

POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Rapid mapping multiplatforma per rilievi 3D post
emergenza. Le analisi della Torre degli Smeducci a San
Severino Marche.

Candidato:

Stefano Persico

Relatore:

prof. Andrea Maria Lingua

Co-relatore:

arch. Filiberto Chiabrando

Ottobre 2017

Ad Andrea

*“Vuoi essere un grande? Comincia con l’essere piccolo.
Vuoi erigere un edificio che arrivi fino al cielo?
Costruisci prima le fondamenta dell’umiltà.”*

Aurelio Agostino d'Ippona

INDICE

Introduzione.....	1
1. San Severino Marche	5
1.1. I primi insediamenti.....	6
1.2. Invasioni barbariche e periodo medioevale.....	9
1.3. Novecento e i giorni nostri.....	11
1.4. Monumenti e architetture di interesse culturale.....	13
1.4.1. Abbazia di San Lorenzo in Doliolo.....	13
1.4.2. Piazza del Popolo.....	13
1.4.3. Teatro Feronia.....	14
1.4.4. Castello medioevale.....	14
1.4.5. Duomo Vecchio.....	14
1.4.6. Concattedrale di Sant'Agostino (Duomo Nuovo).....	15
1.4.7. Ulteriori monumenti ecclesiastici.....	16
1.5. Il caso studio: la Torre Civica o "Torre degli Smeducci".....	17
2. Tecniche e tecnologie per il rilievo 2D e 3D	23
2.1. Rilievo fotogrammetrico.....	25
2.1.1. Definizione di fotogrammetria.....	25
2.1.2. Classificazione della fotogrammetria.....	27
2.1.3. Il fotogramma.....	28
2.1.4. L'orientamento interno ed esterno della camera da presa	28
2.1.5. Il modello stereoscopico.....	30
2.1.6. Fondamenti analitici: equazioni di collinearità.....	31
2.1.7. Distorsioni delle camere da presa e calibrazione.....	33
2.1.8. <i>Ground Sample Distance (GSD)</i>	35
2.1.9. La precisione della fotogrammetria.....	36
2.1.10. Fasi del processo fotogrammetrico.....	39

2.1.11. Risultati della fotogrammetria: modelli altimetrici numerici e Ortofoto.....	45
2.2. Computer Vision e Structure from Motion.....	48
2.2.1. Definizione di <i>Structure from Motion</i>	50
2.2.2. Geometria della formazione dell'immagine.....	51
2.2.3. Calibrazione della camera: matrice di proiezione prospettica	52
2.2.4. Geometria epipolare.....	56
2.2.5. <i>Feature extraction</i> e <i>image matching</i>	58
2.2.6. Allineamento, collimazione e <i>bundle adjustment</i>	63
2.2.7. <i>Dense Image Matching (DIM)</i>	65
2.2.8. Procedura <i>SfM</i> e prodotti finali.....	67
2.3. Rilievo tramite tecnica <i>Laser Scanner</i>.....	68
2.3.1. Il <i>LASER</i> : cenni storici e principi di funzionamento.....	68
2.3.2. Caratteristiche del <i>LASER</i> e sue classificazioni.....	70
2.3.3. Campi di applicazione del <i>Laser Scanner</i>	72
2.3.4. Il <i>Laser Scanner</i> terrestre: principi di funzionamento e classificazione.....	73
2.3.5. Problematiche legate ai sistemi <i>TLS</i>	77
2.3.6. Procedure esecutive di un rilievo con <i>Laser Scanner</i> terrestre	78
2.4. Rilievo tramite tecnica <i>SLAM</i>.....	83
2.4.1. Tecnica <i>SLAM</i> con sensore <i>Laser</i>	86

3. Acquisizione dei dati 89

3.1. Materializzazione delle reti topografiche.....	90
3.1.1. Rete principale di inquadramento.....	90
3.1.2. Rilievo di dettaglio.....	91
3.1.3. Monografie.....	92
3.2. Rilievo fotogrammetrico da <i>UAV</i> del colle Monte Nero....	94
3.2.1. Volo <i>SenseFly eBee</i>	94
3.2.2. Volo <i>Dji Phantom4</i>	96
3.3. Rilievo della Torre degli Smeducci.....	97

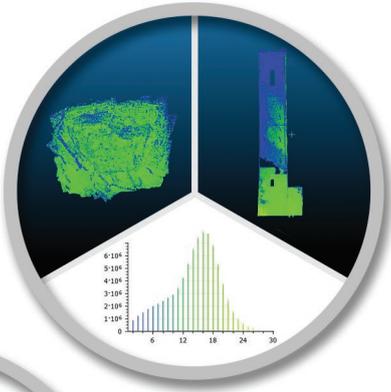
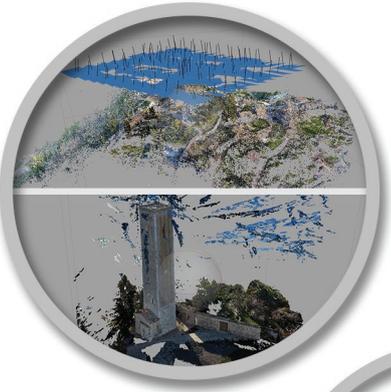
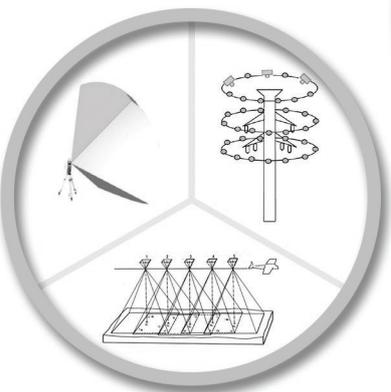
3.3.1. Rilievo di dettaglio con metodo celerimetrico.....	97
3.3.2. Fotogrammetria da <i>UAV</i>	99
3.3.3. Fotogrammetria terrestre.....	100
3.3.4. Rilievo con <i>Laser Scanner</i>	101
3.3.5. Rilievo con tecnica <i>SLAM</i>	103

4. Elaborazione dei dati **107**

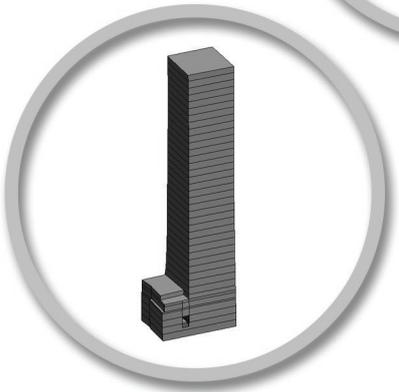
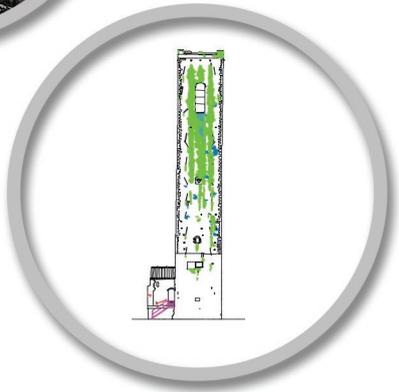
4.1. Scala urbana: elaborazioni fotogrammetriche dei dati	
acquisiti da <i>UAV</i> del colle Monte Nero.....	108
4.1.1. Elaborazione dati con <i>Agisoft Photoscan</i>	109
4.1.2. Elaborazione dati con <i>Pix4D Mapper</i>	121
4.1.3. Elaborazione dati con <i>Visual SFM</i>	132
4.2. Scala architettonica: elaborazioni fotogrammetriche dei dati	
acquisiti da <i>UAV</i> della Torre degli Smeducci.....	139
4.2.1. Elaborazioni dati con <i>Agisoft Photoscan</i>	139
4.2.2. Elaborazioni dati con <i>Pix4D Mapper</i>	147
4.3. Scala architettonica: elaborazioni fotogrammetriche dei dati	
acquisiti con tecnica terrestre della Torre degli Smeducci	152
4.3.1. Elaborazione dati con <i>Agisoft Photoscan</i>	152
4.3.2. Elaborazioni dati con <i>Pix4D Mapper</i>	157
4.4. Scala architettonica: elaborazione dei dati acquisiti con	
<i>Laser Scanner</i>	162
4.4.1. Elaborazione dati con <i>Faro SCENE</i>	163
4.4.2. Caricamento delle scansioni.....	163
4.4.3. Collimazione dei <i>marker</i>	164
4.4.4. Inserimento delle coordinate dei <i>marker</i>	166
4.4.5. Registrazione delle scansioni.....	166
4.5. Considerazioni qualitative dell'elaborazione dei dati	
della Torre degli Smeducci.....	170

4.6. Esportazione dei dati.....	172
5. Analisi dei dati	175
5.1. Pulizia delle nuvole di punti.....	176
5.2. Analisi della densità.....	177
5.2.1. Analisi della densità delle nuvole di punti del colle Monte Nero.....	179
5.2.2. Analisi della densità delle nuvole di punti della Torre degli Smeducci.....	183
5.2.3. Confronto della densità tra il caso a scala urbana e quello a scala architettonica.....	193
5.3. Analisi della precisione.....	194
6. La restituzione grafica 2D	209
6.1. Restituzione dei prospetti.....	210
6.2. Restituzione delle sezioni.....	211
6.3. Restituzione delle piante.....	215
6.4. Mappatura dello stato di degrado per un ipotetico studio del restauro.....	216
6.4.1. Le mappature del degrado.....	217
6.4.2. Analisi dei principali materiali e dei sistemi costruttivi della Torre.....	219
6.4.3. Approccio seguito per la mappatura delle patologie di degrado.....	223
7. La restituzione grafica 3D	229
7.1. La metodologia <i>BIM</i>	230
7.2. La metodologia <i>HBIM</i>	232
7.3. I <i>LOD</i>	233

7.4. Il <i>software</i> parametrico <i>Autodesk Revit</i>	237
7.5. La costruzione del modello tridimensionale.....	239
7.5.1. Restituzione della muratura.....	240
7.5.2. Restituzione delle coperture.....	245
7.5.3. Restituzione della sommità.....	246
7.6. <i>HBIM</i> : mappatura delle patologie di degrado.....	248
7.7. <i>HBIM</i> : <i>surface analysis</i>	252
Conclusioni.....	255
Bibliografia.....	261
Sitografia.....	267
Allegati.....	271



INTRODUZIONE



L'Italia coniuga la più alta percentuale al mondo di beni culturali registrati nel patrimonio Unesco, circa il 5%, con una delle più alte percentuali di numero e intensità di terremoti verificatisi nel corso degli ultimi due anni. Il 40% della popolazione nazionale vive in zone a rischio terremoto, nelle quali solo il 36% del patrimonio edilizio è stato progettato e costruito secondo normative antisismiche le quali, generalmente, vengono emanate in seguito al verificarsi dell'evento.

Il nostro Paese presenta una storia in materia di regolamentazione sismica "troppo giovane", essendo iniziata solo nel 1971 con la *Legge 1086* e momentaneamente terminata nel 2015 con l'estensione, "troppo tardiva", del titolo di zona sismica all'intero suolo italiano.

Dal 24 Agosto 2016 al 18 Gennaio 2017 il Centro Italia è stato interessato da una molteplicità di eventi sismici, con scosse di terremoto fino a 6,5 magnitudo, che hanno causato un totale di 303 vittime e il crollo di intere frazioni e comuni come Arquata del Tronto, Accumoli e Amatrice.

Il patrimonio culturale di questi e molti altri comuni è andato totalmente o parzialmente perduto o ha subito ingenti danni nella propria forma e struttura, compromettendo a volte la funzionalità (per esempio la Basilica di San Benedetto a Norcia).

Sulla base di queste premesse si inserisce la presente tesi, frutto delle campagne di rilievo intraprese a Tolentino e a San Severino Marche nelle Marche, dal 20 al 24 di Febbraio 2016 dal Team studentesco *DIRECT (Disaster REcovery Team)*, nato nel 2011 per iniziativa di studenti e docenti del Politecnico di Torino dell'area di architettura (*DAD, Dipartimento di Architettura e Design*) e ingegneria (*DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture*), specializzato in acquisizioni speditive in condizioni di emergenze ambientali.

Il caso studio è la Torre Comunale, o degli Smeducci, situata in frazione Castello a San Severino Marche, sulla sommità del colle Monte Nero. Il monumento subì ingenti danni in precedenti eventi sismici, tanto da apparire pendente verso sud - ovest (0,9° in direzione ovest e 2,1° in direzione sud). Dopo i sismi del 26 e 30 Ottobre 2016 la struttura esterna e interna presenta nuovi e diffusi dissesti strutturali.

Per inquadrare al meglio il caso studio è stato compiuto in primo luogo un rilievo a scala territoriale del colle Monte Nero (nel quale si inserisce la Torre) con tecnica fotogrammetrica aerea, mediante mezzi non convenzionali a volo autonomo (*Unmanned Aerial Vehicle, UAV*).

Il rilevamento dei dati delle parti esterne della Torre è stato effettuato con metodologia *LiDAR terrestre (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging)* e con tecnica fotogrammetrica terrestre e aerea mediante mezzi *UAV*; quello delle parti interne con tecnica *SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)*. La scelta di tre tecniche di rilevamento è dovuta alla necessità di dover sopperire a problematiche

esistenti come l'elevata altezza della struttura e la presenza di vegetazione ad alto fusto. La fotogrammetria aerea mediante UAV è stata impiegata principalmente per inquadrare accuratamente le parti superiori della torre, quella terrestre per rilevare le superfici inferiori e il *Laser Scanner* per verificare la congruenza dei dati acquisiti.

Il principale obiettivo della tesi è quindi quello di intraprendere un confronto pratico tra differenti tecniche geomatiche per il rilevamento di dati verificandone completezza e celerità ed eseguire per ciascun prodotto realizzato (modelli tridimensionali sotto forma di nuvole di punti) delle analisi di qualità e di precisione.

Ulteriore obiettivo, ma non di secondaria importanza, tenta di comprendere quale tra le diverse tecniche di restituzione grafica 2D e 3D, possa al giorno d'oggi ritenersi la più adatta per la documentazione utile a successivi eventuali interventi di restauro su beni architettonici degradati e per il relativo monitoraggio temporale. Dunque viene eseguita un'analisi inerente allo strumento *BIM (Building Information Modelling)* e ci si interroga su come questa metodologia di trattamento dati possa portare vantaggi applicandola al panorama culturale del costruito (*Historic BIM*). Il tutto viene riferito al caso studio che ha presentato difficoltà in fase di rilievo a causa dei volumi d'ingombro limitrofi alla struttura e problematicità in fase di modellazione parametrica a causa delle geometrie inusuali dettate dalle tecniche costruttive medioevali muri (scarpe) e da mutamenti strutturali avvenuti nel tempo (spanciamenti e pendenze).

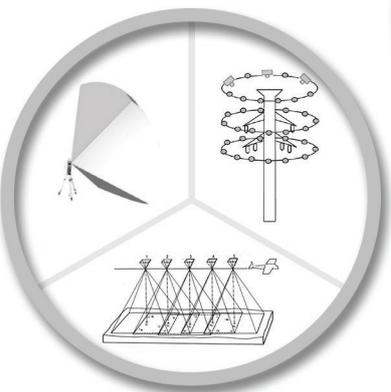
La tesi consta di sette capitoli che la suddividono in quattro differenti parti.

La prima parte riguarda l'inquadramento storico di San Severino Marche e della Torre degli Smeducci.

