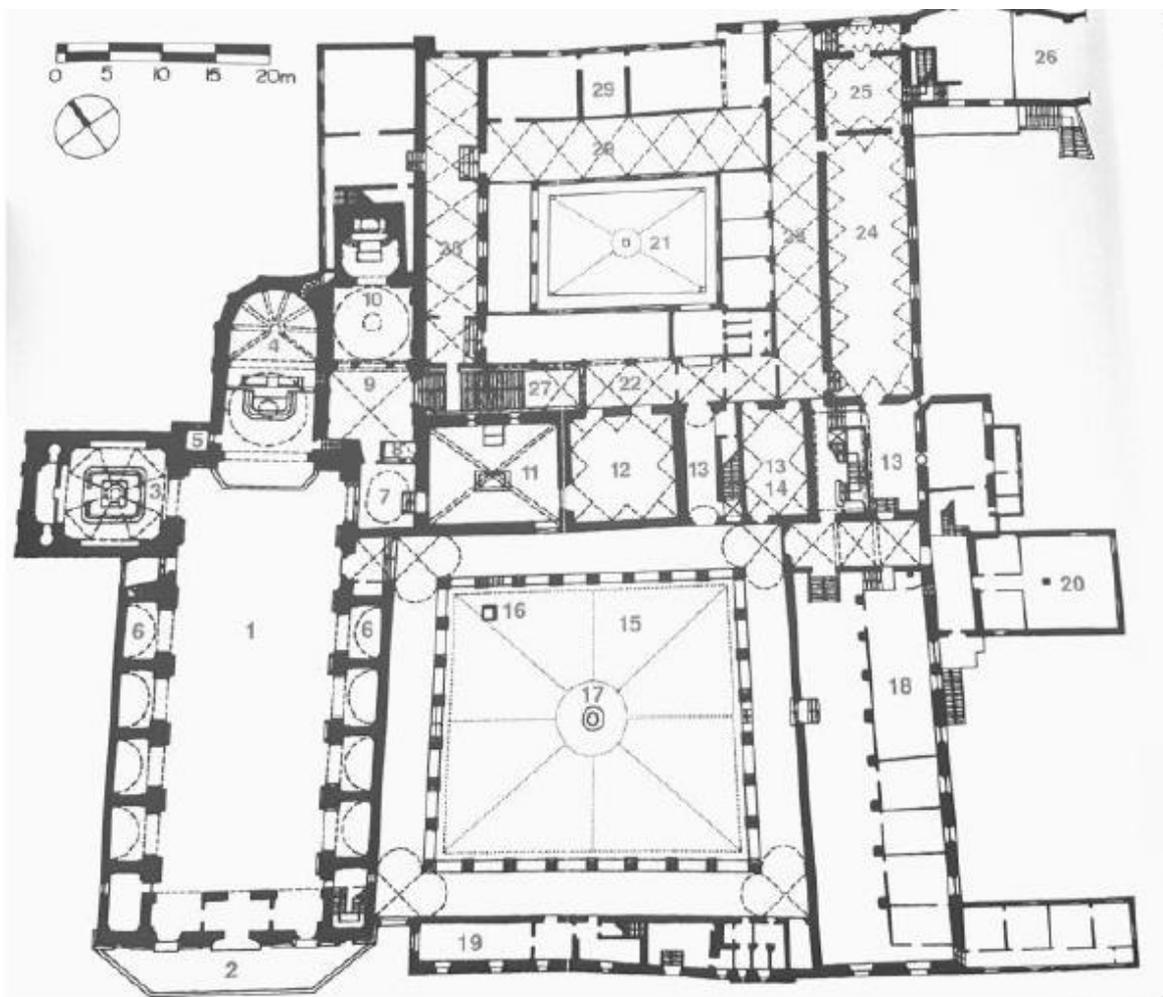


Figura 0.10- Pianta del complesso architettonico di San Nicola da Tolentino- disegno di F. Mariano