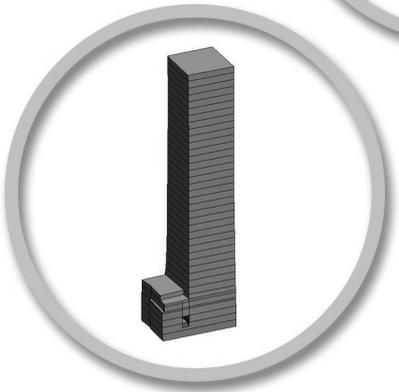
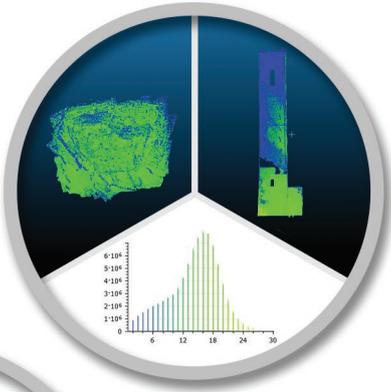
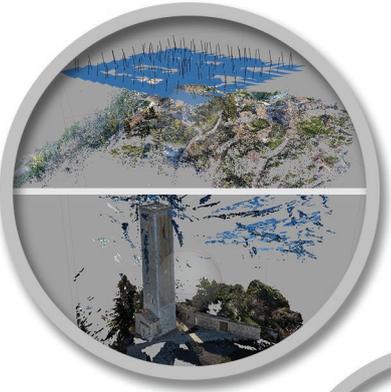
La seconda parte spiega come è stato affrontato il rilievo topografico del colle Monte Nero e del caso studio, evidenziando le strumentazioni, le tecniche e le tecnologie utilizzate, spiegandone i principi scientifici e le formulazioni teoriche.

La terza parte riguarda l'elaborazione e l'analisi dei dati derivanti dall'acquisizione effettuata sul campo. Questi processi hanno permesso la produzione di differenti *output* a seconda delle necessità dei casi.

La quarta e ultima parte tratta della restituzione grafica 2D con i relativi elaborati consistenti in piante prospetti e sezioni e di quella 3D portata a termine sviluppando un modello *HBIM* a partire dagli *output* delle fasi precedenti. Sul modello sono state eseguite le analisi di scostamento dalla nuvola di punti (*surface analysis*) e una mappatura del degrado secondo la norma *UNI 11182/2006*, realizzata preventivamente sulla restituzione dei prospetti.



CAPITOLO 1 SAN SEVERINO MARCHE



1.1. I primi insediamenti

San Severino Marche è un comune italiano in provincia di Macerata nelle Marche. Geograficamente sorge ai piedi dell'Appennino umbro-marchigiano, dista 50 km a ovest del mare Adriatico ed è attraversato dal fiume Potenza e alcuni suoi affluenti.

E' un tipico insediamento di fondovalle sorto dove le acque del fiume Potenza superano la Gola di San Severino, principale punto di sfogo del corso fluviale a causa della presenza della ruga marchigiana mesozoica e del Monte San Vicino distante una decina di chilometri dal territorio comunale¹.



*Figura 1: San Severino Marche, vista del centro storico sul colle del Monte Nero.
Fonte: <http://www.villarosetta.marche.it/dintorni.html>*

Le prime testimonianze storiche raccolte sul suolo comunale furono oggetti e utensili che interessano epoche storiche che vanno dal paleolitico all'età del bronzo. Pertanto ritrovamenti archeologici verificatisi durante l'intero corso del Novecento hanno permesso di individuare una popolazione del territorio comunale già in età preromana, probabilmente Piceni, popolo che assieme ai Petruzi e i Liburni insediavano stabilmente l'intera area del Piceno tra i secoli IX e III a.C.²

Tra le zone archeologiche più interessate dalle scoperte vi sono la frazione di Pitino³ a nord-est dell'abitato attuale e le necropoli picene rinvenute sulla sommità del Monte penna e in località Frustellano. I reperti ritrovati, quali armi, ceramiche di manifattura greca e vasellame eneo, arrivavano nel Piceno seguendo percorsi che collegavano la

¹ http://www.treccani.it/enciclopedia/san-severino-marche_%28Enciclopedia-Italiana%29/.
Ultima consultazione 21/09/2017.

² M. MORETTI, *I Piceni a Pitino*, in *Miscellanea Septempedana*, Severino Marche, 1976.

³ G. ANNIBALDI, *La necropoli picena di Pitino di San Severino*, in *Ricerche sull'età romana e preromana nel maceratese. Atti del IV Convegno del Centro di Studi Storici Maceratesi*, San Severino 1968, Macerata, 1970.

costa adriatica con l'Etruria interna e tirrenica, tramite i valichi appenninici e le vallate fluviali della regione medio-adriatica⁴.

Nel 268 a.C. in seguito alle conquiste della monarchia romana nel territorio picenese sorge Septempeda, primo centro abitato a cui devono il proprio nome gli abitanti di San Severino Marche. Nel quadro della frequentazione protostorica del territorio, l'insediamento di epoca romana va considerato il momento finale di un'aggregazione umana che da tempo si andava consolidando nella zona.

Le opere di scavo del 1971 hanno messo in luce un settore di necropoli del III secolo a.C. con tombe a inumazione sulle quali risultano insistere tratti della cinta muraria di epoca successiva.

Il centro urbano fu forse in origine un *Oppidum*, divenuto già nel III secolo un *Conciliabulum* e successivamente *Municipium*⁵ ascritto alla tribù Velina, retto da *Duoviri*⁶.

La parziale sovrapposizione della cinta muraria d'epoca romana alla necropoli, permette di pensare a una prima fase di aggregato più contenuto rispetto all'estensione della città cinta da mura nel II-I secolo a.C. A questa epoca si può oggi riferire la struttura in *opus quadratum*⁸ simile a quelle di *Pisaurum* e di *Auximum*, le attuali città di Pesaro e Osimo⁹. Il forum della città viene genericamente ubicato nei pressi della chiesa di Santa Maria della Pieve, a nord - est dell'attuale centro abitato, dove nel 1989 a seguito di un'indagine archeologica, fu portata alla luce un tratto della via urbana.

La strada, indagata nel punto in cui incontrava ortogonalmente un'altra arteria cittadina, è realizzata con grossi basoli e presenta parte delle crepidine ancora intatte.

La Via Flaminia Prolaquense, che con direzione ovest - est corre parallela al letto del fiume Potenza, ha costituito il *decumanus maximus* della città che, dividendo lo spazio

⁴ <https://quintaregio-picenum.it/gg/Septempeda.htm>. Ultima consultazione 21/09/2017.

⁵ I Latini chiamavano *Oppidum* un agglomerato urbano fortificato privo di un confine sacro, il pomerio, proprio invece dell'urbe. Il *Municipium* era una vera e propria città assoggettata a Roma e sottoposta a oneri; con la sottomissione si perdeva la propria sovranità, senza partecipazione ai diritti politici di Roma. Il *Conciliabulum* era una frazione dipendente dal *Municipium* o dalle prefetture.

⁶ Le tribù dell'antica Roma erano originariamente raggruppamenti sociali in cui erano suddivisi i cittadini romani. Originariamente individuate su base gentilizia, in epoca Regia si trasformarono in suddivisioni territoriali. La tribù Velina, di matrice territoriale rurale, fu creata nel 241 a.C. lungo la costa adriatica. I *Duoviri* o *Duumviri* erano magistrati dell'antica Roma, eletti in coppie per ragioni di reciproco controllo e consiglio, allo scopo di soprintendere a pubblici uffici o delicati incarichi politici e amministrativi.

⁷ http://www.italiapedia.it/lab/territorio/territorio.php?com=043047_Storia.

Ultima consultazione 21/09/2017.

⁸ In Italiano la struttura viene detta *opera quadrata*; è una tecnica di costruzione della Roma antica, che consiste nella sovrapposizione di blocchi squadrati in forma parallelepipedica e di altezza uniforme, che vengono messi in opera in filari omogenei con piani di appoggio continui.

⁹ http://www.archeologiamacerata.sinp.net/siti_potenza/testi/septempeda.html. Ultima consultazione 21/09/2017.

urbano in due aree ben definite, pianeggiante quella sud e in leggero declivio quella nord, ne ha definito e condizionato l'impianto urbanistico¹⁰.

L'area occupata dalla città è oggi delimitata in gran parte dalle mura urbane, realizzate in grossi blocchi d'arenaria, che con un percorso in parte irregolare che si adatta alla conformazione del pendio, contorna un'area che dal terrazzo del I ordine¹¹ sul fiume Potenza, sembra abbracciare la cresta delle prime colline che occupano il terrazzo di IV ordine¹².



Figura 2: Tracciato della via urbana a nord della chiesa di Santa Maria della Pieve. San Severino Marche. Immagine tratta da M. Landolfi, *Ricerche nel sito dell'antica Septempeda*.

Tra i monumenti più importanti ancora visibili, oltre i tratti delle stesse mura urbane in opera poligonale e pietra arenaria, attualmente perlopiù interrate, va senz'altro annoverata la porta orientale dell'abitato: riportata alla luce dagli scavi regolari condotti tra il 1922 ed il 1926, è costituita di due torrioni circolari di 8 metri di diametro, distanti tra loro 30 metri, impostati sulla cinta muraria e uniti all'interno della porta da due bracci che andavano a formare il fornice¹³. Attraverso la porta passa tuttora la S.S. 361, che quindi ricalca il tracciato viario del diverticolo della Flaminia che toccava Septempeda¹⁴.

¹⁰ M. LANDOLFI, *Septempeda e l'agro septempedano: contributi alla ricostruzione della rete viaria antica, in Le strade nelle Marche. Il problema nel tempo. Atti del Convegno, Fano-Fabriano-Pesaro-Ancona 1984, Ancona, 1987.*

¹¹ Un terrazzo fluviale è una superficie pianeggiante delimitata da scarpate che costituisce l'espressione di episodi più o meno prolungati di erosione da parte di un corso d'acqua. Gli ordini, partendo da una numerazione crescente dal numero "1" ad "n", stabiliscono differenti livelli terrazzi in seguito a fenomeni di sedimentazioni postume al principale processo di erosione.

¹² C. BARBIERI, *Sopra la topografia fisico-medica della città di Sanseverino*, Macerata, 1841.

¹³ M. LANDOLFI, *Septempeda. Il parco archeologico*, San Severino, 1991.

¹⁴ http://spazioinwind.libero.it/popoli_antichi/altro/Septempeda.html.

Ultima consultazione 21/09/2017.

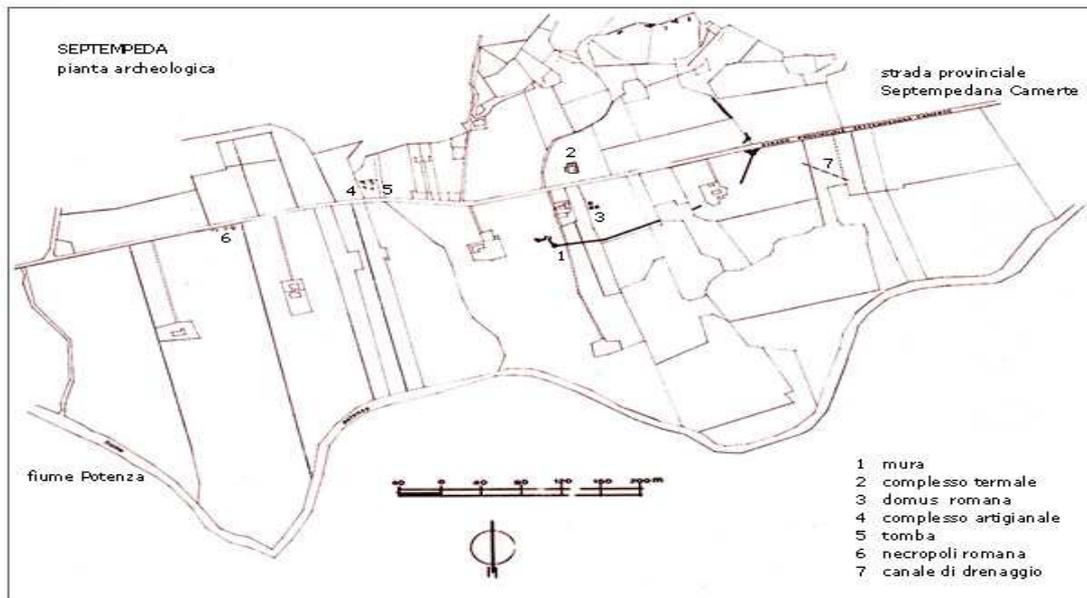


Figura 3: Pianta archeologica del sito di Septempeda.
Fonte: Sito web dei beni archeologici della provincia di Macerata.

1.2. Invasioni barbariche e periodo medioevale

La scoperta archeologica avvenuta nel 1989 risulta importante non solo per la conoscenza diretta dell'assetto urbanistico, ma perché sembra confermare le informazioni circa le ultime fasi di vita dell'abitato. Secondo gli studiosi infatti, la città romana sarebbe stata abbandonata a seguito dell'invasione degli Ostrogoti di Totila, presumibilmente intorno all'anno 545 d.C. e più tardi dei Longobardi. Tale ipotesi troverebbe conferma nel rinvenimento di alcune sepolture tardoantiche che invadono gradualmente la sede stradale, privandola dunque della sua funzione. La fase di abbandono e destrutturazione dello schema viario è datata da due monete d'argento, di cui una ostrogota, mentre la seconda risale ad epoca longobarda e più precisamente al regno di Alboino (circa 560-572 d.C.)¹⁵.

In seguito alla distruzione dell'abitato romano di Septempeda, gli abitanti locali furono costretti a spostarsi sul vicino colle di Monte Nero in direzione sud - ovest¹⁶. Qui fondarono una nuova urbe e costruirono un castello fortificato per meglio ripararsi da eventuali attacchi e assedi che nel corso di tutto l'Alto Medioevo interessarono il territorio centrale della penisola italiana.

¹⁵ B. P. GENTILI, *Dissertazione sopra le antichità di Settempeda, ovvero Sanseverino*, stamperia di Gio Zempel, Monte Giordano, 1742.

¹⁶ Come menzionato da Flavio Biondo e da due iscrizioni settempedane trascritte da Ciriaco di Ancona, due storici vissuti a cavallo tra il XIV e XV secolo.

Fonte: http://www.treccani.it/enciclopedia/sempededa_%28Enciclopedia-dell%27-Arte-Antica%29/.
Ultima consultazione 21/09/2017.

La città ricostruita fu battezzata con il nome di Severino¹⁷, un santo locale di cui si hanno poche notizie certe, vescovo di Septempeda a metà del VI secolo. Le informazioni che si hanno di lui sono derivate da uno scritto chiamato *Vita*, redatto tra il VII ed il IX secolo e ripreso in un rifacimento tardivo che amplia ed arricchisce di episodi l'antico testo a scapito della verità storica¹⁸.

Quanto al nuovo centro, il primo documento credibile della sua esistenza è del 944, anno di probabile fondazione dell'antica cattedrale. Libero comune intorno al 1170, parteggiò costantemente per i Ghibellini.

Nel corso del XIII secolo questioni commerciali spinsero la popolazione a ridiscendere in pianura e a raccogliersi intorno all'attuale piazza centrale. Il centro storico si ingrandì fino all'estensione attuale, in parte per via militare e in parte acquistando i castelli circostanti dai precedenti proprietari¹⁹.

Il Trecento è caratterizzato dalla signoria degli Smeducci e dal suo capostipite Smeduccio Smeducci²⁰, famiglia locale di capitani di ventura, che mantennero con una certa continuità l'egemonia sulla città, finché nel 1426 il Papa li esiliò definitivamente.

Tendenzialmente guelfi, ma spesso opportunisti, gli Smeducci risultarono quasi sempre malvisti dalla popolazione, che si ribellò al loro dominio in più di una circostanza²². Seppero svolgere anche un ruolo di mecenati in quello che rimane il periodo di massima fioritura artistica di San Severino. A loro possono ricondursi la promozione dell'istruzione comunale, invitando a proprie spese maestri forestieri, la decorazione della cappella familiare nella chiesa maggiore nel 1372 e le costruzioni del Duomo e della Torre comunale sul colle del Monte Nero.

¹⁷ Il manoscritto *Vita* racconta la vita di Severino e del fratello Vittorino. I due alla morte dei genitori rinunciarono ad un'esistenza facile ed agiata e si spogliarono di tutti i loro beni per darsi ad una vita di solitudine, preghiera e di penitenza, il primo sul Monte Nero il secondo su un altro colle limitrofo. Severino per la sua fama di santità, morto il vescovo di Septempeda, venne eletto suo successore dal popolo e dal clero, e tale fu ordinato a Roma da Papa Vigilio. Sempre secondo il testo morì un 8 gennaio mentre i Gotti muovevano alla conquista del Piceno.

¹⁸ <http://www.santiebeati.it/dettaglio/90943>. Ultima consultazione 21/09/2017.

¹⁹ D. VALENTINI, *Saggio di bibliografia storica della città di Sanseverino nelle Marche, Sanseverino*, 1875.

²⁰ Esponente principale ed eponimo della famiglia guelfa degli Smeducci, che nel XIV secolo stabilì la propria signoria sulla terra di S. Severino. Non si hanno notizie sull'origine della dinastia, che precisa il suo ruolo nella società locale soltanto nel primo Trecento con la personalità di Smeduccio, nato probabilmente nei primi anni del secolo. Quest'ultimo si segnala durante il pontificato di Giovanni XXII per gli incarichi militari svolti a servizio del papa. Successivamente nel 1359 Urbano V concesse a Smeduccio la custodia della terra di San Severino per la durata di dieci anni. Negli anni Sessanta del Trecento, l'egemonia di Smeduccio e dei suoi figli, che furono associati al governo della città da Urbano V al rinnovo della concessione della custodia, si trasformò in una vera e propria dominazione signorile. Fonte: <http://rm.univr.it/iper/infomatio/pagine/pers14.htm>. Ultima consultazione 21/09/2017.

²¹ G. BARTOLOMMEI, *Didascalia cioè dottrina comica libri tre (1658-1661): l'opera esemplare di un 'moderato riformatore'*. Saggio introduttivo, edizione critica e note di Sandro Piazzesi, Firenze University Press, Firenze, 2016.

²² Nel 1420 i settempedani, nome attribuito agli abitanti di San Severino, tentarono invano di ribellarsi alla famiglia Smeducci, con una congiura capeggiata da Antonio Colucci e soffocata nel sangue.

Assediata dalle truppe pontificie per ordine di papa Martino V, San Severino fu annessa alla Chiesa, per poi essere occupata tra il 1433 e il 1445 da Francesco Sforza²³²⁴.

Dopo il breve governo Sforzesco, il comune passa definitivamente sotto il controllo diretto dello Stato della Chiesa; i secoli successivi registrano un sostanziale declino economico e culturale. Nel 1586 San Severino ottiene il titolo di città e quello di diocesi, mantenuto per quattrocento anni esatti. Nel frattempo, cessate le esigenze di difesa, la popolazione del centro abitato si trasferisce quasi del tutto dal colle a fondovalle, attorno alla vecchia piazza del mercato. Fra la metà del Settecento e l'inizio dell'Ottocento, anche i simboli del potere civile e religioso (Palazzo comunale, Duomo, vescovato) lasciano quella che ormai è una contrada isolata²⁵.

1.3. Novecento e i giorni nostri

La città è attualmente suddivisa in due parti: l'alta o minore, ad un'altitudine di 344 m, che svetta sul colle del Monte Nero, su cui sono posti principalmente il Duomo Vecchio e la poderosa torre Comunale o del Castello, alta 44 m e inclinata; la bassa o maggiore (ad un'altitudine di 238 m), tra il fiume e il piede del colle, intorno alla Flaminia, che su due ponti, immediatamente a valle e a monte di essa, passa dalla sinistra alla destra del Potenza, e ha nel mezzo la vastissima Piazza Vittorio Emanuele con il palazzo civico e uno sviluppo di oltre 500 m di portici²⁶.

Il vastissimo territorio comunale di circa 194,33 km² è composto da movimentati dorsi boscosi di calcare cretaco, di colline mioceniche, di strette piane d'alluvione, con estremi altimetrici che vanno dai 1440 m del versante meridionale del Monte San Vicino ai 160 m del fondovalle del fiume Potenza²⁷.

Notevoli sono le estensioni boschive e agrarie che assieme ad allevamenti di bestiame suino e bovino e di bachi costituiscono parte dell'economia primaria del luogo.

Oltre alle due parti sopracitate in cui si suddivide a sommi capi il centro abitato di San Severino, il Comune è suddiviso in numerose frazioni e borghi tra le quali se ne ricordano in particolare due per importanti trascorsi storici: frazione Elcito e frazione Pitino.

Frazione Elcito si tratta di un piccolo borgo sorto attorno ad un antico castello eretto a difesa dell'Abbadia di Val Fucina e arroccato a 821 m di altitudine alle pendici del Monte San Vicino. A Elcito non c'è mai stato un emporio o un negozio, neppure per i generi di prima necessità perché fino agli anni '70 era una comunità autosufficiente. Contava

²³ G. C. GENTILI, *De ecclesia septempedana libri III*, ex Officina Alessandro Mancini, Macerata, 1838.

²⁴ V. E. ALEANDRI, *L'antico statuto municipale di Sanseverino Marche fatto nel 1426*, Sanseverino, 1890.

²⁵ G. MORONI, *Sanseverino, città vescovile dello Stato pontificio*, Venezia, 1854.

²⁶ http://www.treccani.it/enciclopedia/san-severino-marche_%28Enciclopedia-Italiana%29/.

Ultima consultazione 21/09/2017.

²⁷ idem.

duecento persone e avevano un intenso rapporto con la loro terra, fonte primaria di sussistenza, oggi giorno sono soltanto 12 i residenti stabili.

Frazione Pitino nel 600 a.C. circa fu una delle più importanti località picene dell'area centro italica, se non l'unica, poi federata con Roma. Precedente a Septempeda furono trovati reperti archeologici intatti ed importantissimi, fondamentali per la ricostruzione della storia delle antiche civiltà come scudi, elmi, monili e anfore casualmente ritrovati nei terreni della zona, in tombe arcaiche coperte da poderosi tronchi, e ora custoditi presso il museo archeologico nazionale delle Marche ad Ancona.



Figura 4: Frazione Elcito. Fonte: Stazio Vinicio.

La cittadina, di 12597 abitanti, visse un vero e proprio incremento demografico nei quattro decenni tra il 1910 e il 1950 a discapito del trend che poté esserci in tutta la penisola italiana durante le due guerre mondiali. Il motivo è da ricercarsi nella conformazione geografica del luogo e nella vicinanza agli Appennini dal centro abitato. Questi fattori soprattutto durante la Seconda Guerra Mondiale portarono molte lotte partigiane sui monti limitrofi²⁸²⁹³⁰.

²⁸ La resistenza armata si sviluppò nella zona di San Severino quando si costituì la banda Mario divenuta poi "battaglione I Mario", dal nome del suo comandante Mario Depangher. La banda era costituita prevalentemente da persone provenienti dalla zona, ma anche da numerosi slavi e alcuni abissini, russi, francesi e inglesi. Fonte: http://www.storiamarche900.it/main?p=storia_territorio_sanseverino. Ultima consultazione 21/09/2017.

²⁹ G. PIANGATELLI, *Tempi e vicende della Resistenza a San Severino Marche*, ANPI, Macerata, 1985.

³⁰ C.C.C.V.R. (a cura di), *La Resistenza in San Severino Marche (8 settembre 1943 - 1 luglio 1944)*, Bellabarba, San Severino Marche, 1965.

1.4. Monumenti e architetture di interesse culturale

Negli ultimi decenni, a seguito degli eventi sismici verificatisi, soprattutto a causa di quelli del 2016, il patrimonio dei beni architettonici del comune di San Severino Marche ha subito innumerevoli danni che non possono più essere trascurati. Ricco di storia medievale, il paese presenta monumenti di interesse storico sia nella parte alta sia nella bassa; di seguito vengono elencati i più importanti³¹.

1.4.1. Abbazia di San Lorenzo in Doliolo

I primi documenti che menzionano l'abbazia di San Lorenzo in Doliolo, secondo la tradizione fondata dai monaci benedettini sulle rovine di un tempio pagano dedicato alla dea Feronia, risalgono al XII secolo. L'attuale costruzione è il risultato di rimaneggiamenti avvenuti a più riprese avvenute in epoca basso - medioevale e rinascimentale.

All'esterno spicca la torre campanaria trecentesca addossata alla facciata a capanna, alla cui base si apre il portale romanico, coronata da quattro bifore e da una centina di archetti. La chiesa, a pianta rettangolare, è disposta su tre livelli: la struttura ipogea della cripta, il lungo spazio basilicale e l'abside sopraelevato ad un unico vano. Nel suggestivo interno a tre navate, scandite da possenti colonne, si segnalano dipinti del Pomarancio³² nel catino absidale, mentre nella cripta e nella sagrestia medievali sono visibili frammenti di due importanti cicli di affreschi, riferiti ai santi Andrea ed Eustachio, realizzato dagli illustri artisti settempedani Jacopo e Lorenzo Salimbeni³³.

Oggigiorno a causa del terremoto del 2016 l'abbazia è chiusa al pubblico per inagibilità³⁴.

1.4.2. Piazza del Popolo

È il monumento più vistoso della città, grande piazza porticata dall'insolita forma a fuso, lunga 224 m e larga 55 m. In origine Platea mercati, oggi Piazza del Popolo, fu creata nel Duecento ampliando per scopi commerciali un'arteria stradale che in quel punto costeggiava l'abitato medievale.

Nei secoli è diventata il "salotto buono" della nobiltà, e tuttora i palazzi gentilizi che la circondano esprimono il meglio dell'architettura locale dal Cinquecento ai primi del Novecento, anni in cui venne arricchita da due fontane in travertino.

³¹ D. VALENTINI, *Il forastiere in Sanseverino-Marche, ossia brevi indicazioni degli oggetti di belle arti e altre cose notevoli esistenti in detta città*, San Severino, 1868.

³² Soprannome disambiguo attribuito a tre pittori toscani dell'epoca nati tutti quanti a Pomarance. Il Pomarancio in questione si tratta di Cristoforo Roncalli attivo durante la sua carriera artistica nel territorio del Piceno.

³³ S. SERVANZI COLLIO, *Relazione storica sulla chiesa di S. Lorenzo in S. Severino*, Macerata, 1838.

³⁴ <http://www.turismomacerata.it/it/abbazie/abbazia-di-san-lorenzo-doliolo>.

Ultima consultazione 21/09/2017.

Si affacciano sulla piazza, fra gli altri edifici, il settecentesco palazzo comunale a due piani con facciata in laterizio, costruito nel 1764 su progetto dell'architetto romano Clemente Orlandi; il teatro Feronia e la chiesa di San Giuseppe³⁵.

1.4.3. Teatro Feronia

Il teatro prospettante sulla piazza, è opera dell'architetto settempedano Ireneo Aleandri che lo costruì nel 1827 sulle rovine di un teatro ligneo settecentesco. Se la facciata è modesta e le dimensioni ridotte ricalcano quelle dell'edificio preesistente, la struttura neoclassica dell'interno è di grande qualità. Il sipario rappresenta il rito della liberazione degli schiavi davanti al tempio della dea Feronia³⁶.

1.4.4. Castello medioevale

La cima del Monte Nero è sede della cittadella medievale. Delle antiche costruzioni restano ampi tratti di mura, due porte (Porta delle Sette Cannelle e Porta di San Francesco) e sulla sommità le due torri simbolo della città: quella comunale, o degli Smeducci e opposta ad essa il campanile del Duomo Vecchio.

1.4.5. Duomo Vecchio

Sorge sulla sommità del cosiddetto Monte Nero e custodisce i resti del santo patrono Severino.

Edificato nel 944 e ampliato nel 1061, venne rifatto nel XIII secolo e rimaneggiato più volte.

L'edificio attuale venne eretto nella fine del XIII secolo in stile romanico-gotico e consacrato nel 1304. Tuttavia di quest'epoca si conserva solo la facciata e il bel campanile trecenteschi. Il fronte, a capanna, è aperto da un portale trecentesco a tutto sesto, sormontato da un'edicola trifora con archetti trilobati e da un oculo. Corre in alto una fascia di archetti pensili.

Il poderoso campanile, a base quadrata, presenta la cella campanaria alla sommità aperta da quattro grandi bifore sotto le quali corre un fregio ad archetti trilobati. Addossato alla sinistra della facciata, servì come esempio alla costruzione degli altri campanili nei dintorni.

Alla fine del XV secolo venne aggiunto un chiostro sul lato destro.

Nel 1664 il duomo venne ristrutturato su disegno del frate domenicano Giuseppe da Palermo. L'interno, dal quale si accede attraverso un atrio, venne totalmente rifatto nel

³⁵ L. LOSITO, *San Severino Marche, un gioiello da scoprire*.

³⁶ idem.

1741 quando ricevette la decorazione tardo - barocca a stucchi bianchi su fondo verde e venne realizzato il soffitto a lacunari³⁷.

La costruzione principale ha una pianta basilicale a navata unica, con cappelle laterali e un pregiato coro ligneo rinascimentale di forma quadrata iniziato dall'intagliatore locale Domenico Indivini e completato dai fratelli Acciaccaferrri nel primo Cinquecento.

Nella cappella ricavata sotto la torre vi erano resti di affreschi delle Storie di San Giovanni Evangelista, eseguiti da Jacopo e Lorenzo Salimbeni, i quali dopo il terremoto del 1996, furono traslati alla Pinacoteca comunale.



Figura 5: Duomo Vecchio. Fonte: Guida della Provincia di Macerata.

1.4.6. Concattedrale di Sant'Agostino (Duomo Nuovo)

Sorge nella parte bassa della cittadina più esattamente nel Borgo, vicino a Piazza del Popolo. Eretta nel 1250 sul luogo di una precedente chiesetta dedicata alla Maddalena, è stata più volte rimaneggiata e ampliata. L'interno fu rifatto totalmente nel 1776 in forme del tardo - barocco marchigiane, e nel 1827 la chiesa venne convertita in Cattedrale al posto del Duomo Vecchio.

Oggi è concattedrale dell'arcidiocesi di Camerino - San Severino e conserva della costruzione quattrocentesca la facciata con portale cuspidato adorno di terrecotte e resti di affreschi attribuiti a Lorenzo d'Alessandro, e il campanile di forme analoghe a quelli del Duomo Vecchio, San Lorenzo in Doliolo e San Domenico³⁸.

³⁷ idem.

³⁸ Chiesa risalente al XIII secolo, è stata rifatta in più occasioni. L'interno è seicentesco e la torre campanaria, situata a destra del presbiterio, ospita un ciclo di affreschi con le Storie di Santa Caterina ad

All'interno conserva, tra le altre opere, una notevolissima Madonna del Pinturicchio, un Crocifisso ligneo dell'Acciaccaferri, una tavola dei fratelli Antonio e Giovanni Gentili, figli di Lorenzo d'Alessandro e un quadro del Pomarancio. Il coro e la bussola del tempio vennero disegnati dall'architetto Ireneo Aleandri³⁹.

1.4.7. Ulteriori monumenti ecclesiastici

Tra le altre costruzioni ecclesiastiche, collocate in una posizione periferica rispetto al fulcro cittadino, si ricordano anche⁴⁰:

- *Santa Maria del Glorioso*, situata sulla strada per Cingoli - Apiro, riccamente dipinta, ove la statua lignea raffigurante la Madonna addolorata versò miracolosamente lacrime il 22 aprile 1519.
- *Chiesa di San Rocco*, con artistici quadri, dipinti, statue, sede dell'omonima confraternita.
- *Chiesa di San Giuseppe*, sulla piazza centrale della città, attualmente inagibile a causa di un grosso incendio ivi sviluppatosi nella notte del 31 Dicembre 2009. Chiesa interamente dipinta in maniera eccelsa. Custodisce pregevoli arazzi, quadri, dipinti e statue di elevato valore, fra le quali tre statue lignee, a grandezza naturale, raffiguranti San Giuseppe con Bambino, Cristo morto e Cristo risorto, realizzate dall'artista settempedano Venanzio Bigioli.
- *Chiesa di San Filippo* con artistici quadri, dipinti, bassorilievi e statue.
- *Chiesa di San Paolo*, opera di Ireneo Aleandri del 1830. Possiede un interno ad emiciclo con colonne doriche e semicupola a cassettoni appena accennati con presbiterio rettangolare, e presenta sul portale un bassorilievo raffigurante la Vergine Maria proveniente dalla chiesetta più antica appartenente all'Ordine dei Crociferi. La statua del Santo sul colmo del tetto a padiglione, quasi del tutto erosa dalle intemperie, è attribuita allo scalpello Antonio Rosa, padre dell'importante scultore Ercole Rosa vissuto a fine Ottocento.
- *Santuario della Madonna dei lumi*, costruito il 1° giugno 1586, è un complesso monumentale retto dai monaci cistercensi e sede residenziale attuale dell'abate presidente della Congregazione di San Bernardo d'Italia. Riccamente dipinto presenta pregevoli quadri e numerosi affreschi di ignoti e di altri famosi artisti locali che operavano in epoca rinascimentale nel Piceno. Vi sono anche: un coro ligneo, un ciborio dello stesso materiale e diverse statue lignee di rilievo.

opera di un ignoto maestro trecentesco. Nel 2005, dopo un restauro integrale, è stato riaperto al pubblico il chiostro monumentale di proprietà pubblica dal 1860, anno della confisca dei beni ecclesiastici.