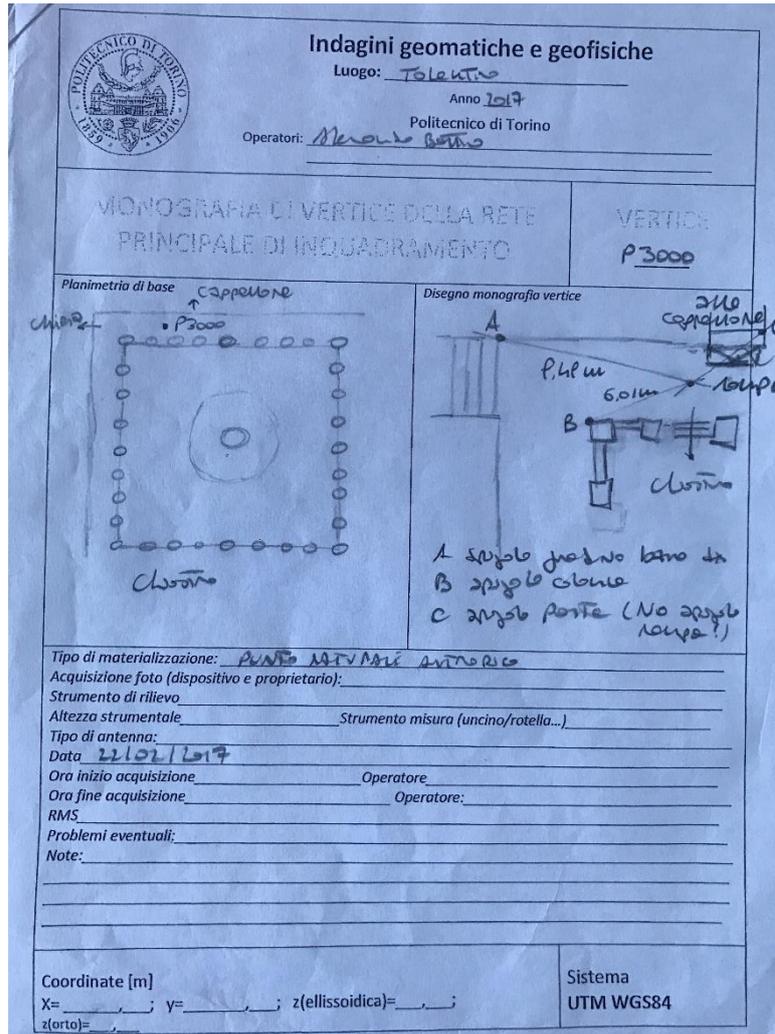


Figura 0.11- Monografia vertici

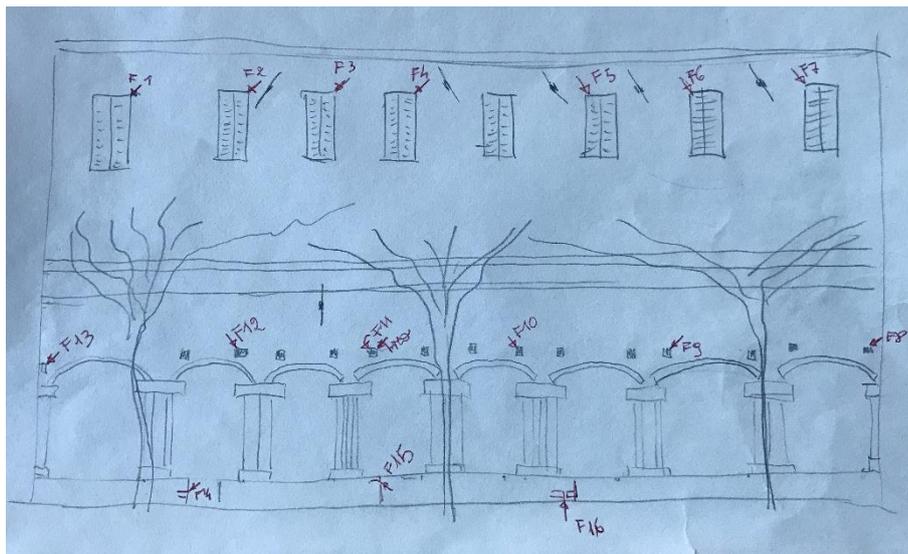


Figura 0.12- Prospetto Est

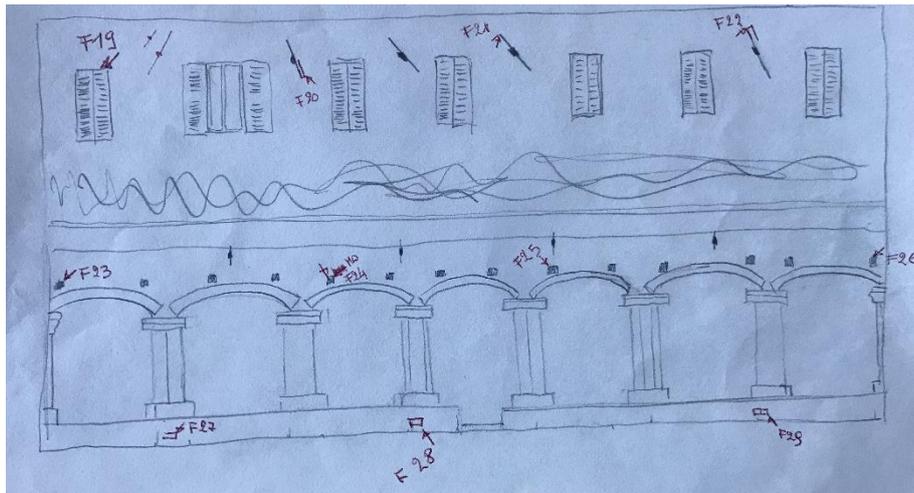


Figura 0.13- Prospetto Sud

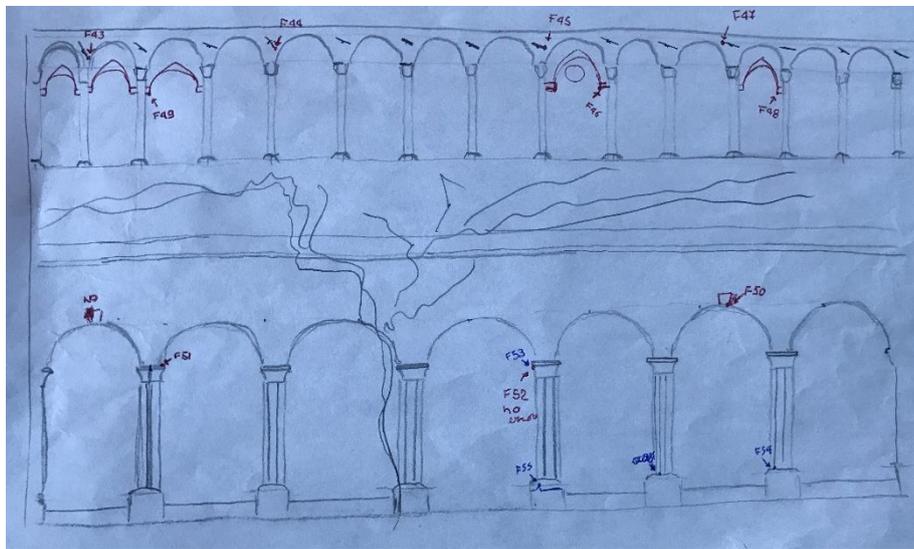


Figura 0.14- Prospetto Nord

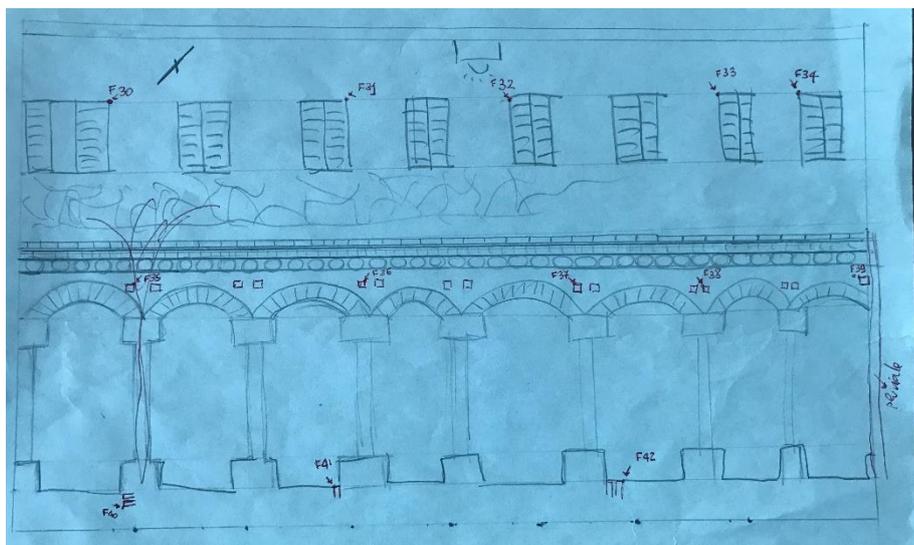


Figura 0.15- Prospetto Ovest



Figura 0.16- - Foto Aerea –DJI Phantom 4



Figura 0.17- Foto Aerea –DJI Phantom 4

Indice delle Figure

Figura 2.1- Schema di tutti gli strumenti per l'acquisizione tridimensionale - M. Russo et al. 2011	10
Figura 2.2- Caratteristiche di funzionamento della tecnica fotogrammetrica e del laser scanner 3D- M. Russo et al. 2011	12
Figura 2.3- Unione di più scansioni per eliminare i coni d'ombra-D. Bartolucci 2009	15
Figura 2.4-Ogni scansione ha un sistema di riferimento proprio, con la registrazione delle scansioni si definisce il sistema di coordinate globali- Dispense A.Piemonte	16
Figura 2.5- Fasi distintive delle due principali tecniche di registrazione scansioni- F.Crosilla et al. 2006	17
Figura 2.6- Schematizzazione del principio di collinearità; si definiscono camera da presa (O), punto immagine (P') e punto oggetto (P)- Dispense Lingua 2017.	21
Figura 2.7- A) Distorsioni dell'obiettivo, B) distorsione del sensore	23
Figura 2.8- Esempi di immagini con distorsioni causate dall'obiettivo- Dispense F. Pirri... ..	23
Figura 2.9- Schema della presa aerea nadirale- R.CannoZZo et al. 2012	24
Figura 2.10- Schema di copertura del territorio con volo fotogrammetrico organizzato in traiettorie rettilinee e parallele- R.CannoZZo et al. 2012	25
Figura 2.11 A) Approccio a singola immagine B) Prese ad assetto pseudo-normale, C) e D) possibili esempi di configurazione per la bundle solution	29
Figura 2.12- Definizione della scala media dei fotogrammi in configurazione di presa aerea- R. CannoZZo 2012	30
Figura 2.13- Parametri necessari per definire il GSD- 3Deffe	32
Figura 3.1- Schematizzazione della Structure from Motion dalla fotografie alla nuvola di punti, alla generazione DSM e ortofoto	36
Figura 3.2- Fotocamera stenopeica- A. Fusiello, 2017	37
Figura 3.3- Costruzione del punto immagine di un generico punto M- A. Fusiello, 2017 ..	38
Figura 3.4- Modello geometrico della camera- A. Fusiello, 2017	39
Figura 3.5- Vista in pianta del modello della camera fotografica- A. Fusiello, 2017.....	39
Figura 3.6- Sistemi di riferimento- A. Fusiello, 2017	40
Figura 3.7- Camera nello spazio-Dispense SIFET 2017 Lingua	41

Figura 3.8- Oggetto di calibrazione con sistema di riferimento mondo concorde- A. Fusiello, 2017	44
Figura 3.9- Distorsione radiali.....	44
Figura 3.10- Distorsione tangenziale	45
Figura 3.11- Determinazione punto tridimensionale mediante la triangolazione- A. Fusiello, 2017	46
Figura 3.12- Geometria epipolare- A. Fusiello, 2017.....	46
Figura 3.13- Coppia di immagine stereo, a sinistra sono evidenziati i punti mentre a destra sono tracciate le rette epipolari corrispondenti a tali punti- A. Fusiello, 2017	47
Figura 3.14- Rettificazione delle immagini, i piani immagini risultano paralleli alla linea di base- A. Fusiello, 2017	48
Figura 3.15- Aggregazione dei costi-H. Hirschmuller, 2007	51
Figura 3.16- DEM e DSM- Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala	59
Figura 3.17- A sinistra modello altimetrico con disposizione TIN, a destra modello altimetrico con disposizione regolare- Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala	60
Figura 3.18- Relazione tra l'altezza di un punto e l'errore di altezza- M. Lo Brutto 2005 ..	61
Figura 3.19- Procedura per la generazione dell'ortofoto- Dispense A. Lingua	62
Figura 3.20- a) Struttura dell'ortofoto solida di precisione, b) DEM associato a un ortofoto- Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala	62
Figura 4.1- Basilica di San Nicola a Tolentino, Macerata- Google Earth Pro.....	65
Figura 4.2- Pianta del complesso architettonico di San Nicola da Tolentino- disegno di F. Mariano	66
Figura 4.3- Blasono nobiliare	68
Figura 4.4- Classificazione zone sismiche Regione Marche-picchionews	68
Figura 5.1- Configurazione del segnale ricevuto ed emesso dal ricevitore	73
Figura 5.2- Strumento GeoMax, palina e base.....	74
Figura 5.3- Rete d'inquadramento con vertici GNSS (colore verde), rete di raffittimento con vertici poligonali e poligonale (colore blu)	74
Figura 5.4- Rete di dettaglio (colore rosso)	75

Figura 5.5- Numero minimo di GCP (triangolo- XYZ control point, cerchio-Z control point) a seconda del tipo di tecnica. A) GNSS e IMU e ric. trasversale del 20%, B) GPS e IMU, ric. trasversale del 20% e strisciate di bordo, C) GPS e IMU e ric. trasversale del 60%- Dispense A. Lingua	76
Figura 5.6- Esempio di Monografia realizzata in loco	76
Figura 5.7- Esempio di Eidotipo realizzato in loco.....	77
Figura 5.8- Schema generico del piano di volo per l'acquisizione di immagini nadirali(A) e di immagini oblique (B)	77
Figura 5.9- Realizzazione del piano di volo per l'acquisizione di immagini nadirali(A) e di immagini oblique (B)	78
Figura 5.10- Drone DJI Phantom 4.....	80
Figura 5.11- Foto dell'elemento oggetto di studio in cui si possono notare i target posizionati per la registrazione delle scansioni.....	85
Figura 5.12- Eidotipo del chiostro con centri di scansione	85
Figura 5.13- Laser scanner FARO CAM 2	86
Figura 5.14- Camera fotografica Canon EOS 5D Mark II	87
Figura 5.15- Fotogrammi acquisiti con asse della camera perpendicolare all'oggetto(A) e con asse inclinato (B).....	88
Figura 5.16- Schema teorico(A) e realizzazione (B) dell'approccio dei fasci proiettivi	88
Figura 5.17- Parametri necessari per calcolare il GSD	90
Figura 5.18- Configurazione errata-Tutorial PhotoScan.....	91
Figura 5.19- Unione di più fotogrammi estratti dai video.....	91
Figura 5.20- Drone DJI MAVIC PRO	92
Figura 5.21- Drone pilotato mediante stick virtuali	92
Figura 6.1-Schematizzazione processo fotogrammetrico- Dispense D. Marenchino	93
Figura 6.2- Fasi di elaborazione e possibili output	95
Figura 6.3- Allineamento dei fotogrammi e generazione della nuvola sparsa	97
Figura 6.4- Collimazione manuale dei marker.....	97
Figura 6.5- Quality Check estratto dal report.....	98
Figura 6.6- Stima iniziale e successiva ottimizzazione dei parametri della camera fotografica	99