³⁹ https://it.wikipedia.org/wiki/Concattedrale_di_Sant%27Agostino. Ultima consultazione 21/09/2017.

⁴⁰ https://it.wikipedia.org/wiki/San_Severino_Marche. Ultima consultazione 21/09/2017.

- *La chiesetta della Maestà*, quattrocentesca, a due chilometri dal centro abitato, sulla strada per Tolentino, sarebbe stata costruita in seguito ad un miracolo: l'avvistamento di un'immagine dipinta della Vergine Maria. All'interno si trova una serie di cinque affreschi del pittore locale Lorenzo d'Alessandro, dipinti nel nono decennio del XV secolo. Le figure, non del tutto omogenee stilisticamente, presentano nell'insieme una linea fluida e un atteggiamento sereno e composto che rimanda al Rinascimento umbro e fiorentino.
- *La chiesa di Santa Maria del Cesello*, in località Ugliano, è un ambiente rettangolare con un esempio artistico rarissimo di lunghissimo tetto spiovente che ripara un timpano con affresco seicentesco dipinto sulle mura esterne dell'edificio. L'interno è tappezzato di immagini votive dipinte dal Quattrocento al Seicento, artisticamente grezze ma interessanti come testimonianza della devozione popolare.
- *Chiesa di Sant'Eustachio*, anticamente dedicata a San Michele, sorge nell'area delle grotte di Sant'Eustachio, sulla strada per Castelraimondo. Originariamente faceva parte di un complesso monastico di cui rimangono solo alcuni ruderi.
- *Chiesa di Santa Maria delle Pantanelle*, in località Cagnore, con affresco attribuito a Cristoforo di Giovanni, da San Severino Marche, seconda metà del secolo XV, raffigurante la Madonna della misericordia.

1.5. Il caso studio: la Torre Civica o “Torre degli Smeducci”

La torre del Comune di San Severino Marche sorge sul vertice della collina detta di Monte Nero o Castello, a circa 342 m sul livello del mare.

È l'unico monumento di architettura militare che sia rimasto intatto a San Severino ed uno degli edifici più antichi di tutta la città, risalendo con ogni probabilità al XII o XIII secolo. Essa è a pianta quadrata e presenta complessivamente un'altezza di 40 m circa dal piano di campagna attuale.

A destra della torre si erge un lungo muraglione quadrilatero in parte con maestose arcate cieche gotiche che cinge il giardino del monastero di clausura di Santa Chiara. È ciò che resta dell'antico Palazzo Consolare, poi della Signoria, andato completamente in rovina. Sul lato opposto si trova il Duomo Vecchio (cfr. §1.4. Monumenti e architetture di interesse culturale).

La torre è sempre citata nei documenti degli archivi comunali, fin dai più antichi, come “*turris Comunis*” cioè torre del Comune o anche “*turris Platee*” cioè torre di piazza, intendendosi la piazza del Castello, allora centro politico e religioso della città, per distinguerla dalla piazza del Mercato, l'odierna Piazza del Popolo, che era quella del borgo medioevale dove si svolgevano i commerci e gli affari. In un documento del 1307

viene espressamente chiamata “*turrim palatii Communis Sancti Severini*”, cioè torre del palazzo comunale, l’edificio in cui risiedevano il console delle arti, i priori dei quartieri e i magistrati che avevano il supremo potere dei beni municipali⁴¹.



Figura 6: a sinistra vengono esposti i lati Sud e Ovest della Torre Civica in uno scatto dei primi anni del Novecento. Sul lato Sud si può notare la scarpa in pietra preesistente alla parete odierna rifatta dopo il sisma del 1997. Fonte: <http://www.ebay.it/itm/S-SEVERINO-MARCHE-TORRE-CIVICA-E-SANTUARIO-/140604232400>. A destra invece appaiono i lati Nord ed Est in una fotografia dei giorni nostri. Fonte: <https://twitter.com/claudioprovasi/status/551005431943155712>.

Dal punto di vista materico, dal piano di campagna ad un’altezza media di 10 m, la torre si compone di pietra concia, mentre dai 10 m fino alla sommità presenta una muratura portante in mattoni pieni con bugnatura in pietra nei quattro angoli.

Addossata alla parte principale della torre lungo la parete Est, vi è una costruzione bassa anch’essa costruita in pietra concia e mattoni pieni⁴², che dal piano campagna raggiunge un’altezza massima di 8 m nella propria linea di colmo.

Danno accesso alla torre quattro entrate, ciascuna per ogni lato, tre delle quali collocate in prossimità del corpo secondario della torre:

⁴¹ R. PACIARONI, *La torre del castello di Sanseverino e le sue funzioni di avvistamento e di segnalazione*, Associazione Palio dei Castelli, Sanseverino Marche, 2014, p. 5.

⁴² A differenza del corpo principale della torre, la muratura in mattoni del corpo secondario ricopre i 3/4 delle superfici dei tre lati in vista intervallata a tratti da ammorsature in pietra non lavorata. Il restante quarto di superficie in pietra concia si colloca lungo la parte settentrionale del lato Est e la parte di collegamento tra la parete Nord con il suolo.

- una ad arco ribassato con infisso in materiale metallico, presente nel prospetto Nord, accessibile tramite una scala metallica frutto delle ristrutturazioni posteriori al terremoto accorso nel 1997;
- una rettangolare con architrave ligneo e infisso anch'esso ligneo a cui si accede tramite una singola alzata direttamente dal piano di calpestio del prospetto Est;
- una lungo il prospetto Sud, sorretta da un due archi a sesto acuto di cui il più interno rientrante, e chiusa da un infisso ligneo;

e l'ultima collocata in prossimità del corpo principale lungo il prospetto Ovest, sorretta anch'essa da una coppia di archi a sesto acuto allineati entrambi lungo la verticale e chiusa da un infisso ligneo.

Per ciascun lato della torre, ad un'altezza media dal suolo di 30 m che corrisponde all'ultimo piano di calpestio interno, si presentano delle aperture con arco a tutto sesto; mentre lungo i quattro lati principali della torre si evidenziano una serie di aperture rettangolari minori aggiuntive a grandezza variabile e altre tre più grosse, in corrispondenza del cambio della tipologia di materiale della muratura, due delle quali ad arco a sesto acuto (prospetti Sud e Ovest) e la terza a tutto sesto (prospetto Est).

Tutta la torre un tempo era percorribile soltanto passando per anguste scale di legno mobili che collegavano diversi ripiani in tavole e perciò poteva essere isolata in qualsiasi momento⁴³. Era certamente il luogo del comando e dell'estrema difesa, data la sua preminenza da cui si potevano dirigere le operazioni e resistere più a lungo. Ciò impediva ad eventuali nemici, forzata la cinta e penetrati nella torre, di pervenire sino ai piani superiori, che costituivano un rifugio sicuro dal quale i difensori potevano rispondere agli attacchi degli assediati.

Per questa sua importanza anche militare, sulla torre stazionavano in continuazione più torrieri pronti a battere l'allarme. I torrieri erano uomini di fiducia e capaci, investiti in forma pubblica dal Magistrato o dal Consiglio comunale, per sorvegliare e custodire la torre attentamente, dietro congruo stipendio⁴⁴.

La torre del Castello non aveva solo funzioni difensive; essa serviva a diffondere suoni e altri segnali⁴⁵ per annunciare momenti di pericolo. Oltre alla segnalazione delle

⁴³ Tale sistema di salita ora non è più osservabile in quanto i diversi pianerottoli lignei sono stati rifatti in cemento armato e le vecchie scale a pioli sostituite da una scalinata fissa in ferro. Ma quasi tutti gli interventi di restauro effettuati sulla torre sono risultati errati e la stabilità dell'edificio è stata ancor più pregiudicata. Cfr. in proposito G. CRUCIANI FABOZZI, Per una revisione dei lineamenti di studio e di tutela dei castelli medievali della Marchia, in «Studi Maceratesi», XXIV (1988), p. 39.

⁴⁴ L'assegnazione della carica veniva registrata nei volumi degli atti consiliari. La prima memoria nei documenti della torre di Sanseverino si ha proprio in una pergamena conservata nell'archivio storico comunale: in essa si legge che il 1° novembre 1307 Rainaldo Mercati, console delle arti, stipulò una convenzione con certo Deotesalve detto Siquidio il quale si impegnava di custodire la torre, giorno e notte, per la durata di un mese dietro compenso di 30 soldi ravennati.

⁴⁵ I segnali consistevano in fuochi, fumi, antenne, bandiere, spari, a seconda di ciò che si era convenuto, e a seconda del giorno o della notte in cui si doveva fare il segnale.

emergenze, in territorio comunale la torre scandiva il tempo e le convocazioni del Consiglio.

Anche altri Comuni confinanti con San Severino possedevano torri, per esempio Macerata, Jesi, Camerino, Recanati, Treia, Sassoferrato e molti altri. Si era dunque formato con queste strutture, un sistema regolare di vedette, elevate sopra i monti o sulla sommità dei colli, dalle quali si potevano avvisare gli “alleati” vicini per problematiche inerenti a danni, nemici sopraggiunti, celebrazioni di feste o qualsiasi altro avvenimento straordinario che accadesse⁴⁶.

Sulla cima della torre di San Severino, per poter espletare il proprio lavoro, erano collocati il campanone del Comune (all’ultimo piano) e l’orologio pubblico. Del campanone si ha memoria fin dal XIV secolo⁴⁷, mentre il collocamento dell’orologio nella torre risale al XV secolo quando il Comune già ne stipendiava il moderatore⁴⁸.

Nel corso dei secoli la torre fu usata spesso anche come prigione e come simbolo di reprimenda verso la popolazione. Ne sono simbolo i due bassorilievi entrambi scolpiti su pietra rettangolare e posti lungo la superficie del lato Nord.



Figura 7: a sinistra è riportato il bassorilievo con su inciso il leone simbolo dei Ghibellini decapitato successivamente al dominio degli Smeducci, a destra invece il morso di cavallo. Fonte: fotogrammi scattati durante le operazioni di rilievo fotogrammetrico effettuato con drone a pilotaggio remoto.

Il bassorilievo posto ad un’altezza di circa 9 m da terra rappresenta un leone, emblema dei Ghibellini, fazione alla quale aderì San Severino in perenne lotta con la guelfa Camerino. Gli manca però la testa: a metà del 1500, San Severino perse la propria

⁴⁶ R. PACIARONI, *La torre del castello di Sanseverino...*, Associazione Palio dei Castelli, Sanseverino Marche, 2014, p. 7.

⁴⁷ In data 7 gennaio 1397 si trova il contratto stipulato con mastro Fianza, fonditore dimorante a Camerino, per rifare la campana grossa del Comune e porla sulla torre. La campana doveva pesare non meno di 4000 libbre e sentirsi, fino all’odierna Treia.

⁴⁸ R. PACIARONI, *Il campanone della torre comunale di Sanseverino*, San Severino Marche 1985;

autonomia e venne incorporata allo stato pontificio, e la decapitazione del leone ghibellino fu un modo per mostrare lo sdegno.

Il bassorilievo posto a metà della torre raffigura invece un “morso di cavallo” il quale potrebbe rappresentare l’emblema smeduccesco o di uno dei podestà comunali, ma la tradizione cittadina lo attribuisce alla dispotica signoria degli Smeducci che, al ritorno da una tra le tante cacciate subite, lo fece apporre per mostrare il trattamento che sarebbe stato riservato al popolo ribelle⁴⁹.

L’occupazione degli Smeducci fece sì che alla torre si accostasse come appellativo, oltre a quello di Torre Comunale o Torre Civica, quello di Torre degli Smeducci.

L’area comunale su cui sorge la costruzione in questione, è stata soggetta a eventi sismici in maniera frequente nel corso dei secoli; ciò ha portato probabilmente alla conseguente inclinazione della struttura e dei suoi ambienti interni a partire da una quota di 10 m dal piano di campagna, proprio dove i materiali utilizzati per la sua edificazione variano.

Dallo stato di fatto visivo interno ed esterno della Torre si nota come diversi interventi si sono susseguiti nel corso degli anni⁵⁰. I più evidenti risultano essere quelli inerenti alla realizzazione di solai in calcestruzzo armato con funzione di separazione tra un piano e l’altro, quelli inerenti all’inserimento di tiranti interni e chiavi, e quelli apportati alla parte bassa della parete Sud, visibilmente rimaneggiata nella conformazione materica della superficie in pietra conca.

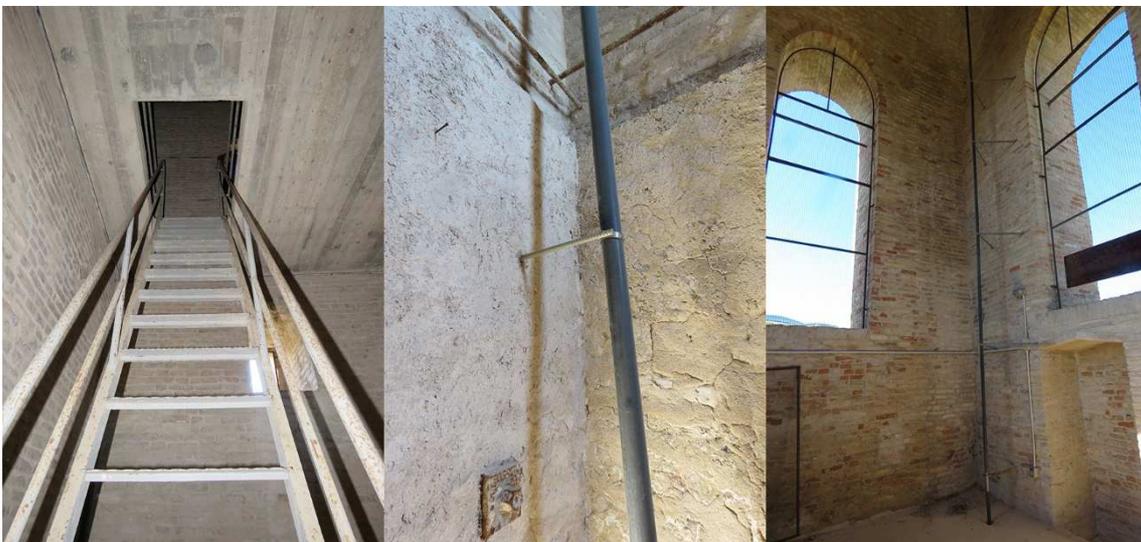


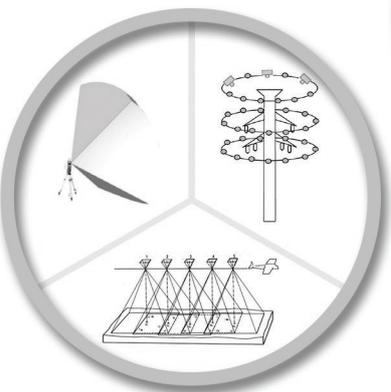
Figura 8: interventi apportati alla struttura interna della Torre: realizzazione di solette in c.a., scale di collegamento tra i piani, e tiranti e chiavi per consolidare le pareti murarie. Fonte: documentazione fotografica acquisita in loco dal team Direct.

⁴⁹ <http://www.provincia.mc.it/curiosita-cms/le-mura-e-la-torre-torre-civica-di-s-severino/>.
Ultima consultazione 21/09/2017.

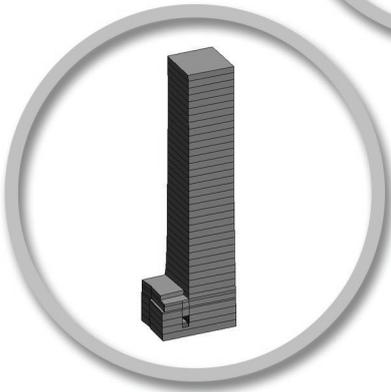
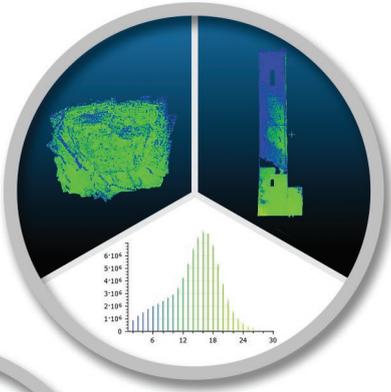
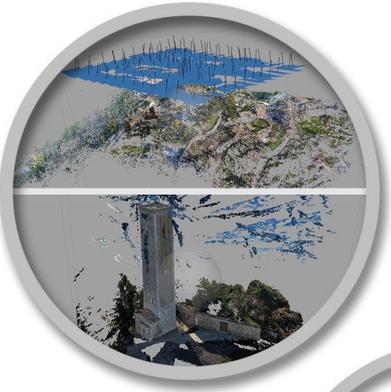
⁵⁰ R. PACIARONI, *La torre del castello di Sanseverino...*, Sanseverino Marche, 2014, p. 23.

L'ultimo evento sismico verificatosi nel 2016 ha peggiorato ulteriormente le condizioni statiche del manufatto, riaperto vecchie fratture e generate di nuove.

I capitoli seguenti analizzeranno i risultati di diverse tecniche di rilievo utili alla successiva fase di restituzione grafica 2D e 3D che è stata utilizzata per svolgere indagini inerenti a degradi patologici e dissesti strutturali interessanti l'involucro esterno del manufatto.



CAPITOLO 2
TECNICHE E TECNOLOGIE
PER IL RILIEVO 2D E 3D



Il rilievo metrico è un processo integrante della geometria descrittiva, che si pone come scopo la rappresentazione di un oggetto o manufatto o una porzione di territorio esistente riportandone le caratteristiche fondamentali in un sistema di rappresentazione.

La geometria descrittiva è la scienza che studia e regola le tecniche e modalità di rappresentazione bidimensionale o tridimensionale degli oggetti servendosi di elementi fondamentali come piani, punti, rette, linee, direzioni e giaciture.

Un'operazione di rilievo è corredata sempre da altri documenti che ampliano la conoscenza del manufatto, questi sono da imputarsi alle caratteristiche proprie di ogni oggetto e possono riassumersi in riproduzioni fotografiche, informazioni storiche, informazioni tecniche e ogni altra relazione con l'oggetto rilevato che possa aiutare alla miglior procedura attuabile.

A seguito di queste considerazioni nozionistiche è facile comprendere che si presenteranno molteplici tipologie di rilievo a seconda della finalità, dello scopo e dei mezzi fisici ed economici a disposizione del rilevatore.

“È dal tipo di informazioni che si vogliono ottenere attraverso il rilievo, che discenderà la scelta di un metodo di rilievo rispetto a un altro. Il rilievo non è solo una procedura, è un processo di studio che ha delle finalità che ne determinano il percorso di acquisizione”⁵¹.

Secondo una distinzione classica, le tipologie di rilievo sono le seguenti⁵²:

- longimetrico (metodo diretto): quello effettuato dall'operatore con l'ausilio di semplici strumenti di misura, quali il metro, le aste metriche o il filo a piombo;
- topografico (metodo strumentale): quello effettuato con l'ausilio di strumenti topografici, quali stazioni totali, tacheometri, livelli, distanziometri e altri;
- fotogrammetrico (metodo indiretto) quello effettuato con l'ausilio di camere da presa.

Oggi giorno però questa classificazione si è maggiormente ampliata a causa delle nuove tecnologie sviluppate nel corso degli ultimi 20 anni e lo sconfinamento nel campo del tridimensionale.

Qui di seguito viene esposta una figura illustrante una suddivisione che tratta delle differenze di misurazione di volumi e superfici sulla presenza o meno del contatto con l'oggetto da rilevare (figura 9).

Perciò, al fine di sviluppare dei modelli 2D e 3D del caso studio ed effettuare su di essi delle analisi di tipo qualitativo e quantitativo, è stato necessario ricorrere a differenti metodologie di rilievo che chiamano in causa altrettante diverse tipologie di strumentazioni tecnologiche.

⁵¹ F. GUERINI, *Rilievo: classificazione e metodologie*, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura e Società, dispense del corso Laboratorio di Rappresentazione 1, cit. p. 4.

⁵² *ivi* pp. 4 - 6.

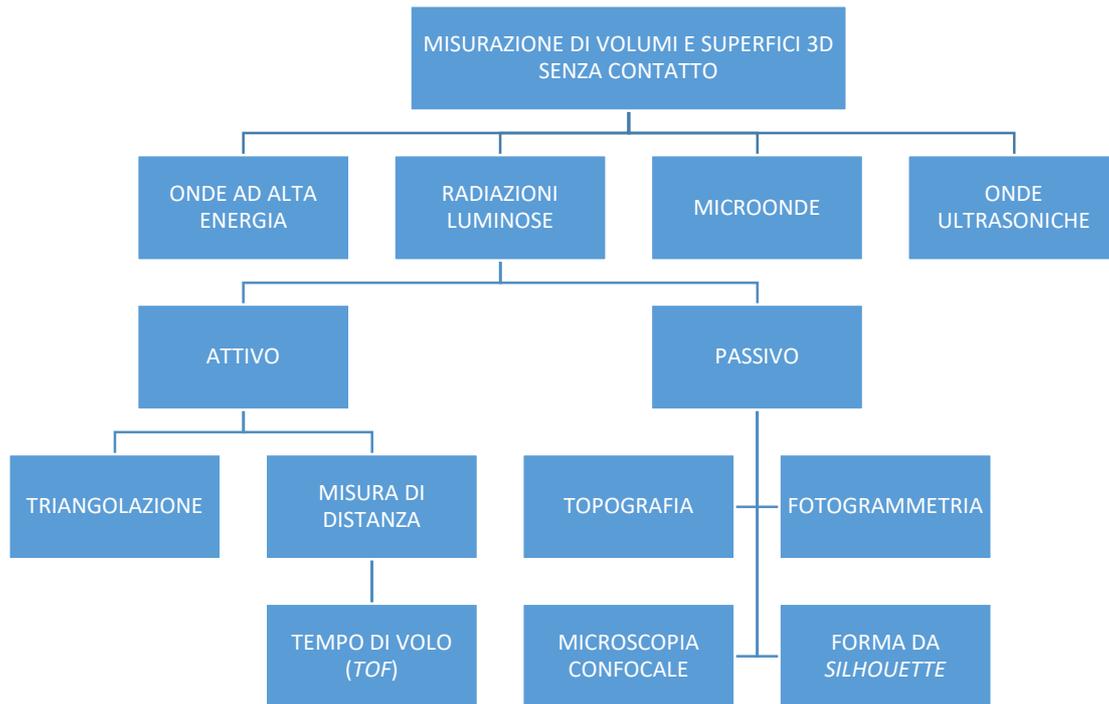


Figura 9: schema della classificazione dei sistemi di misurazione di volumi e superfici 3D senza contatto. Quelli utilizzati per il rilievo effettuato sono la tecnica passiva fotogrammetrica e quella attiva della misura di distanza TOF mediante laser scanner.

Nei prossimi paragrafi vengono espone le tipologie di rilievo utilizzate per acquisire i dati sul caso studio, i relativi requisiti e attributi e le formulazioni matematiche e scientifiche che ne stanno alla base.

2.1. Rilievo fotogrammetrico

La fotogrammetria rientra tra le tecniche di rilievo e misurazione di volumi e forme 3D senza contatto con l'oggetto rilevato, adoperando in modo passivo le radiazioni luminose che vengono catturate in immagini analogiche e/o digitali.

2.1.1. Definizione di fotogrammetria

Le scienze dell'ingegneria e dell'architettura devono possedere una conoscenza esaustiva e corretta delle porzioni di territorio o dei manufatti oggetto di rilievo. Per raggiungere questo obiettivo è necessario tenere sotto controllo una molteplicità di fattori come luogo e tipologia d'intervento, aspetto geometrico dell'oggetto (che sia esso riconducibile a un manufatto o di matrice territoriale), tempi, costi, mezzi a disposizione, precisione richiesta e/o voluta, ecc.

La geomatica è difatti la scienza che cerca di unificare sotto il proprio controllo tutti questi aspetti e la fotogrammetria è una sua disciplina.

Si può definire la fotogrammetria come:

*“la scienza che consente di ottenere informazioni affidabili di oggetti fisici e dell’ambiente circostante mediante processi di registrazione, misura e interpretazione delle immagini fotografiche e digitali formate dall’energia elettromagnetica radiante e da altri fenomeni fisici.”*⁵³

O più brevemente come:

*“la scienza che consente di estrarre informazioni da immagini e di presentarle all’utente in modo efficace.”*⁵⁴

Quindi il punto fondamentale è quello di estrarre informazioni da immagini fotografiche analogiche o digitali al fine di rielaborarle a seconda delle necessità del caso⁵⁵.

La tecnica fotogrammetrica, sviluppatasi nel corso dei secoli sin dall’epoca ellenistica e perfezionatasi con le numerose scoperte scientifiche degli ultimi due secoli, tra le quali la fotografia e mezzi volanti motorizzati e non, è entrata a far parte della quotidianità degli operatori topografici soltanto dalla seconda metà del XX secolo. Essa rispetto alle altre tecniche di rilievo, come per esempio la topografia classica, alla quale ci si appoggia lo stesso per materializzare una rete di inquadramento, offre parecchi vantaggi quali la possibilità di: rilevare un gran numero di punti in tempi più brevi, rilevare zone e oggetti di qualsiasi tipo e di estensione maggiore, registrare un numero e una qualità maggiore di informazioni.

Le applicazioni principali di un processo fotogrammetrico possono essere le seguenti:

- stesura e realizzazione di cartografia topografica o cartografia numerica;
- stesura e realizzazione di carte grafiche quali prospetti o sezioni trasversali e longitudinali di oggetti;
- produzione di immagini convertite in vere e proprie carte metriche come le Ortofoto;
- produzione di modelli digitali quali *DTM* e *DSM*;
- produzione di nuvole di punti tridimensionali che descrivono l’oggetto;
- rilievo di oggetti e zone del tutto o parzialmente inaccessibili alle possibilità umane o a quelle di altre strumentazioni;
- rilievo di piccoli oggetti o organismi viventi.

⁵³ Manual of Photogrammetry, ASPRS, 1980.

⁵⁴ PE&RS, 1999.

⁵⁵ A. M. LINGUA, *La fotogrammetria*, Politecnico di Torino, dispense del corso di cartografia numerica e GIS, A.A. 2016/2017, p. 7.

2.1.2. Classificazione della fotogrammetria

La fotogrammetria si può classificare in base:

1. al tipo di presa:

- fotogrammetria aerea: le camere sono montate su mezzi volanti di ogni genere, taglia e tipologia, da quelli motorizzati come gli aeroplani o i droni *UAV*, a quelli che sfruttano il calore della combustione come le mongolfiere, a quelli infine che sfruttano la sola differenza di pressione tra l'aria interna ed esterna di una superficie a forma sferica come i palloni aerostatici. I campi di applicazione che il rilievo con presa aerea può coprire sono svariati, si passa dalla scala urbana alla scala architettonica a seconda dell'oggetto che si deve restituire.
- Fotogrammetria terrestre: le camere generalmente vengono utilizzate in maniera diretta dall'operatore salvo fatto il caso in cui si usino dei bracci estensori per raggiungere quote inaccessibili di manufatti che presentano altezze elevate. Normalmente la fotogrammetria terrestre è volta soltanto a oggetti e manufatti su scala architettonica come statue, monumenti ed edifici puntuali, ecc.

2. al tipo di fotografia:

- analogica: la presa fotogrammetrica avviene con macchine fotografiche analogiche di varia tipologia. Le immagini vengono sviluppate su pellicola di formati diversi a seconda della camera utilizzata. L'elaborazione è anch'essa analogica. Si tratta della fotogrammetria classica, quella che è stata intrapresa sin dal XIX secolo con la scoperta della fotografia.
- Digitale: la presa fotogrammetrica passa attraverso l'utilizzo di camere digitali anch'esse con differenti caratteristiche a seconda della tipologia. In questo caso a seguito dell'invenzione di sensori digitali fotosensibili, *CCD* (dispositivo ad accoppiamento di carica dall'inglese *Charge Coupled Device*) e *CMOS* (Complementary Metal Oxide Semiconductor), che permettono l'immagazzinamento delle informazioni cromatiche e la relativa conversione su un supporto informatico, e l'invenzione del calcolatore, è stato eliminato il passaggio legato allo sviluppo della fotografia su pellicola. Il formato digitale caratteristico della nuova tipologia di immagini e l'implementazione di quest'ultime nei calcolatori ha fatto sì che si potesse avviare un processo di elaborazione automatica dei dati e delle informazioni rilevate.

2.1.3. Il fotogramma

L'elemento fondamentale di questa tecnica è il fotogramma: un'immagine di duplice natura, analogica e digitale, che riproduce informazioni grafiche quasi del tutto simili alla realtà rappresentata.

La differenza tra i dati contenuti in un fotogramma e la realtà, ovvero l'oggetto da rilevare, è da ricercarsi nella consistenza bidimensionale dell'immagine ricreata.

Difatti il passaggio dallo spazio tridimensionale, ovvero spazio oggetto, allo spazio bidimensionale, ovvero spazio immagine, è descritto mediante un procedimento geometrico definito in maniera univoca, questo prende il nome di "prospettiva centrale ideale".

Nella prospettiva centrale ideale, preso un punto nello spazio oggetto, il suo corrispettivo nello spazio immagine e il centro di proiezione, questi giaceranno sulla stessa retta. Questa caratteristica non permette però di determinare in maniera univoca la posizione spaziale di un punto partendo da un singolo fotogramma, poiché a un punto immagine, seguendo la linea retta che unisce il punto stesso e il centro di proiezione, corrispondono infiniti punti oggetto.

Il passo successivo è quello legato all'introduzione di un altro fotogramma a supporto del modello appena descritto. Infatti utilizzando due immagini, la ricostruzione spaziale del punto oggetto può concretizzarsi mediante l'interpolazione nello spazio oggetto delle due rette che uniscono i rispettivi centri di proiezione ai punti immagine⁵⁶.

2.1.4. L'orientamento interno ed esterno della camera da presa

Una parte fondamentale del processo fotogrammetrico è la definizione delle coordinate dei punti nello spazio oggetto e/o di quelli nello spazio immagine a seconda delle situazioni in cui ci si trova: prospettivizzazione o restituzione.

Nel caso della prospettiva centrale ideale, queste vengono determinate attraverso la ricerca di 9 parametri indipendenti, mentre nella realtà pratica si tiene conto anche degli errori che nascono nel modello geometrico - fisico o in quello matematico. Questi ultimi prendono il nome di distorsioni.

Dei 9 parametri indipendenti:

- tre definiscono l'orientamento interno della camera da presa, ovvero la posizione del centro di proiezione rispetto al sistema di riferimento che sussiste sul piano del fotogramma, identificato dagli assi ξ (ascisse) ed η (ordinate) materializzati tradizionalmente da segni denominati "marche fiduciali";

⁵⁶ ivi, pp. 7 - 8.

- sei definiscono l'orientamento esterno della camera da presa, ovvero il proprio assetto spaziale (con orientamento interno già effettuato) rispetto ad un sistema di coordinate tridimensionale dello spazio.

I tre parametri dell'orientamento interno sono:

- ξ_0 : coordinata sull'asse delle ascisse del punto principale nel sistema fiduciale;
- η_0 : coordinata sull'asse delle ordinate del punto principale nel sistema fiduciale;
- c : distanza principale della camera, ovvero distanza ortogonale del centro di proiezione dal piano del fotogramma;

laddove il punto principale risulta essere la proiezione del centro di proiezione sul piano del fotogramma.