Figura 6.7- Stima della posizione della camera e valutazione del numero di matching dei keypoints tra le immagini	99
Figura 6.8- Scarti residui massimi ammissibili sui GCP e CP- Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala.....	101
Figura 6.9- Nuvola sparsa, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017	101
Figura 6.10- Nuvola densa, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017	103
Figura 6.11- Mesh3D texturized, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017	104
Figura 6.12- Ortofoto, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017.	105
Figura 6.13- DSM, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017	105
Figura 6.14- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio	106
Figura 6.15- Nuvola sparsa, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017	108
Figura 6.16- Distribuzione dei GCP nell'area oggetto di studio.....	109
Figura 6.17- Scarti residui massimi ammissibili sui GCP e CP- Linee guida Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala.....	112
Figura 6.18- Nuvola densa, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017	113
Figura 6.19- Mesh 3D, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017.	114
Figura 6.20- Texture e Tiled Model, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017.....	116
Figura 6.21- DSM, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017	117
Figura 6.22- Ortofoto, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017.	117
Figura 6.23- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio	118
Figura 6.24- Caricamento delle immagini e determinazione delle loro caratteristiche ...	119
Figura 6.25- Individuazione dei punti chiave mediante l'algoritmo SIFT	120
Figura 6.26- Confronto a coppie tra le immagini	120
Figura 6.27- Allineamento dei fotogrammi in corso e generazione della nuvola sparsa..	121
Figura 6.28- Allineamento dei fotogrammi e generazione della nuvola sparsa	121

Figura 6.29- Inserimento manuale dei GCP.....	122
Figura 6.30- Distribuzione dei GCP nell'area oggetto di studio.....	122
Figura 6.31- Nuvola densa, Tolentino, centro città, acquisizione Phantom 4, Febbraio 2017	123
Figura 6.32- Caricamento delle scansioni.....	124
Figura 6.33- "Vista corrispondenza" contenente tutte le scansioni caricate nel workspace e allineamento manuale tra le scansioni.....	125
Figura 6.34- Estratto dello ScanFit ottenuto inseguito all'allineamento "per forma" delle scansioni	126
Figura 6.35- Tensione del posizionamento dei punti di scansione dopo l'allineamento "per forma"	126
Figura 6.36- Individuazione automatica dei target con segnalazione di errori.....	127
Figura 6.37- Individuazione manuale dei target.....	127
Figura 6.38- Tensione dei target ottenuta inseguito alla registrazione delle scansioni ...	129
Figura 6.39- "Vista corrispondenza" con allineamento dei tutte le scansioni	129
Figura 6.40- "Vista 3D" del modello tridimensionale	130
Figura 6.41- Colorazione scansione	131
Figura 6.42- "Vista 3D" modello tridimensionale colorato	131
Figura 6.43- Esportazione scansioni	132
Figura 6.44- Allineamento fotogrammi	134
Figura 6.45- Nuvola sparsa, Chiostro di Tolentino, acquisizione Canon EOS 5D, Febbraio 2017	134
Figura 6.46- Nuvola densa, Chiostro di Tolentino, acquisizione Canon EOS 5D, Febbraio 2017	137
Figura 6.47- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio	138
Figura 6.48- Nuvola densa relativa al lato Sud-Est, Chiostro di Tolentino	138
Figura 6.49- Modello tridimensionale con marker creati per generare il prospetto	140
Figura 6.50- Prospetto Sud-Est.....	140
Figura 6.51- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio	140
Figura 6.52- Schematizzazione operazioni effettuate.....	142
Figura 6.53- Allineamento fotogrammi estratti video 0047	143

Figura 6.54- Nuvola sparsa, chiostro Tolentino, acquisizione Mavic Pro, Febbraio 2017	143
Figura 6.55- Allineamento fotogrammi estratti video 0048	144
Figura 6.56- Nuvola sparsa, chiostro Tolentino, acquisizione Mavic Pro, Febbraio 2017	144
Figura 6.57- Unico modello tridimensionale dato dall'unione dei due chunks.....	149
Figura 6.58- Nuvola sparsa, chiostro Tolentino, ottenuta dall'unione dei due chunks ..	149
Figura 6.59- Nuvola densa, chiostro Tolentino, ottenuta dopo l'unione dei due chunks	150
Figura 6.60- Nuvola densa, chiostro Tolentino, ottenuta dopo l'unione dei due chunks con marker	151
Figura 6.61- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio	151
Figura 6.62- Nuvola densa, chiostro Tolentino, parete Nord-Ovest	152
Figura 6.63- Mesh3D texture, chiostro Tolentino, parete Nord-Ovest.....	153
Figura 6.64-Modello tridimensionale con marker creati per generare il prospetto.....	153
Figura 6.65- Prospetto Nord-Ovest	154
Figura 6.66- Grafico con i tempi necessari per effettuare ogni singolo passaggio	154
Figura 7.1- Nuvole di punti restituite da A) Pix4D B) PhotoScan C) VisualSFM	156
Figura 7.2- Analisi number of neighbors e scala di riferimento	157
Figura 7.3-Istogramma sul number of neighbors relative alla nuvola di punti restituita A) Pix4D B) PhotoScan e C) VisualSFM.....	158
Figura 7.4- Modello Altimetrico realizzato con il software Pix4D, la completezza è rappresentata in rosso.....	159
Figura 7.5- Modello Altimetrico realizzato con il software Photoscan, la completezza è rappresentata in rosso.....	160
Figura 7.6- Grafici del number of neighbors A) Fotogrammetria terrestre B) Laser scanner	161
Figura 7.7- Visualizzazione della distribuzione dei number of neighbors A) Fotogrammetria terrestre B) Laser scanner	161
Figura 7.8- Grafici del number of neighbors A) Fotogrammetria aerea con UAV B) Laser scanner	162
Figura 7.9- Visualizzazione della distribuzione dei number of neighbors A) Fotogrammetria aerea con UAV B) Laser scanner.....	163

Figura 7.10- Grafico relativo alla distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con laser scanner e fotogrammetria terrestre	164
Figura 7.11- Visualizzazione della distribuzione della distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con laser scanner e fotogrammetria terrestre.....	164
Figura 7.12- Grafico relativo alla distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con laser scanner e fotogrammetria aerea mediante UAV.	165
Figura 7.13- Visualizzazione della distribuzione della distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con laser scanner e fotogrammetria aerea mediante UAV.	165
Figura 7.14- Grafico relativo alla distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con laser scanner e fotogrammetria aerea mediante UAV.	166
Figura 7.15- Visualizzazione della distribuzione della distanza assoluta tra la nuvola di punti acquisiti con laser scanner e fotogrammetria aerea mediante UAV.	166
Figura 7.16- Sezione inferiore del Chiostro	167
Figura 7.17- Sezione superiore del Chiostro.....	168
Figura 7.18- Modello tridimensionale del Chiostro da Tolentino	169
Figura 7.19- Componenti architettoniche	170
Figura 8.1- Codifica degli elementi strutturali della porzione esaminata del chiostro	173
Figura 8.2- Codifica degli elementi strutturali della porzione esaminata del chiostro	173
Figura 9.1- Il BIM- fonte: www.bimon.it	177
Figura 9.2- Workflow per la realizzazione di HBIM- A. Spanò 2016.....	179
Figura 9.3- Schematizzazione suddivisione LOD - http://www.ingenio-web.it/immagini/Articoli/PDF/BIM_I_LOD_nella_UNI_11337_2017_1To9.pdf	182
Figura 9.4- Schema LOD - http://www.ingenio-web.it/immagini/Articoli/PDF/BIM_I_LOD_nella_UNI_11337_2017_1To9.pdf	182
Figura 9.5- Settaggio dei parametri degli outputs.....	184
Figura 9.6- Settaggio dei parametri.....	184
Figura 9.7- Importazione della nuvola di punti con posizionamento da origine a origine	185
Figura 9.8- Differente posizione a causa della perdita di georeferenziazione della nuvola di punti relativa all'edificio	186
Figura 9.9- Finestra "Fit Wall Selection" per il controllo del profilo e l'impostazione dello spessore del muro	187