I sei parametri dell'orientamento esterno sono:

- 3 traslazioni " X_0 ", " Y_0 " e " Z_0 " rispetto ai tre assi del sistema di riferimento tridimensionale spaziale " X ", " Y " e " Z ";
- 3 rotazioni " ω ", " ϕ " e " κ " rispettivamente attorno agli assi " ξ ", " η " e " ζ ", dove " ζ " è l'asse perpendicolare a " ξ " ed " η " e completa la terna del sistema di riferimento del centro di proiezione della camera da presa.

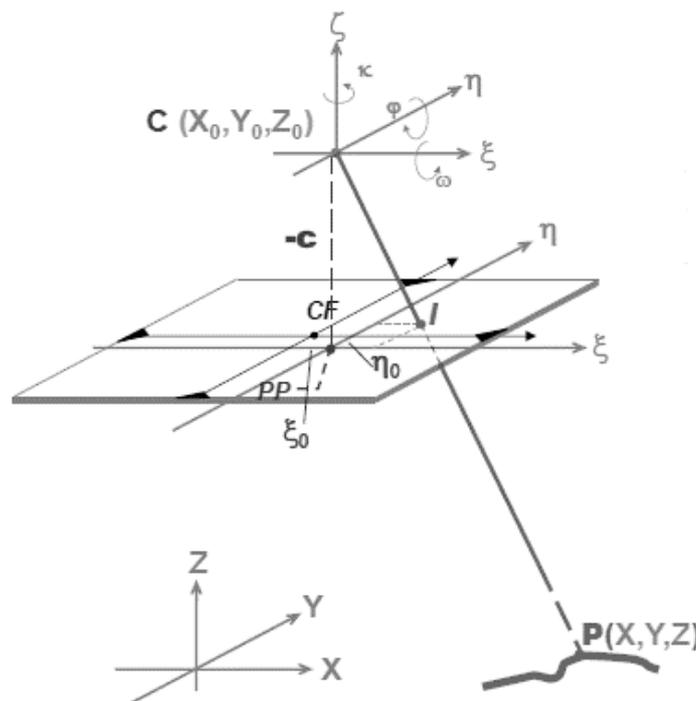


Figura 10: identificazione dei parametri di orientamento interno ξ_0 , η_0 e c e di quelli di orientamento esterno X_0 , Y_0 , Z_0 , ω , ϕ , κ . Fonte: A. M. LINGUA, *La fotogrammetria...*, p. 10.

Altro fattore interessante la natura di un fotogramma è la sua scala. Essa non influisce sulle caratteristiche della geometria centrale, bensì al variare del proprio valore il fotogramma stesso potrà subire i seguenti cambiamenti:

- aumentando o diminuendo il fattore di scala del fotogramma si ingrandiscono o si riducono secondo lo stesso rapporto sia la distanza principale sia le dimensioni del fotogramma;
- a seconda del segno del fattore di scala si possono ottenere il positivo o negativo geometrico del fotogramma.

Le relazioni approssimate che legano quanto detto sono le seguenti:

$$\frac{l}{L} = \frac{c}{H} = \frac{1}{n} \quad [2.1]$$

dove:

- “l” è il lato del fotogramma,
- “L” è il lato della porzione dello spazio oggetto contenuta nel fotogramma,
- “c” è la distanza principale,
- “H” è la distanza del centro di proiezione della camera da presa rispetto all’oggetto fotografato,
- “1/n” è il fattore di scala,
- “n” è la scala del fotogramma.

2.1.5. Il modello stereoscopico

La costruzione geometrica descritta nel paragrafo 2.1.3, che presenta l’utilizzo di due fotogrammi, sfrutta i principi della “visione stereoscopica” che prende spunto dalla modalità di osservazione innata di alcuni essere viventi, tra cui l’uomo, aventi un apparato visivo composto da due estremità oculari.

La visione stereoscopica permette all’occhio umano la fusione delle due immagini formatesi sulla retina, ciascuna delle quali intese come prospettiva centrale a meno di parallassi orizzontali, in un’unica tridimensionale.

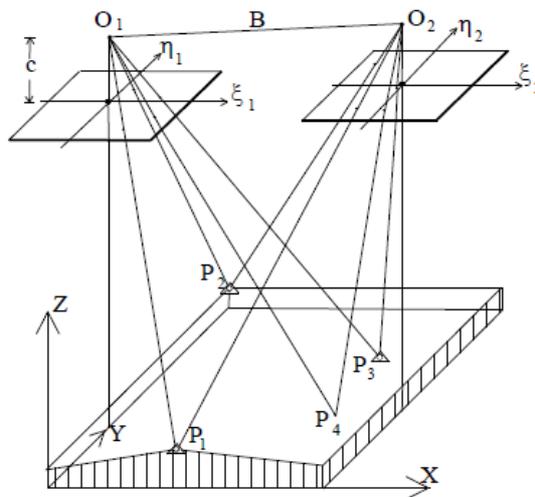


Figura 11: Coppia di fotogrammi costituenti il modello stereoscopico. Fonte: A. M. LINGUA, *La fotogrammetria...*, p. 11.

In presenza di una coppia di fotogrammi che riprendono uno stesso oggetto, dopo aver effettuato l'orientamento interno della camera da presa, i raggi delle stelle proiettive⁵⁷ che passano per le immagini di uno stesso punto, immagini omologhe, si intersecano nello spazio. L'insieme dei punti di intersezione delle infinite coppie di raggi omologhi si chiama modello stereoscopico.

2.1.6. Fondamenti analitici: equazioni di collinearità

Le equazioni di collinearità consentono il passaggio dalle coordinate di un qualsiasi punto immagine P' del fotogramma, a quelle del corrispondente punto oggetto nello spazio reale e viceversa.

Per definirle serve porre una condizione di parallelismo ai due vettori, rosso e blu dell'immagine, rispettivamente colleganti il punto immagine P' e il punto oggetto P al centro di presa O , in quanto all'atto della presa fotogrammetrica questi tre giacciono sulla stessa retta.

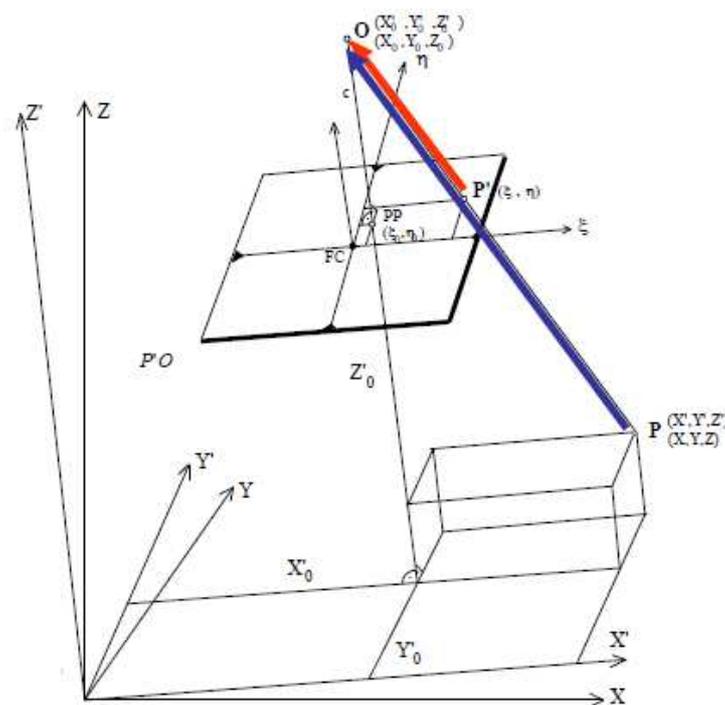


Figura 12: schema della presa fotogrammetrica di un singolo fotogramma utile alla determinazione delle equazioni di collinearità. Fonte: A. M. LINGUA, *La fotogrammetria:...*, p. 31.

I due vettori sono:

$$(P' - O) = (\xi - \xi_0, \eta - \eta_0, -c) \quad [2.2]$$

$$(P - O) = (X - X_0, Y - Y_0, Z - Z_0) \quad [2.3]$$

⁵⁷ Insieme delle rette che uniscono i singoli punti immagine con il centro di proiezione. Ricavabile solamente dopo aver effettuato l'orientamento interno.

essendo:

- $\zeta - \zeta_0 = -c$;
- X', Y', Z' un sistema di riferimento oggetto parallelo al sistema immagine ξ, η, ζ .

Posta la condizione di parallelismo ai vettori ed esplicitando le coordinate immagine, si ottengono le seguenti proporzioni tra le componenti dei due vettori:

$$\xi = \xi_0 - c \frac{X' - X'_0}{Z' - Z'_0} \quad [2.4] \quad \eta = \eta_0 - c \frac{Y' - Y'_0}{Z' - Z'_0} \quad [2.5]$$

A questo punto bisogna trasformare le due equazioni sopra esposte riferendole non più al sistema di riferimento X', Y', Z' parallelo al sistema immagine, bensì a quello oggetto X, Y, Z . Per completare ciò ci si serve della trasposta della matrice di rotazione spaziale "R^T":

$$\begin{pmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z' - Z'_0 \end{pmatrix} = R^T \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad [2.6]$$

Tenendo conto dell'equazione [2.6] e inserendola nella [2.4] e nella [2.5] si ottengono le equazioni di collinearità:

- in forma di prospettivizzazione:

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = \xi_0 - c \frac{Z_x}{N} \quad [2.7]$$

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = \eta_0 - c \frac{Z_y}{N} \quad [2.8]$$

- in forma di restituzione usando la matrice di rotazione spaziale "R":

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \quad [2.9]$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \quad [2.10]$$

a seconda dell'utilità del caso.

Osservando le formule esposte si può assumere che *“ad ogni punto oggetto corrisponde un punto immagine”* e *“ad ogni punto immagine possono corrispondere infiniti punti oggetto”*⁵⁸.

Infatti, nel caso di un singolo fotogramma, dalle equazioni di collinearità in forma di restituzione, si possono ricavare due coordinate oggetto in funzione della terza (coordinata Z); perciò variando la Z si hanno infiniti punti della retta su cui giacciono P, P' e O. Da ciò si comprende meglio perché la fotogrammetria si avvalga di due o più fotogrammi per determinare in maniera univoca la posizione spaziale di ciascun punto da restituire.

2.1.7. Distorsioni delle camere da presa e calibrazione

Finora si è parlato di prospettiva centrale ideale; tuttavia nella pratica operativa, le strumentazioni utilizzate presentano una serie di errori che portano alla modifica dello schema proiettivo precedentemente esposto. La linearità tra centro di proiezione, punto nello spazio oggetto e punto nello spazio immagine non è mai rispettata a causa della conformazione strutturale dei componenti della camera da presa.

Gli errori che nascono nel modello geometrico-fisico o in quello matematico sono identificati secondo l'appellativo *“distorsioni”* e vengono corretti mediante un processo chiamato *“calibrazione”*.

Le distorsioni possono essere suddivise in due grandi famiglie:

- quelle dovute ad aspetti sistematici che influiscono sul modello geometrico-fisico che regola il funzionamento teorico della presa fotogrammetrica. Si hanno perciò distorsioni legate all'obbiettivo o alla camera.
- Quelle dovute ad aspetti pseudo-accidentali che influiscono sul modello matematico che regola il funzionamento teorico della presa fotogrammetrica. Si hanno perciò distorsioni legate alla conformazione del fotogramma, nel caso di camera analogica, o alla conformazione del sensore, nel caso di camera digitale. Per quanto riguarda le camere analogiche, esempi di distorsioni possono essere: stiramento e non planarità della pellicola, usura o deformazione della pellicola a causa di agenti esterni come temperatura, umidità e altri. Invece per camere digitali, la non perpendicolarità tra le righe e le colonne del sensore CCD o CMOS⁵⁹.

Oggi giorno la fotogrammetria è volta prevalentemente se non addirittura in tutti i casi all'uso preferenziale di camere digitali.

Le distorsioni interessanti queste tipologie di camere sono⁶⁰:

⁵⁸ ivi, op. cit. p. 32.

⁵⁹ ivi, p. 39.

⁶⁰ ivi, pp. 40 - 62.

- distorsione radiale ($\Delta\xi_1, \Delta\eta_1$): dovuta alla conformazione strutturale dell'obiettivo che è composto da una serie di lenti le quali causano uno spostamento radiale del punto oggetto sul piano del fotogramma;
- distorsione tangenziale ($\Delta\xi_2, \Delta\eta_2$): dovuta all'imperfetta simmetria cilindrica;
- distorsione del sensore ($\Delta\xi_3$): dovuta all'imperfetta perpendicolarità tra le righe e le colonne delle singole celle componenti il sensore stesso.

In base alla presenza o meno delle differenti tipologie di distorsioni, la calibrazione delle camere entra in gioco inserendo la correzione di questi errori nelle formule delle equazioni di collinearità, le quali avranno la seguente forma:

$$\xi = \xi_0 + \Delta\xi_1 + \Delta\xi_2 + \Delta\xi_3 - c \frac{Z_x}{N} \quad [2.11]$$

$$\eta = \eta_0 + \Delta\eta_1 + \Delta\eta_2 - c \frac{Z_y}{N} \quad [2.12]$$

dove $\Delta\eta_3 = 0$.

Diamo ora uno sguardo alle diverse tipologie di camere digitali che possono essere utilizzate per effettuare una presa fotogrammetrica e le rispettive distorsioni che le caratterizzano. Vi sono⁶¹:

- camere metriche: con orientamento interno noto e costante nel tempo, ottiche raffinate, e calibrazione effettuata su banco ottico mediante specifici parametri. Non si tiene conto delle distorsioni tangenziali e di quelle affini. Spesso quelle radiali sono corrette a priori generando immagini prive di distorsioni.
- Camere semi-metriche: con orientamento interno noto ma variabile nel tempo e sensore stabile il quale permette di conoscere i parametri di orientamento nel caso di messa a fuoco a scatti discreti. Si tiene conto sempre delle distorsioni radiali e di quelle del sensore.
- Camere professionali e amatoriali: con orientamento interno incognito e variabile nel tempo. Tramite tecniche analitiche di autocalibrazione, e particolari accorgimenti soprattutto per le camere amatoriali come la messa a fuoco mantenuta costante, è possibile stimare i parametri di orientamento interno. Si tiene conto delle distorsioni radiali, di quelle tangenziali e di quelle dovute al sensore.

⁶¹ ivi, pp. 64 - 70.

2.1.8. Ground Sample Distance (GSD)

I rilievi fotogrammetrici moderni prevedono ormai il solo utilizzo di camere digitali. Il *GSD* o *Ground Sample Distance* corrisponde alla misura dell'unità elementare di un fotogramma digitale proiettata nello spazio oggetto, ovvero il *pixel*. Quindi si può sostenere che il *GSD* corrisponde alla misura del *pixel* a terra.

La determinazione del *GSD* passa attraverso alla risoluzione geometrica di un problema di similitudine tra due triangoli, ciascuno dei quali possiede l'angolo, sotteso al vertice in comune, di eguale ampiezza. In questo caso anche gli altri due angoli saranno uguali, mentre i lati e le relative altezze saranno legati in maniera proporzionale tra loro.

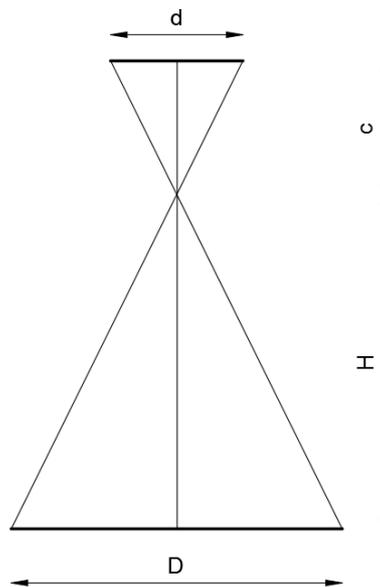


Figura 13: Schema per la determinazione del *GSD*.

Tenendo conto della figura soprastante:

- “*c*” è la distanza principale della camera da presa;
- “*H*” è l’altezza o distanza di presa;
- “*d*” è la dimensione del *pixel* nel sensore *CCD* o *CMOS* proprio della camera da presa;
- “*D*” è la dimensione del *pixel* a terra ovvero il *GSD*.

La proporzione che lega i quattro parametri sarà dunque:

$$\frac{D}{d} = \frac{H}{c} \quad [2.13]$$

quindi:

$$GSD = D = \frac{H \cdot d}{c} \quad [2.14]$$

Le misure devono essere convertite in metri prima di eseguire il calcolo per non effettuare errori dimensionali.