Figura 9.10- Creazione del muro	187
Figura 9.11- Impostazione parametro dimensione del pixel	
Figura 9.12- Ortofoto generata a sinistra, a destra la nuvola di punti utilizzata per generare l'ortofoto.....	188
Figura 9.13- Comando "Tetto da perimetro"	189
Figura 9.14- Comando "Model line" per individuazione linea di colmo	189
Figura 9.15- Creazione della copertura	189
Figura 9.16- Modellazione colonne	190
Figura 9.17- Alcuni elementi di dettaglio a sinistra capitello loggiato Nord-Est - a destra la prima porta collocata sul lato Sud-Ovest	190
Figura 9.18- "Elementi punto" resi adattivi e "Spline" resi linee di riferimento	191
Figura 9.19- Parametrizzazione chiave di volta	191
Figura 9.20- Volte a botte generata come solido di sottrazione.....	192
Figura 9.21- Creazione della volta a botte mediante il solido di sottrazione	192
Figura 9.22-Volte a crociera generata come solido di sottrazione	192
Figura 9.23- Creazione delle volte a crociera mediante il solido di sottrazione	193
Figura 9.24- Esempio di confronto tra la volte a botte ovest e la nuvola di punti.....	194
Figura 9.25- Confronto tra la copertura e la nuvola di punti	195
Figura 9.26- A sinistra) porzione di parete ovest senza elementi naturali, a destra) porzione di parete ovest senza il fregio.....	196
Figura 9.27- Esempio di confronto tra la parete interna est e la nuvola di punti.....	196
Figura 9.28- Confronto tra le colonne e la nuvola di punti	197
Figura 9.29- A sinistra LOD G.0- A destra LOD G.1	198
Figura 9.30- A sinistra LOD G.3- A destra LOD G.4	198
Figura 9.31- A sinistra LOD G.5- A destra LOD G.6	199
Figura 9.32-Scheda del level of Detail di una colonna	200
Figura 13.1-Foto Aerea –DJI Phantom 4.....	230
Figura 13.2- Foto Aerea –DJI Phantom 4	230
Figura 13.3- Foto Aerea –DJI Phantom 4.....	231
Figura 13.4- Foto - DJI Mavic Pro.....	231

Figura 13.5- Foto - DJI Mavic Pro.....	232
Figura 13.6- Foto - DJI Mavic Pro.....	232
Figura 13.7- Foto - DJI Mavic Pro.....	232
Figura 13.8- Foto - DJI Mavic Pro.....	233
Figura 13.9- Foto - DJI Mavic Pro.....	233
Figura 13.10- Pianta del complesso architettonico di San Nicola da Tolentino- disegno di F. Mariano	234
Figura 13.11- Monografia vertici	235
Figura 13.12- Prospetto Est	235
Figura 13.13- Prospetto Sud	236
Figura 13.14- Prospetto Nord	236
Figura 13.15- Prospetto Ovest.....	236
Figura 13.16- - Foto Aerea –DJI Phantom 4.....	237
Figura 13.17- Foto Aerea –DJI Phantom 4.....	237

Indice delle tabelle

Tabella 2.1- Scale di lavoro e possibili tecniche per il rilevamento 3D digitale - M. Russo et al. 2011	10
Tabella 2.2-Classificazione degli UAVs Tactic a cura della Unmanned Vehicle Systems International Association.....	26
Tabella 2.3- Relazione tra la scala della carta e la scala del fotogramma	31
Tabella 2.4- Valori del GSD da utilizzare nel caso di prese con camere digitali in funzione della scala nominale	32
Tabella 5.1- Caratteristiche del drone utilizzato	81
Tabella 5.2- Caratteristiche strumento utilizzato.....	86
Tabella 5.3- Caratteristiche strumento utilizzato.....	87
Tabella 5.4- Calcolo del GSD mediante il file Excel fornito da Pix4D	90
Tabella 6.1- Caratteristiche nuvola sparsa di punti.....	96
Tabella 6.2- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)	100
Tabella 6.3- Residui dei CP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z).....	100
Tabella 6.4- Confronto tra i residui reali e i valori limiti ammissibili.....	101
Tabella 6.5- Caratteristiche nuvola densa di punti.....	103
Tabella 6.6- Caratteristiche nuvola sparsa di punti.....	107
Tabella 6.7- Stima iniziale dei parametri della camera fotografica.....	109
Tabella 6.8- Ottimizzazione dei parametri della camera fotografica	110
Tabella 6.9- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)	110
Tabella 6.10- Residui dei CP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z).....	111
Tabella 6.11- Confronto tra i residui reali e i valori limiti ammissibili.....	111
Tabella 6.12- Caratteristiche nuvola densa di punti.....	113
Tabella 6.13- Caratteristiche modello tridimensionale.....	115
Tabella 6.14- Stima iniziale dei parametri della camera fotografica.....	133
Tabella 6.15- Caratteristiche nuvola sparsa di punti.....	133
Tabella 6.16- Ottimizzazione dei parametri della camera fotografica	135
Tabella 6.17- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z)	136
Tabella 6.18- Caratteristiche nuvola densa di punti.....	137

Tabella 6.19- Caratteristiche del modello tridimensionale della sola parete Sud-Est	139
Tabella 6.20- Marker creati ad hoc per la generazione del prospetto.....	140
Tabella 6.21- Parametri definiti nel software MATLAB e numero di immagini salvate dopo un'analisi manuale.....	141
Tabella 6.22- Caratteristiche nuvola sparsa di punti-Chunck 1.....	144
Tabella 6.23- Caratteristiche nuvola sparsa di punti-Chunck 2.....	145
Tabella 6.24- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z).....	145
Tabella 6.25- Residui dei CP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z).....	146
Tabella 6.26- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z).....	146
Tabella 6.27- Residui dei CP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z).....	147
Tabella 6.28- Residui dei GCP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z).....	148
Tabella 6.29- Residui dei CP lungo le tre coordinate cartesiane (x, y, z).....	148
Tabella 6.30- Caratteristiche nuvola densa di punti.....	150
Tabella 6.31- Caratteristiche modello tridimensionale della sola parete Nord-Ovest.....	152
Tabella 6.32- Marker creati ad hoc per la generazione del prospetto.....	154
Tabella 7.1- Confronto caratteristiche software	155
Tabella 7.2- Completezza modelli altimetrici realizzati con i software Pix4D e PhotoScan	159
Tabella 7.3- Tabella riassuntiva dei parametri di media e deviazione standard relativi ai quattro prospetti	162
Tabella 7.4- Tabella riassuntiva dei parametri di media e deviazione standard relativi ai quattro prospetti	163
Tabella 7.5- Tabella riassuntiva dei parametri di media e deviazione standard relativi ai quattro prospetti	164
Tabella 7.6- Tabella riassuntiva dei parametri di media e deviazione standard relativi ai quattro prospetti	166
Tabella 8.1- Dati riguardanti l'aspetto anagrafico identificativo dell'elemento oggetto di studio	172
Tabella 8.2- Dati riguardanti la morfologia degli elementi	173
Tabella 9.1- Valori di scostamento e sqm ottenuti dal confronto tra la nuvola di punti e il modello HBIM.....	194

Tabella 9.2- Valori dello scostamento e sqm ottenuti dal confronto tra la nuvola di punti e il modello HBIM	195
Tabella 9.3- Valori dello scostamento e sqm ottenuti dal confronto tra la nuvola di punti e il modello HBIM	196
Tabella 9.4- Valori dello scostamento e sqm ottenuti dal confronto tra la nuvola di punti e il modello HBIM	197
Tabella 13.1- Tabella riassuntiva contenente la media e la deviazione in m.....	227
Tabella 13.2- Tabella riassuntiva contenente la media e la deviazione in m.....	229

Ringraziamenti

Nel concludere questo percorso di studi vorrei porgere un sincero grazie al tecnico, ai dottorandi e a tutti i componenti del DIATI e del DAD, per avermi aiutata con i loro preziosi consigli al raggiungimento di questo obiettivo.

Ringrazio Stefano, Alessandro e Martina, compagni di lavoro, con i quali ho condiviso gioie e difficoltà.

Un ringraziamento particolare ai miei genitori e a mio fratello, per il loro impegno, per la loro pazienza e per essere stati presenti in tutti questi anni.

Ringrazio la mia seconda famiglia “gli einauditi” per avermi fatto trascorre un anno memorabile.

Ringrazio Bruno per avermi fatto conoscere i bellissimi paesaggi piemontesi.

Ringrazio ancora gli amici “di sempre”, Lale, Simo e Ele, sulle quali so di poter sempre contare.

Desidero ringraziare infine, non per importanza, Anto per essere sempre presente, per le risate e i momenti di felicità che ho condiviso in questi anni.

360700

360750

360800

360850

4785400

4785400

4785350

4785350

4785300

4785300



Ortofoto aerea da Dji Phantom 4
[Tolentino(MC)]

scala 1:500

WGS 84/UTM zone 33N ETRF 200

360700

360750

360800

360850

360700

360750

360800

360850

4785400

4785400

4785350

4785350

4785300

4785300



LEGENDA

- Vertici GNSS
- Vertici poligonali
- Poligonale
- ♥ Marker artificiali e naturali

Rete topografica
 [Tolentino (MC)]

scala 1:500

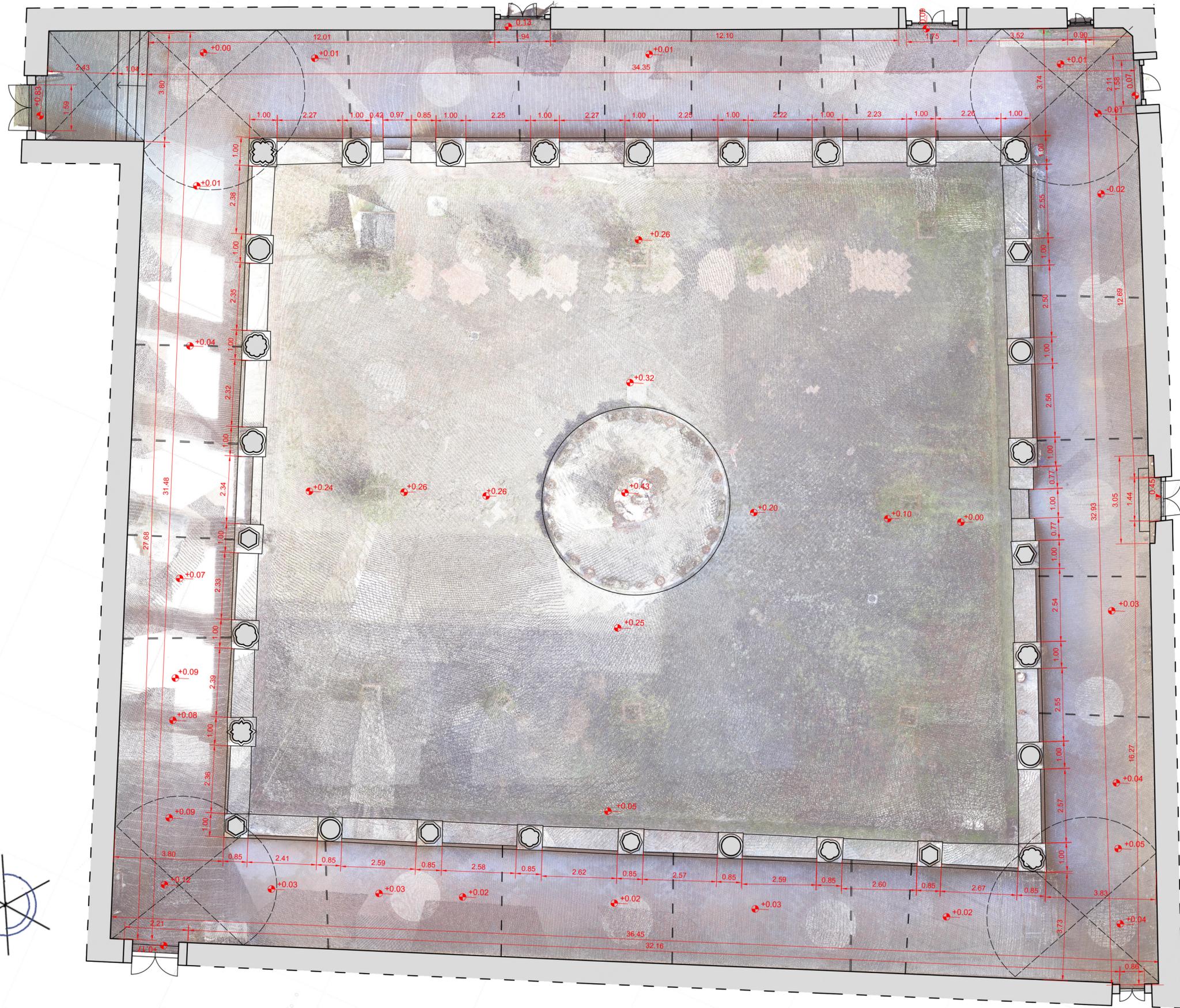
WGS 84/UTM zone 33N ETRF 200

360700

360750

360800

360850



Planimetria chiostro
Elaborato estratto da PointCab e vettorizzato in Cad

scala 1:100

Tav n°3

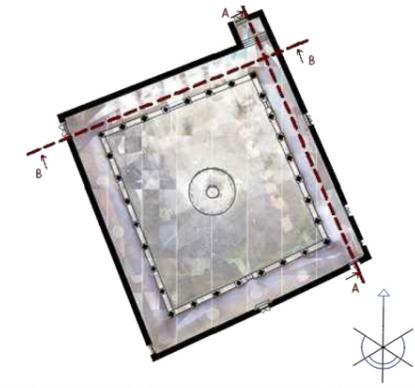


POLITECNICO DI TORINO

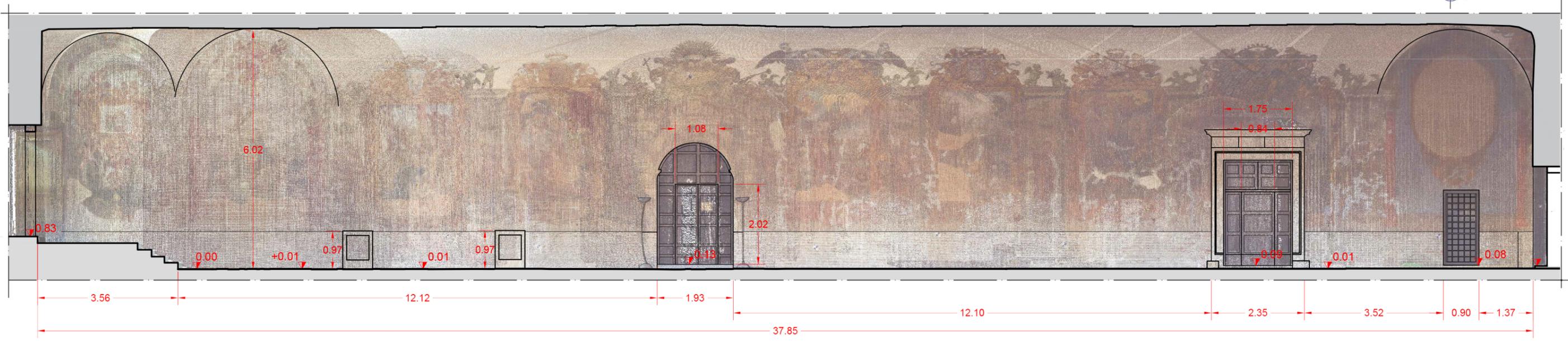
Tẽsi- "Acquisizione multi-sensore del chiostro di San Nicola a Tolentino per il modello parametrico"

Relatore: A. M. Lingua Correlatore: A. Spanò

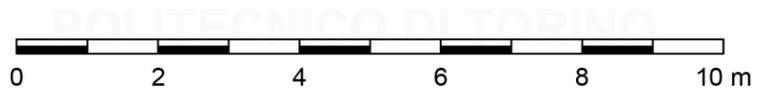
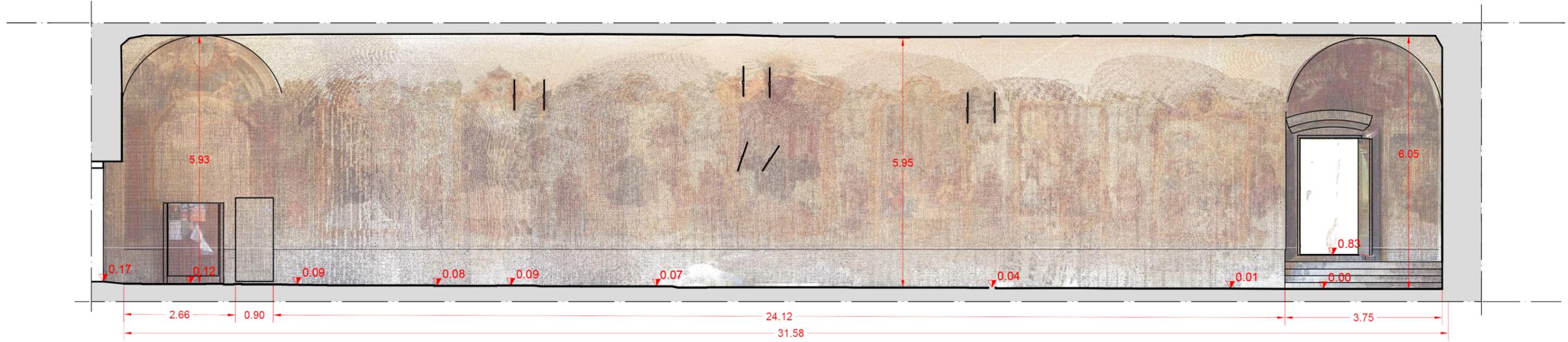
Candidata: R.Stano



Sezione A-A



Sezione B-B

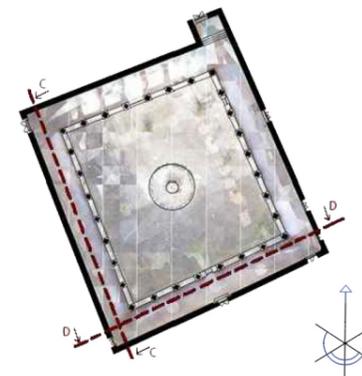


TITOLO POLITECNICO DI TORINO
 Titolo tesi - "Acquisizione multi-sensore del chiostro di San Nicola a Tolentino per il modello parametrico"

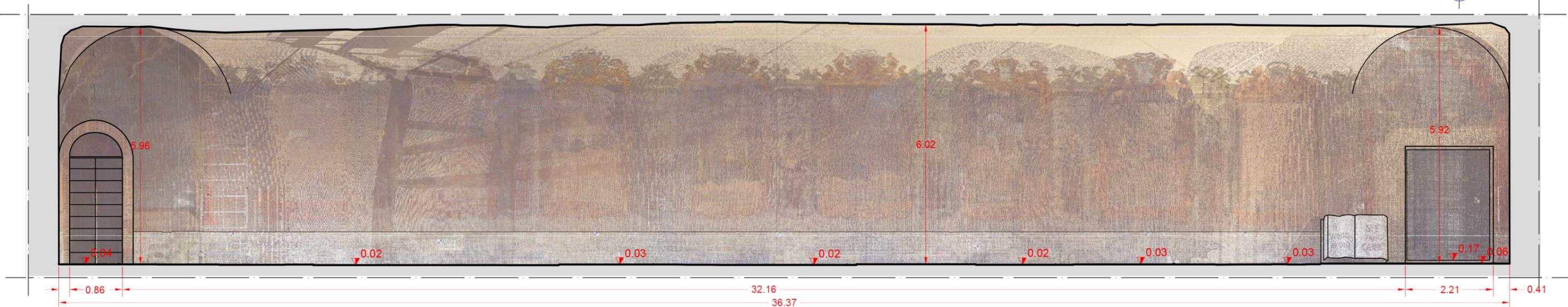
Sezione
 Elaborato estratto da PointCab e vettorizzato in Cad