Dalla formula descritta si possono eseguire una serie di osservazioni utili alla determinazione del *planning* di volo per la presa fotogrammetrica (cfr. 2.1.10. Fasi del processo fotogrammetrico):

- se si normalizza il *GSD* rispetto alla dimensione del *pixel* si può notare una proporzionalità inversa rispetto alla qualità dell'immagine, infatti maggiore è la qualità minore è la dimensione *GSD/d*. Per esempio 20 cm/*pixel* rappresentano una risoluzione minore rispetto a 2 cm/*pixel*.
- Si nota una proporzionalità diretta con il fattore di scala medio ($m_b = H/c$).
- Affinché il *GSD* rimanga costante, anche l'altezza di volo (*H*) lo deve rimanere. Si verifica una differenza di altezza di volo durante una presa fotogrammetrica in presenza di forti variazioni e sconnessioni del terreno date da eventuali strutture artificiali o elementi naturali.

A seguito delle osservazioni effettuate, scelta la scala media di restituzione del progetto, il *GSD* rappresenta il punto di partenza dal quale iniziare a eseguire i calcoli di *planning* del volo fotogrammetrico.

2.1.9. La precisione della fotogrammetria

La precisione è il grado di dispersione, di dati rilevati individualmente, rispetto al valore medio della serie cui appartengono ovvero la loro deviazione *standard* rispetto alla media campionaria.

Nel caso della fotogrammetria per arrivare a determinarne la precisione in modo analitico si passa attraverso l'analisi del "caso normale" ovvero l'approccio teorico di visione stereoscopica, umana o simulata al calcolatore, per la restituzione di oggetti spaziali a partire da una coppia di fotogrammi.

Si ipotizza la situazione riportata nella figura seguente: assi delle due camere paralleli tra loro e perpendicolari alla base di presa (presa normale). Come è facile intuire, questa condizione è fittizia, in quanto la realtà dei casi non presenta mai situazioni simili, nonostante sia sempre buona prassi avvicinarsi il più possibile a questa⁶².

Le coordinate e gli assetti angolari per i due fotogrammi rispetto al sistema di riferimento in verde saranno perciò le seguenti:

- $X_{01} = Y_{01} = Z_{01} = X_{02} = Y_{02} = Z_{02} = 0$;
- $X_{02} = B =$ base di presa;
- $\xi_{01} = \eta_{01} = \xi_{02} = \eta_{02} = 0$;
- $\omega_{01} = \omega_{02} = \phi_{01} = \phi_{02} = \kappa_{01} = \kappa_{02} = 0$;

⁶² A. M. LINGUA, *Fotogrammetria da drone: basi teoriche della presa, requisiti di precisione e piano di volo*, Conferenza ASITA, Cagliari, 2016, p. 44.

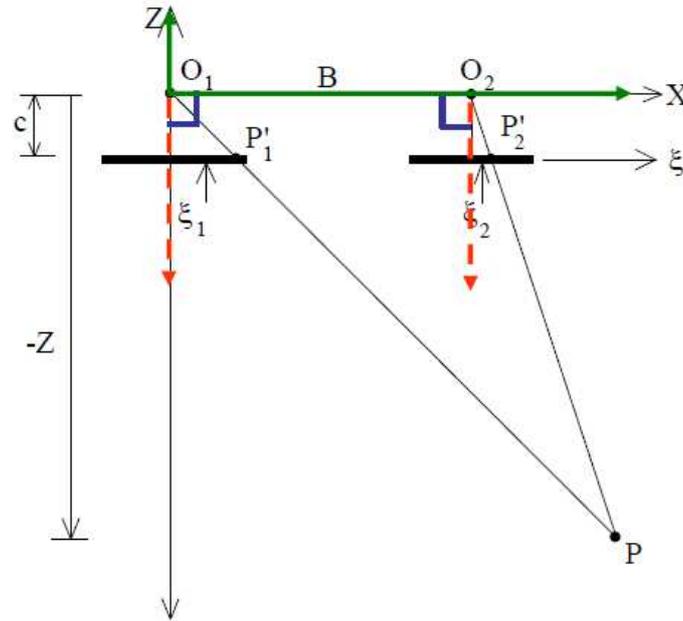


Figura 14: schema del caso normale teorico.

In rosso gli assi dei due fotogrammi evidenziati in nero. Fonte: A. M. LINGUA, *Fotogrammetria da drone...*, p. 44.

Quindi la matrice di rotazione di ciascun fotogramma si riduce ad una semplice matrice identità di ordine 3 e le equazioni di collinearità si semplificano nella seguente forma:

- per il primo fotogramma:

$$X_1 = -Z \frac{\xi_1}{c} \quad [2.15] \quad Y_1 = -Z \frac{\eta_1}{c} \quad [2.16]$$

- per il secondo fotogramma:

$$X_1 = B - Z \frac{\xi_2}{c} \quad [2.17] \quad Y_2 = -Z \frac{\eta_2}{c} \quad [2.18]$$

Dalle equazioni di [1.16] e [1.18] si può notare l'assenza di parallasse d'altezza: $p_\eta = \eta_2 - \eta_1 = 0$, essendo $\eta_2 = \eta_1$; mentre da tutte e quattro le equazioni ricavate si possono esprimere le coordinate X, Y, Z del punto P:

$$X = \frac{B \cdot \xi_1}{p_\xi} \quad [2.19] \quad Y = \frac{B \cdot \eta_1}{p_\xi} \quad [2.20] \quad Z = -\frac{B \cdot c}{p_\xi} \quad [2.21]$$

con $p_\xi = \xi_2 - \xi_1 = -\frac{B \cdot c}{Z}$.

Seguendo l'ipotesi che "B" e "c" siano prive di errore e le grandezze ξ_1 , η_1 , e p_ξ siano indipendenti, si applica la legge di propagazione della varianza alle tre equazioni in X, Y e Z ottenendo:

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{\xi_1}{c} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{p_\xi}\right)^2 + (m_b \sigma_\eta)^2} \quad [2.22] \quad \sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\eta_1}{c} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{p_\xi}\right)^2 + (m_b \sigma_\eta)^2} \quad [2.23]$$

$$\sigma_z = \frac{Z^2}{c \cdot B} \sigma_{p\xi} = \frac{Z \cdot Z}{c \cdot B} \sigma_{p\xi} \quad [2.24]$$

Prendendo in esame σ_z si nota che:

- è inversamente proporzionale al rapporto di base B/Z;
- è direttamente proporzionale al fattore di scala m_b .

Tralasciando il caso normale esistono anche formule empiriche utili a stimare la precisione relativa per collimare punti isolati, ciò è frutto di numerose analisi, test e ricerche condotti presso diverse università internazionali.

Alcune di esse sono⁶³:

1. regola empirica per punti presegnalizzati sul terreno:
 - in planimetria: $\pm 6 \mu\text{m}$ sul fotogramma;
 - in altimetria: $\pm 0,006-0,008\%$ della distanza di presa a seconda della tipologia di camera utilizzata (grandangolare o meno);
2. regola empirica per punti naturali: ai valori sopra illustrati va aggiunta l'incertezza della definizione del punto;
3. regola empirica per camere non convenzionali per punti presegnalizzati sul terreno:
 - in planimetria: $\pm \text{GSD}$;
 - in altimetria: $\pm 0,03\%$ della distanza di presa "H";
4. regola empirica per le prese da drone (*EuroSDR*⁶⁴):
 - in planimetria: $\sigma_{xy} = 1,5 \cdot \text{GSD} \cdot \sigma_{pix}$ [2.25];
 - in altimetria: $\sigma_z = 2,0 \cdot \text{GSD} \cdot \sigma_{pix}$ [2.26];
5. regola empirica di *Fraser*:
 - $\sigma_{xyz} = \frac{q \cdot Z}{c \sqrt{k}} \sigma_{p\xi}$ [2.27] dove "k" è il numero medio delle immagini che riprendono lo stesso punto (molteplicità) e q è il fattore di forma (0.4 - 0.8) che esprime la bontà della configurazione delle intersezioni nello spazio tra le varie immagini. E' generalmente legato agli angoli tra i raggi omologhi che si intersecano.

Le precisioni nominali messe a punto per le camere fotogrammetriche tradizionali vanno bene per ricoprimenti tradizionali (60% longitudinale, 20% trasversale), ma non funzionano bene al crescere dei ricoprimenti in quanto si trascura la molteplicità.

Le regole empiriche messe a punto per le camere fotogrammetriche tradizionali non funzionano bene perché, per altezze di presa esigue, sottostimano lo scarto quadratico medio in Z, mentre in XY sono sostanzialmente coerenti con il *GSD*.

⁶³ *ivi*, pp. 50 - 56.

⁶⁴ è un'organizzazione di ricerca applicata nella fornitura, gestione e consegna dei dati territoriali per agenzie nazionali di mappatura del territorio, università di ricerca, industria e settore privato.

Le regole di Fraser sottostimano le precisioni: sono circa 7 - 9 volte più piccole delle regole più coerenti.

Infine le regole *EuroSDR* funzionano bene nel caso di prese aeree che seguono i nuovi schemi di volo.

2.1.10. Fasi del processo fotogrammetrico

Il processo fotogrammetrico si suddivide in più fasi, ciascuna delle quali richiede un'attenta progettazione e costanti verifiche.

2.1.10.1. Presa

La presa fotogrammetrica è la fase durante la quale si effettua il volo aereo o l'acquisizione terrestre mediante il quale vengono catturati i fotogrammi o gli eventuali video necessari a espletare le pratiche fotogrammetriche.

Questa fase prevede un momento iniziale di *planning* durante il quale si calcolano una serie di parametri fondamentali per ottenere un progetto di volo consono alle esigenze.

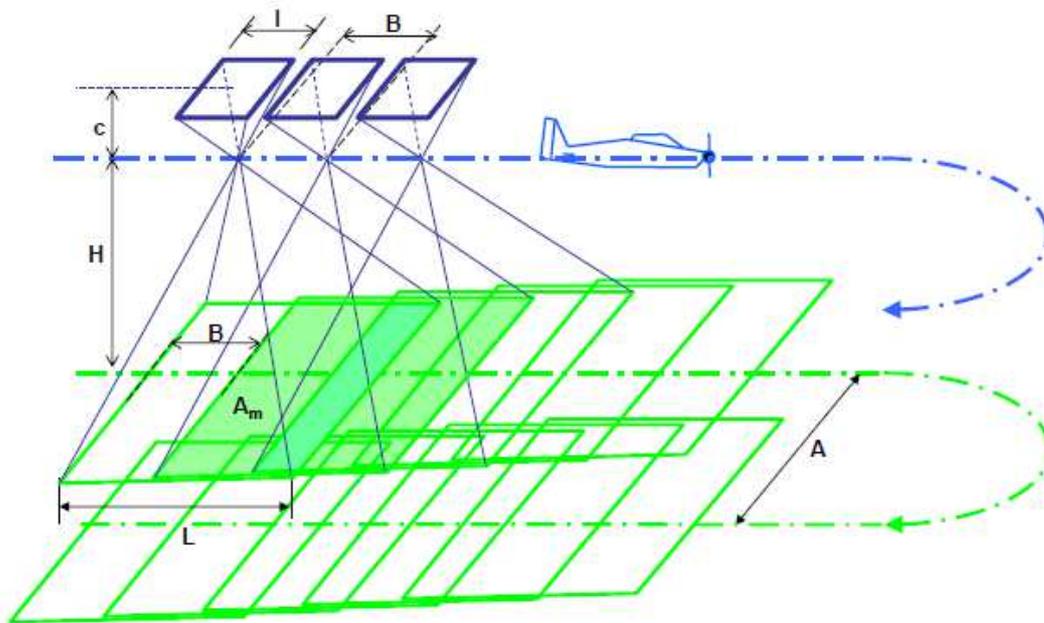


Figura 15: schema del volo fotogrammetrico dove: B = base di presa o avanzamento, H = quota relativa di volo, L = lato dell'area oggetto fotografata, l = lato dell'immagine, A = interasse tra le strisciate, A_m = area del modello. Da notare la presenza del ricoprimento longitudinale lungo il percorso di volo e del ricoprimento trasversale opposto ad esso tra una striscia e l'altra. Fonte: A. M. LINGUA, *Capitolati per la produzione di cartografia numerica, i metadati, fotogrammetria diretta, droni*, Politecnico di Torino, dispense del corso di cartografia numerica e GIS, a.a. 2016/2017, p. 5.

Oggi, a seconda degli obiettivi prefissati, i calcoli possono essere eseguiti da software di calcolo implementati in applicazioni commerciali sviluppate a pari passo con i velivoli utilizzati, come per esempio droni UAV.

Qui di seguito si riporta una tabella riassuntiva di alcuni parametri interessanti il *planning* di volo nel caso di presa aerea. Invertendo queste formule se ne ricavano molte altre tra cui il lato dell'area fotografata "l", la base sul fotogramma "b" e la quota relativa di volo "H".

Parametro	Formula
Fattore di scala medio	$m_b = H/c = L/l$
Base per un ricoprimento $\eta\%$	$B = L \left(1 - \frac{\eta}{100}\right)$
Interasse tra strisciate per ricoprimento trasversale $\gamma\%$	$A = L \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right)$
Numero di modelli per strisciata	$n_m = \left(\frac{L}{B} + 1\right)$
Numero di fotogrammi per strisciata	$n_b = (n_m + 1)$
Numero di strisciate per blocco	$n_s = \left(\frac{Q}{A} + 1\right)$
Area coperta da un modello	$A_m = L(L - B)$
Intervallo di scatto [s]	$A_t = \frac{B}{velocità} \geq 2.0 \text{ s}$

Tabella 1: parametri utilizzati durante il *planning* di volo nel caso di presa aerea. Fonte: A. M. LINGUA, *Capitolati per la produzione di cartografia numerica...*, pp. 5 - 6.

Il ricoprimento è la porzione di superficie di sovrapposizione comune di due fotogrammi, tramite i quali si potranno visualizzare le medesime informazioni grafiche.

La strisciata è una sequenza di fotogrammi lungo la stessa direzione di presa.

Generalmente i valori di ricoprimento standard di un blocco fotogrammetrico sono:

1. secondo lo schema classico:
 - 60 % longitudinale,
 - 20% trasversale;
2. secondo schema moderno:
 - 80% longitudinale,
 - 60% trasversale.

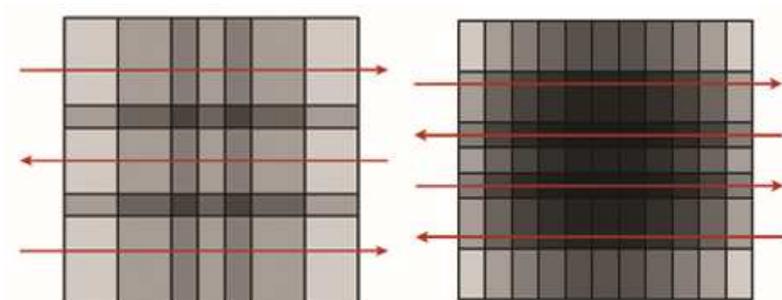


Figura 16: a sinistra il blocco fotogrammetrico secondo lo schema classico, a destra quello secondo lo schema moderno. Fonte: A. M. LINGUA, *Fotogrammetria da drone...*, p. 37.

La strutturazione delle strisciate e i valori di ricoprimento possono variare anche a seconda delle condizioni di rilievo in cui ci si trova ad operare⁶⁵:

1. per rilievi di terreni accidentati o con oggetti in elevazione è buona prassi aumentare il valore del ricoprimento ed effettuare delle strisciate incrociate;
2. per rilievi di fiumi, strade e altre tipologie di oggetti lineari è consigliato l'impiego di almeno 3 - 4 strisciate che ne seguano l'andamento, in maniera da coprire completamente il corso;
3. per il rilievo di manufatti puntuali vengono usate immagini inclinate ottenute con un'inclinazione della camera a 45°, il ricoprimento trasversale sale al 70 % e lo scatto tra un fotogramma e l'altro è consigliato ogni 10° di rotazione;
4. per il rilievo di manufatti particolari come una chiesa con campanile vengono anche utilizzati più schemi differenti per infine comporre uno schema avanzato e poter rilevare appieno l'intero oggetto.