scala 1:100

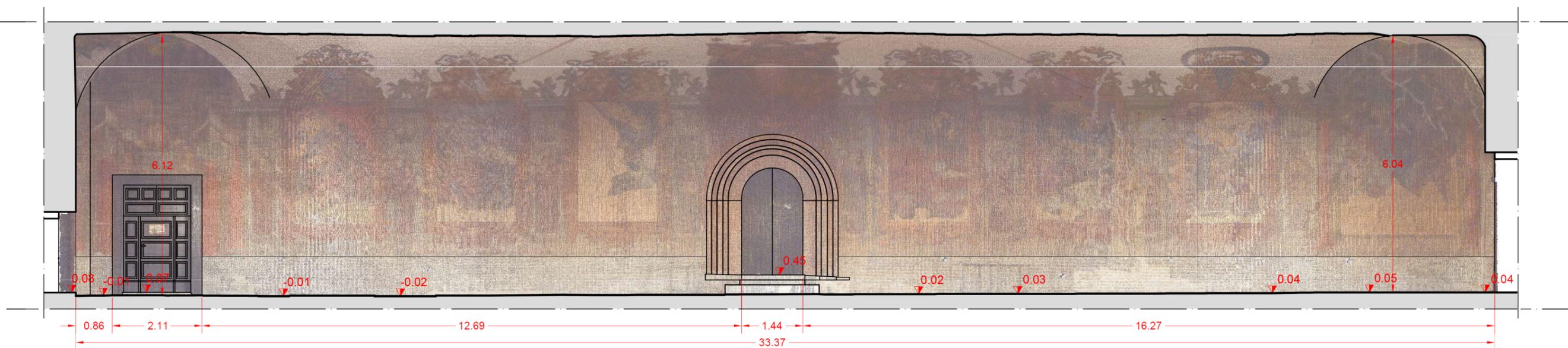
Tav n°4



Sezione C-C

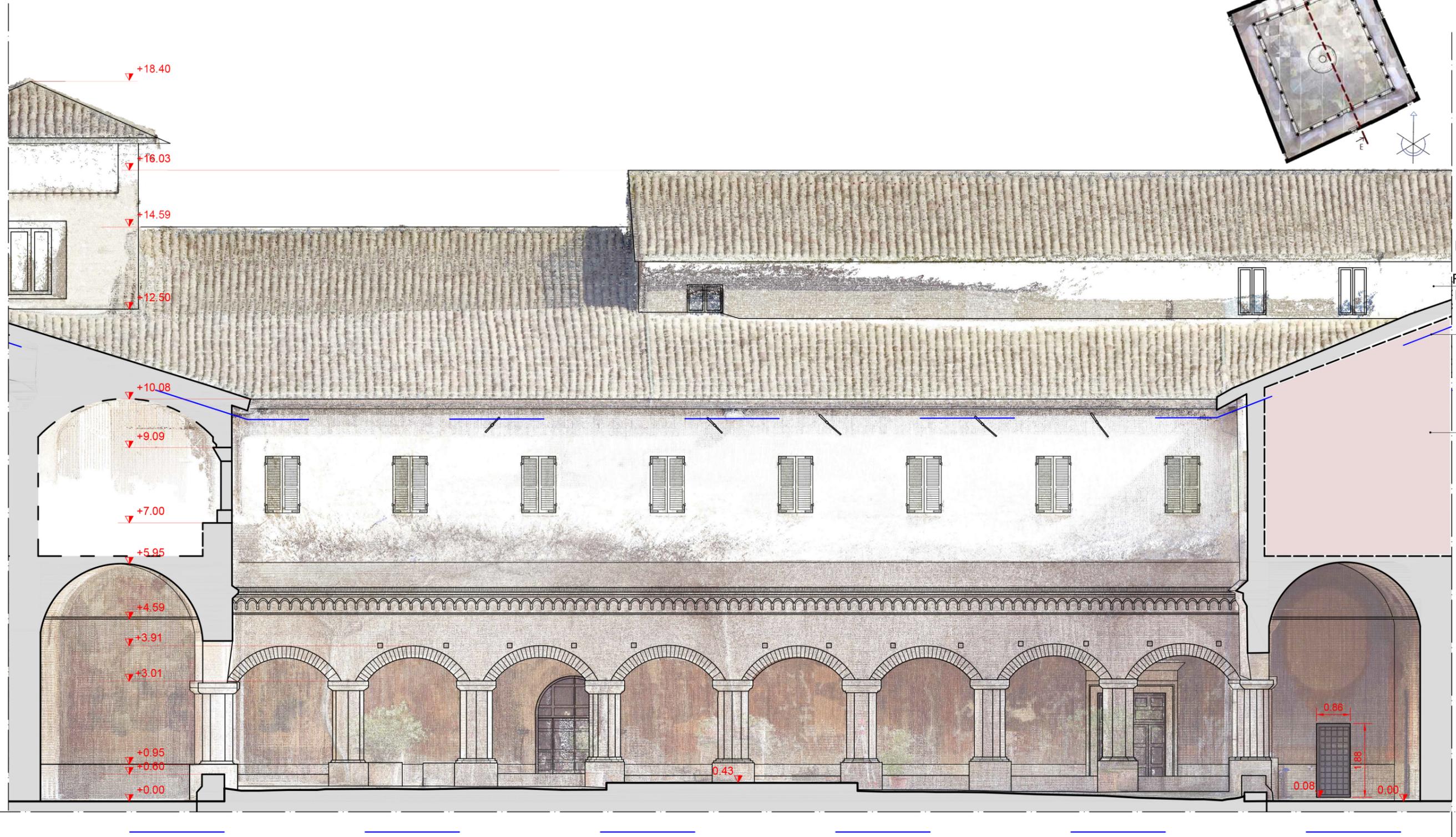
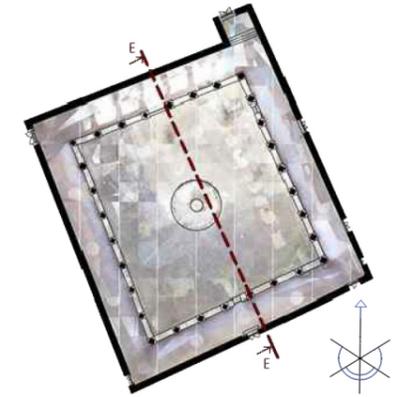


Sezione D-D



Sezione
Elaborato estratto da PointCab e vettorizzato in Cad
scala 1:100
Tav n°5

Sezione E-E



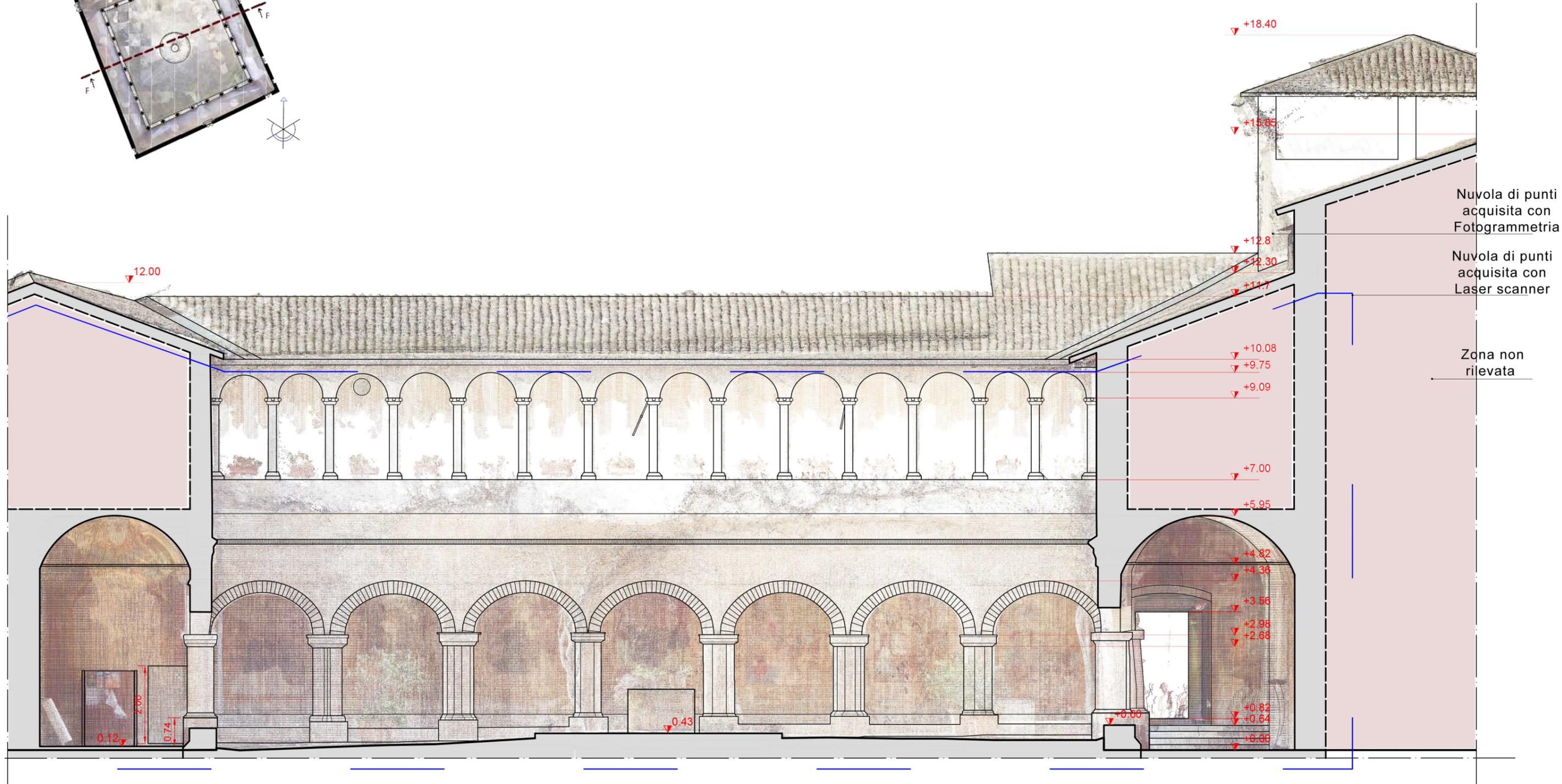
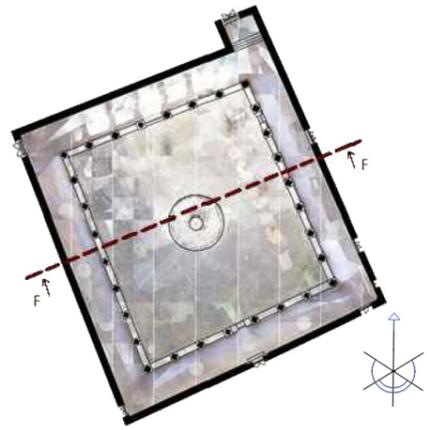
Nuvola di punti
acquisita con
Fotogrammetria
Nuvola di punti
acquisita con
Laser scanner

Zona non
rilevata



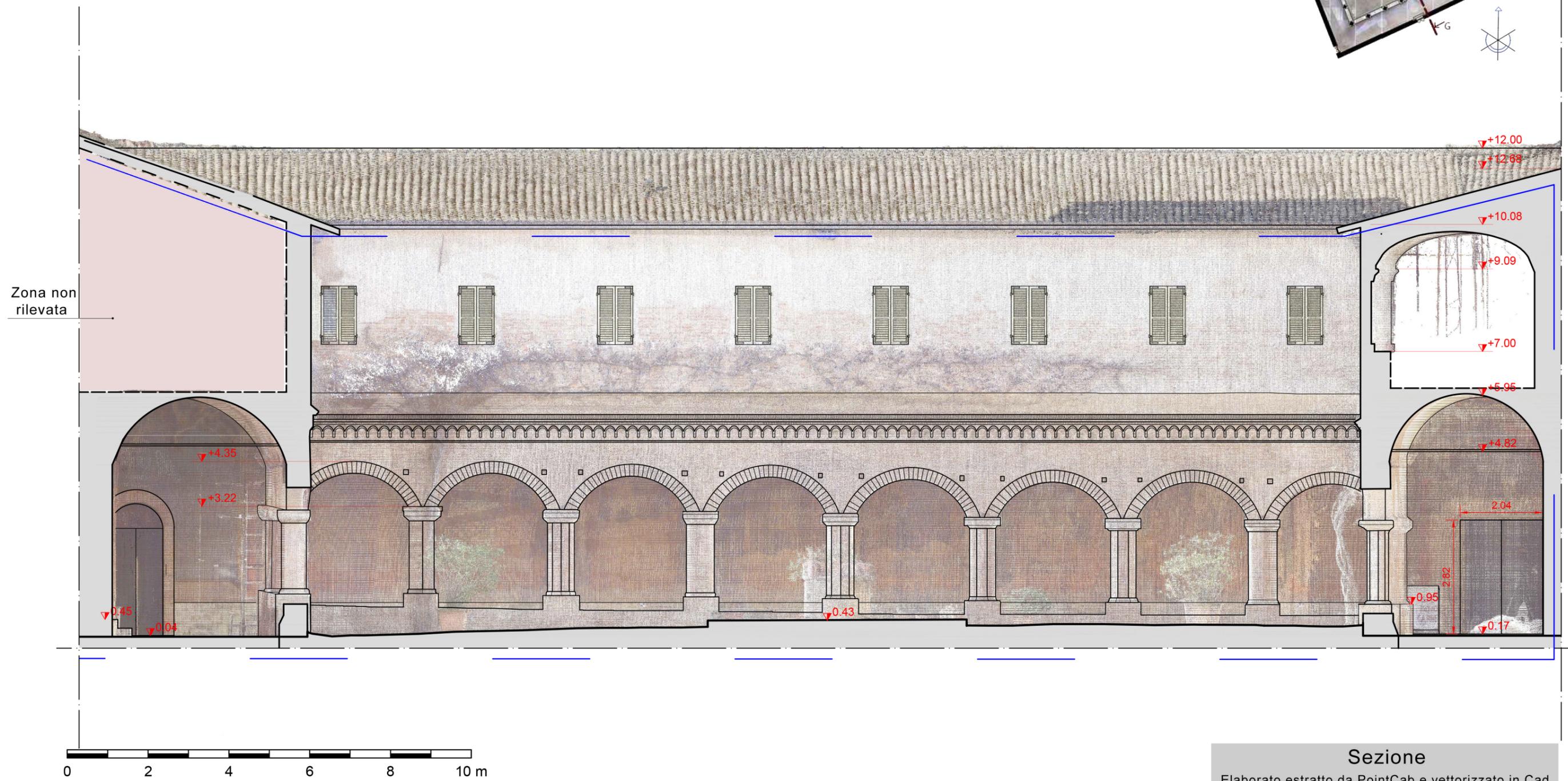
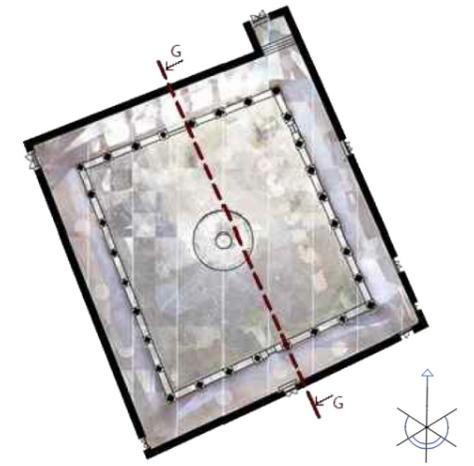
Sezione Elaborato estratto da PointCab e vettorizzato in Cad
scala 1:100
Tav n°6

Sezione F-F



Sezione
Elaborato estratto da PointCab e vettorizzato in Cad
scala 1:100
Tav n°7

Sezione G-G



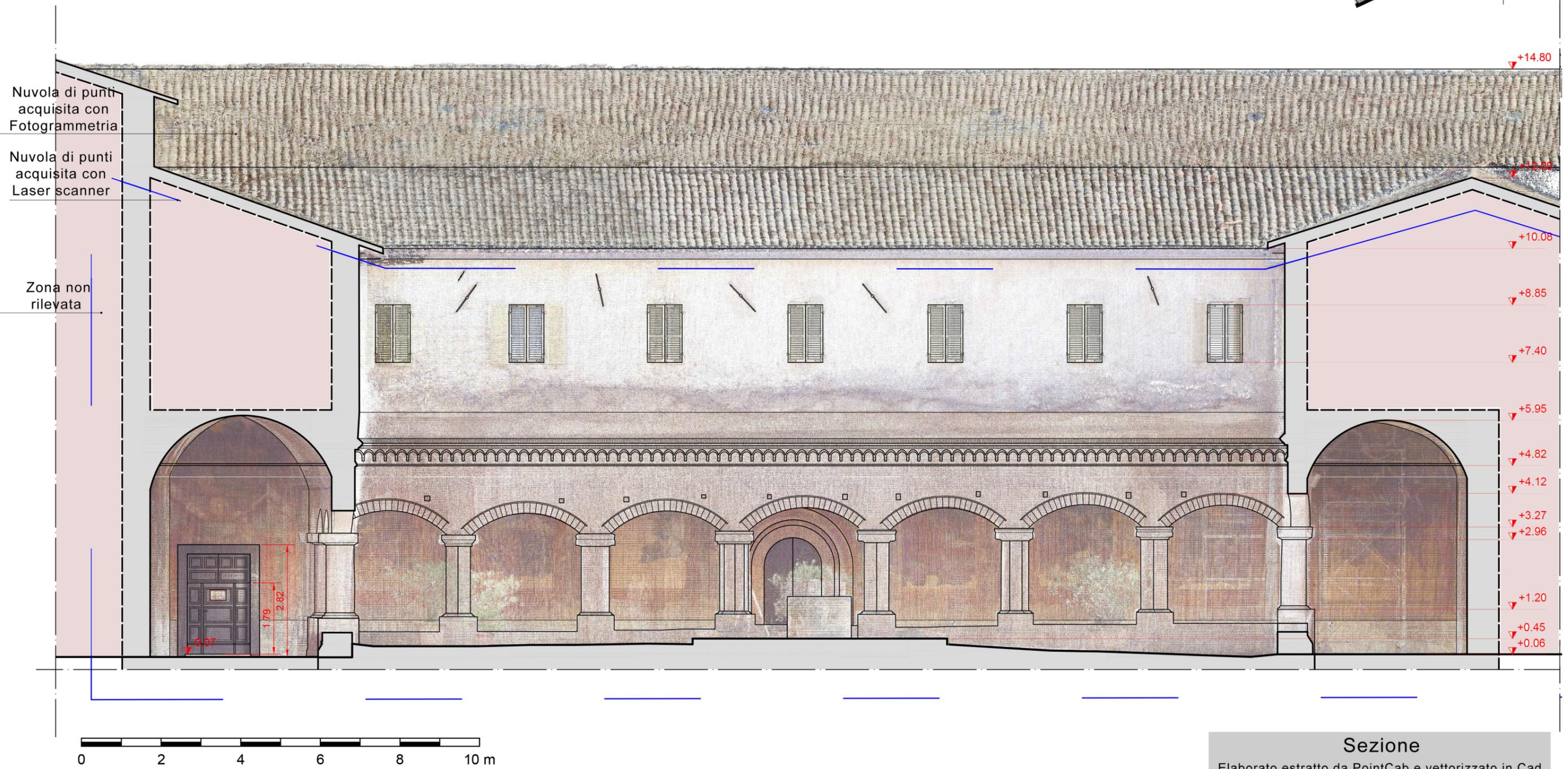
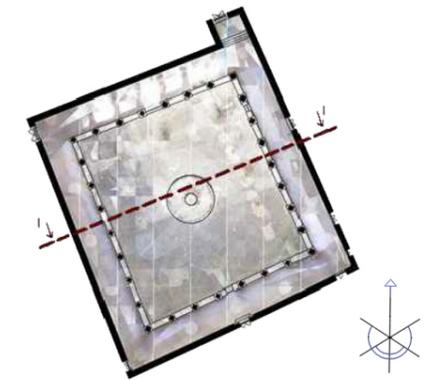
Sezione

Elaborato estratto da PointCab e vettorizzato in Cad

scala 1:100

Tav n°8

Sezione I-I



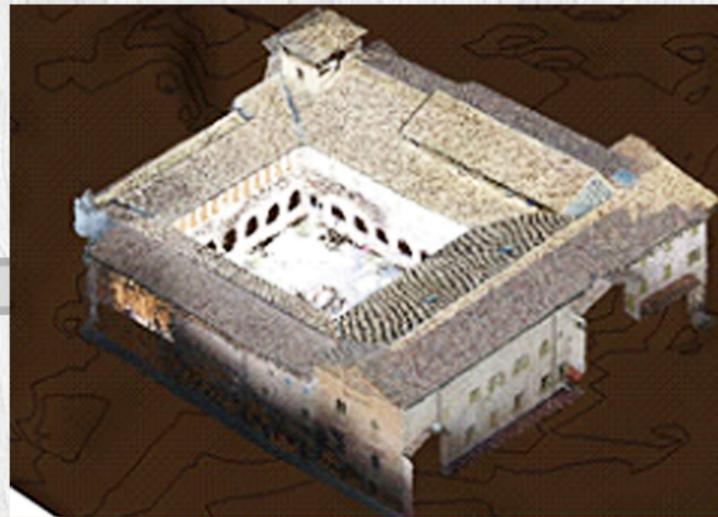
Sezione
Elaborato estratto da PointCab e vettorizzato in Cad
scala 1:100
Tav n°9

LOD G.01



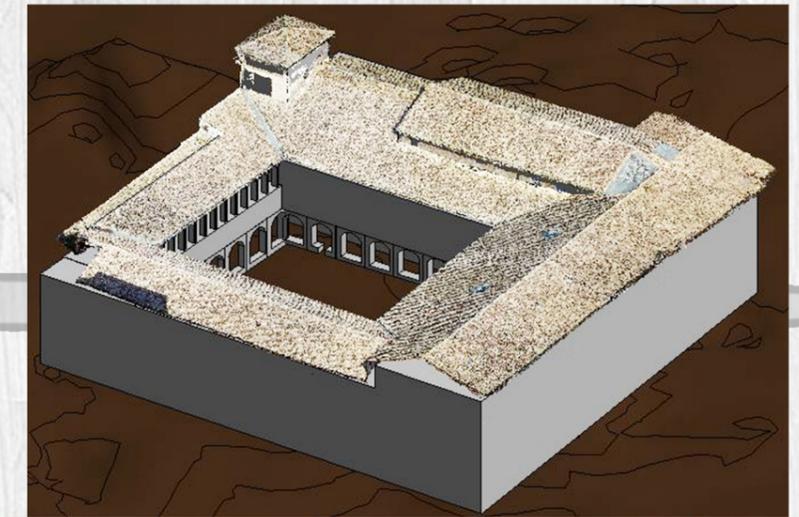
Livello corrispondente alla fase di rilievo condotta con diverse tecniche, quali fotogrammetria con UAV e laser scanner.

LOD G.02



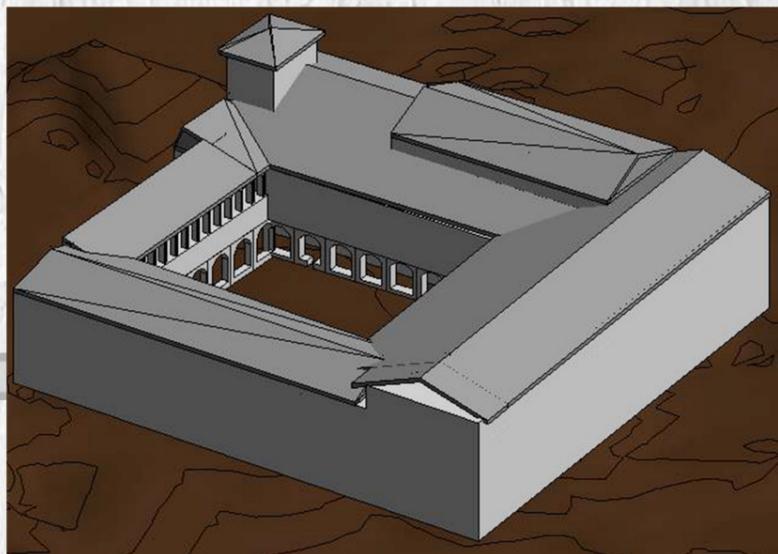
Il livello include la modellazione della topografia a partire da nuvola di punti o curve di livello.

LOD G.03



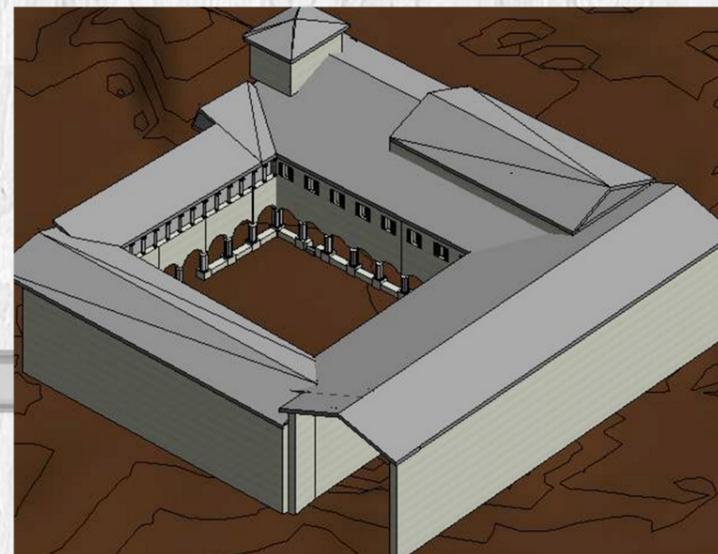
Il livello comprende gli edifici rappresentati da semplici masse, senza la geometria delle coperture.

LOD G.04



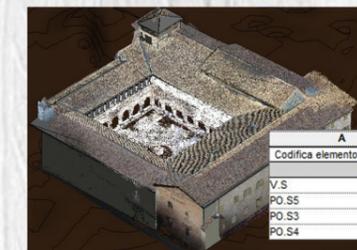
Il livello include gli edifici rappresentati da semplici masse con la modellazione della geometria delle coperture.

LOD G.05



Livello comprende l'edificio modellato nel dettaglio, tutti gli elementi sono noti.

LOD G.06



A	B	C	D
Codifica elemento strutturale	Denominazione del bene	Elementi di pregio storico	Ispesioneabilità
V.S	Basilica e Chiostro di San	Affreschi barocchi es	Ispesioneabile
PO.S5	Basilica e Chiostro di San	Elementi ceramici	Parzialmente ispezionabile
PO.S3	Basilica e Chiostro di San	Elementi ceramici	Parzialmente ispezionabile
PO.S4	Basilica e Chiostro di San	Elementi ceramici	Parzialmente ispezionabile

E	F	G
Materiale	Morfologia	Periodo di realizza
Portante in laterizio	Setto continuo	XIII-XIV secolo
Intradosso intonaco, Fronte Mattoni, Retro Intonac	Arco ribassato ad un centro	XIII-XIV secolo
Intradosso intonaco, Fronte Mattoni, Retro Intonac	Arco ribassato ad un centro	XIII-XIV secolo
Intradosso intonaco, Fronte Mattoni, Retro Intonac	Arco ribassato ad un centro	XIII-XIV secolo

A	B	C	D	E
Codifica elemento struttura	Denominazione del bene	Elementi di pregio storico	Ispesioneabilità	Materiale
V.S4	Basilica e Chiostro di San Nicola	Nessuno	Ispesioneabile	Portante in laterizio
V.S5	Basilica e Chiostro di San Nicola	Nessuno	Ispesioneabile	Portante in laterizio

E	F	G	H
Materiale	Periodo di realizzazione	Orientamento	Morfologia
Portante in laterizio	XIII-XIV secolo	Sud	Colonna a sezione poligonale, a fiore con 6 lati
Portante in laterizio	XIII-XIV secolo	Sud	Colonna a sezione esagonale

Il livello prevede l'associazione di dati e informazioni al modello, con la creazione di un database.

Livelli di sviluppo

Procedimento eseguito per la modellazione HBIM

Normativa: UNI 11337/4

Tav n°10