2.1.10.2. Appoggio

L'appoggio fotogrammetrico consiste nella disposizione sullo spazio oggetto, ovvero la materializzazione sul terreno o sul manufatto, di punti di appoggio di coordinate note, chiamati *Ground Control Point (GCP)* che dovrebbero essere distribuiti nel seguente modo⁶⁶:

- punti planimetrici: un punto in ogni modello di estremità delle strisciate, un punto ogni due modelli lungo le due strisciate di bordo, un punto ogni quattro modelli lungo le altre strisciate;
- punti altimetrici: due punti in ogni modello di estremità delle strisciate, un punto ogni modello lungo le due strisciate di bordo, un punto ogni due modelli lungo le altre strisciate;
- punti plano-altimetrici: ove presenti vengono conteggiati sia come punti planimetrici sia come punti altimetrici.

Oltre ai punti d'appoggio o *GCP* esiste un'altra categoria di punti di coordinate non note che servono a rendere più robusto il modello, essi sono i punti di controllo o *check point (CP)*. Questi dovranno essere circa il 10-20% rispetto ai *GCP*.

Nella figura successiva si possono vedere diverse tipologie di disposizione di *GCPs* a seconda dei diversi tipi di velivoli utilizzati e delle diverse percentuali di ricoprimento del volo fotogrammetrico:

- La prima immagine in alto a sinistra rappresenta lo schema base della disposizione dei punti d'appoggio con un ricoprimento trasversale del 20%;

⁶⁵ ivi, pp. 38 - 43.

⁶⁶ ivi, p. 59.

- la seconda in alto a destra rappresenta la disposizione dei punti d'appoggio con ricoprimento trasversale del 60%;
- la terza in basso a sinistra rappresenta la disposizione dei punti d'appoggio con ricoprimento trasversale del 20% e l'utilizzo di sistemi GNSS e IMU;
- la quarta in basso al centro rappresenta la disposizione dei punti d'appoggio con ricoprimento trasversale del 20%, l'utilizzo di sistemi GNSS e IMU e di strisciate di bordo;
- la quinta in basso a destra rappresenta la disposizione dei punti d'appoggio con ricoprimento trasversale del 60% e l'utilizzo di sistemi GNSS e IMU.

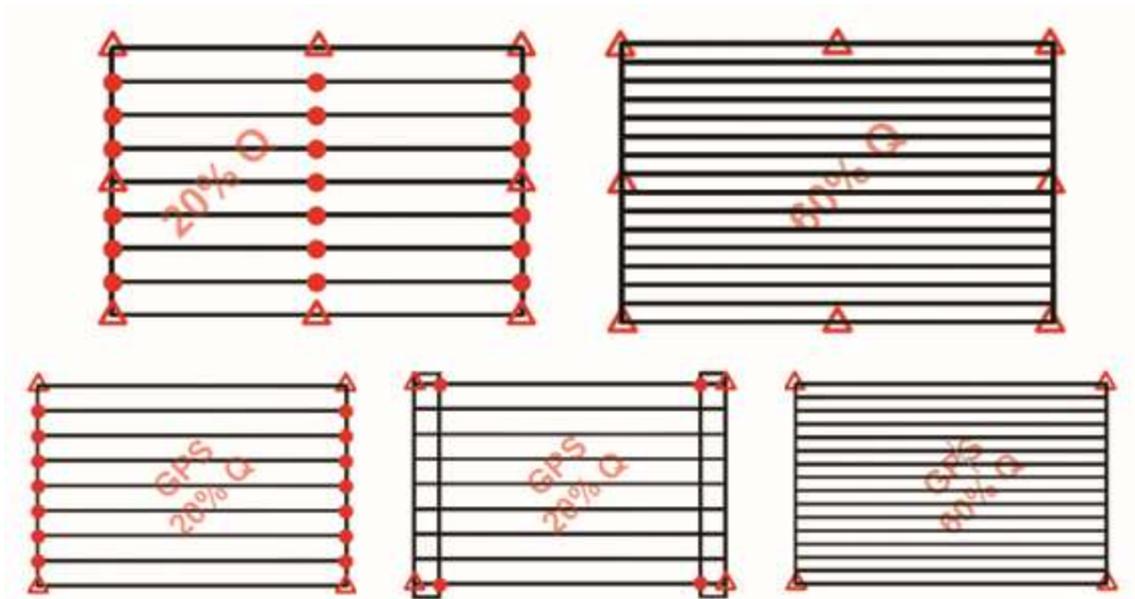


Figura 17: diverse tipologie di appoggio fotogrammetrico. I triangoli rappresentano i punti di appoggio con coordinate XYZ note, mentre i pallini pieni rappresentano i punti di appoggio altimetrici. Fonte: A. M. LINGUA, *Fotogrammetria da drone...*, pp. 61 - 62.

Si conclude l'analisi dei diversi schemi di posizionamento dei punti di appoggio evidenziando che utilizzando sistemi di posizionamento e piattaforme inerziali quali GNSS e IMU e aumentando il numero di strisciate longitudinali (maggiore ricoprimento trasversale), la materializzazione dei GCP diminuisce in maniera significativa, snellendo la fase di appoggio.

I punti d'appoggio, per essere riconosciuti in fase di restituzione nei fotogrammi e quindi poterli inquadrare nel sistema di coordinate di rilievo, dovranno essere identificati in maniera univoca e precisa. Pertanto verranno presi sia punti naturali significativi come spigoli di tombini, marchiapiedi, case, ecc., sia punti artificiali e/o presegnalizzati come i marker o i target codificati.

2.1.10.3. Orientamento

Come già esposto nei paragrafi precedenti l'orientamento della camera si suddivide in due parti: l'orientamento interno e l'orientamento esterno atti a determinare rispettivamente la posizione del centro di proiezione, ovvero il "centro della camera", rispetto al fotogramma il primo e la posizione del sistema camera - fotogramma rispetto allo spazio.

Tra le varie tipologie di orientamento esterno si possono trovare⁶⁷:

- l'orientamento esterno di un solo fotogramma il quale necessita di almeno tre punti tridimensionali di appoggio. Nella realtà se ne usano dai quattro ai sei punti di appoggio e questo modello non sfrutta le informazioni preziose che possono dare le coppie di raggi omologhi caratteristici di almeno una coppia di fotogrammi.
- L'orientamento esterno di due fotogrammi in una fase sola il quale necessita sia di punti di appoggio sia di *check point*.
- L'orientamento esterno di due fotogrammi in due fasi consecutive che prevede:
 - prima quello relativo con lo scopo di generare un modello, ossia far sì che le infinite coppie di raggi omologhi si intersechino;
 - successivamente quello assoluto con lo scopo di relegare al modello la corretta posizione nello spazio mediante una rototraslazione spaziale con variazione isotropa di scala.
- La triangolazione fotogrammetrica consistente nell'orientamento simultaneo di tutti i fotogrammi che compongono un blocco fotogrammetrico. Può essere eseguita tramite:
 - compensazione a modelli indipendenti nella quale si parte dalle coordinate modello dei punti di appoggio e di quelle dei *check point* di ogni singolo modello composto da coppie di fotogrammi per arrivare alle rispettive coordinate oggetto.
 - compensazione a stelle proiettive o *bundle adjustment* nella quale si calcolano direttamente le relazioni tra le coordinate immagine e quelle oggetto, senza introdurre le coordinate modello come passaggio intermedio. L'entità elementare del blocco è costituita dal singolo fotogramma.

2.1.10.4. Restituzione

La restituzione fotogrammetrica è la fase attraverso la quale si analizzano le informazioni date dalle immagini ottenute dalla presa fotogrammetrica e le coordinate

⁶⁷ A. M. LINGUA, *La fotogrammetria...*, pp. 71 - 94.

ricavate dal rilievo celerimetrico della rete d'inquadramento a cui si appoggia il rilievo fotogrammetrico.

Diverse sono le metodologie di restituzione fotogrammetrica che si sono susseguite nel corso della seconda metà del XX secolo in base alle scoperte tecnologiche verificatesi.

Tra le prime tecnologie di restituzione si possono annoverare gli stereocomparatori, apparati meccanici che permettevano di ricostruire singoli modelli di coppie omologhe di fotogrammi. Con l'avvento dei *computer*, gli stereocomparatori sono stati implementati per poter trasmettere informazioni circa i movimenti effettuati per la collimazione dei punti ai calcolatori stessi, così da poter calcolare le rispettive coordinate in tempi più brevi.

Ulteriore passo avanti per il campo della restituzione è stato l'avvento della *computer vision* e della *structure from motion* o *SfM*.

Grazie a ciò e allo sviluppo di software fotogrammetrici commerciali o *open source* tutta questa fase viene eseguita in maniera più o meno automatica al calcolatore.

I fondamenti nozionistici e analitici e le operazioni e i risultati possibili vengono esposti nel paragrafo 2.2.

2.1.10.5. Integrazione, editing e rappresentazione

La fase di integrazione o ricognizione consiste nel completamento di tutte quelle informazioni che l'operatore, in fase di restituzione, intuisce come mancanti.

Queste dovranno essere di fatto integrate successivamente dopo aver effettuato una ricognizione terrestre o informatica. Gli aspetti principali di una fase di integrazione possono assolversi tramite operazioni di⁶⁸:

- sgrondatura, ovvero la determinazione dello sporto degli edifici rilevati durante un volo fotogrammetrico a scala territoriale;
- la classificazione delle strade;
- la determinazione della toponomastica;
- la continuità di viabilità minore;
- e tutti quegli aspetti che dai singoli fotogrammi non si possono rilevare.

La fase di *editing* grafico e alfanumerico deve consentire all'operatore di eseguire, sul file di restituzione, tutta una serie di modifiche, integrazioni e cancellazioni vengono abitualmente effettuati in fase di disegno finale, allo scopo di⁶⁹:

- tenere conto delle indicazioni del restitutore sulla minuta di restituzione;

⁶⁸ A. M. LINGUA, *Capitolati per la produzione di cartografia numerica, i metadati, fotogrammetria diretta, droni*, Politecnico di Torino, dispense del corso di cartografia numerica e GIS, a.a. 2016/2017, p. 10.

⁶⁹ ibidem.

- integrare la restituzione con le indicazioni provenienti dalla fase di ricognizione sul terreno o da altre fonti (correzione di errori di fotointerpretazione, integrazioni metriche delle zone defilate, introduzione della toponomastica);
- effettuare la ricostruzione delle congruenze grafiche o geometriche.

Infine la rappresentazione consiste nella vettorializzazione di tutte le quelle forme che compongono l'oggetto o gli oggetti facenti parte del rilievo e che derivano direttamente come output dalla fase restitutiva.

2.1.11. Risultati della fotogrammetria: modelli altimetrici numerici e Ortofoto

2.1.11.1. I modelli altimetrici numerici

Per definizione un modello altimetrico è *“un insieme di dati che permette il calcolo per interpolazione della quota di un punto arbitrario del terreno (o della superficie) che viene descritto con una precisione assegnata”*⁷⁰.

Il modello altimetrico è una valida alternativa all'uso delle tradizionali curve di livello, in quanto quest'ultime sono destinate principalmente alla visualizzazione del terreno mentre i dati di un modello altimetrico forniscono i valori di quota della regione rappresentata in un formato adatto alla lettura numerica da parte di un computer.

In base al contenuto, i modelli altimetrici si suddividono in:

- *Digital Elevation Model (DEM) o Digital Terrain Model (DTM)*: che descrive la sola superficie del terreno;
- *Digital Surface Model (DSM)*: che descrive la superficie del terreno rivestita di tutti quegli elementi strutturali o naturali che giacciono su di essa, quali edifici, ponti, alberi, ecc.

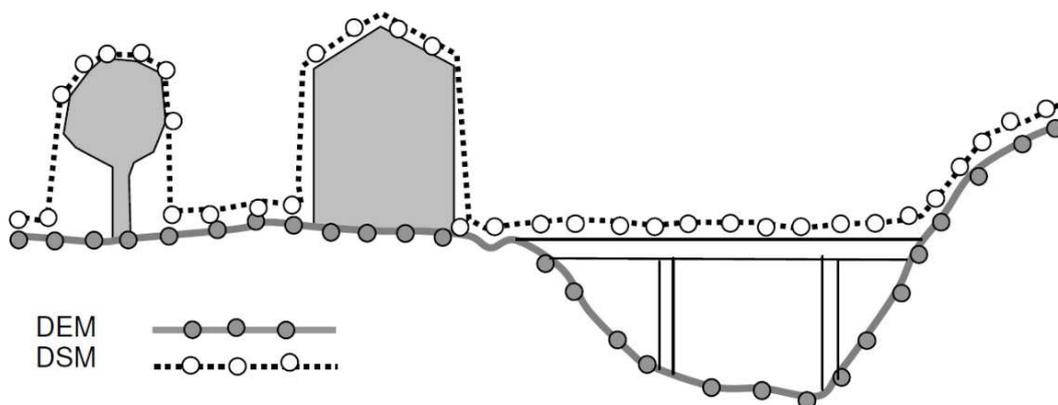


Figura 18: differenze tra il DEM e il DSM. Fonte: AA. VV., *Ortoimmagini 10K...*, p. 16.

⁷⁰ AA. VV., *Ortoimmagini 10K e modelli altimetrici*, CISIS, op. cit. p. 15.

Ciascuna delle due tipologie di modelli digitali vengono caratterizzati da⁷¹:

1. un insieme di punti chiamato “seminato” disposto:
 - irregolarmente sotto forma di:
 - *point cloud* ovvero un insieme sparso di punti di coordinate note (E, N, Q) senza alcuna regola predefinita di interpretazione del dato altimetrico. Le tecniche di interpolazione sono svariate e i *software* che restituiscono il modello altimetrico utilizzano quella che più gli è consona.
 - “TIN” o “*Triangulated Irregular Network*” ovvero un insieme di punti di coordinate note, disposti nello spazio e collegati mediante una serie continua di triangoli.
 - Regolarmente attraverso l’uso di griglie con spaziatura uniforme, dove i vertici corrispondono ai punti di coordinate note.
2. Un insieme di linee caratteristiche del terreno (*DTM*) o della superficie descritta (*DSM*) chiamate “*breakline*” che uniscono i punti caratterizzati da brusche variazioni di pendenza.
3. Un insieme di linee e punti che descrivono gli elementi corografici.
4. Un insieme di aree escluse dai *DSM* e *DTM* chiamate “zone morte”.
5. Un insieme di linee che delimitano l’area rappresentata.

Nel caso si raggiunga un’elevata densità dei punti le tipologie precedentemente elencate diventano:

- *Dense Digital Elevation Model (DDEM)* o *Dense Digital Terrain Model (DDTM)*;
- *Dense Digital Surface Model (DDSM)*.

In tale circostanza i modelli altimetrici possono anche non essere più descritti dalle *breakline* grazie all’elevata densità dei punti costituenti il modello altimetrico. Viceversa non si possono trascurare in alcun modo la delimitazione delle “zone morte” e i limiti delle porzioni di territorio rilevate.

2.1.11.2. L’Ortofoto

La fotogrammetria permette la produzione di cartografie fotografiche sfruttando il contenuto radiometrico delle immagini acquisite.

La cartografia fotografica è “*una carta, metricamente corretta, in cui la planimetria è rappresentata in forma fotografica, derivata da una o più foto aeree della zona*”⁷² oggetto del rilievo.

⁷¹ *ivi*, pp. 16 - 18.

⁷² A. M. LINGUA, *Fotogrammetria digitale*, Politecnico di Torino, dispense del corso di cartografia numerica e GIS, a.a. 2016/2017, op. cit. p. 34.

La cartografia fotografica permette di integrare le informazioni fornite dalle tradizionali carte al tratto o dalle carte numeriche semplificando la lettura del prodotto.

L'Ortofoto è un prodotto della famiglia della cartografia fotografica, che si inserisce accanto alle tradizionali "Fotocarte" e i "Fotopiani"⁷³, le quali vengono ottenute mediante raddrizzamento di singoli fotogrammi attraverso l'utilizzo di equazioni di omografia.

L'Ortofoto nasce in quanto la porzione di territorio rilevato non può essere considerato un piano e le equazioni di omografia non sono sufficienti per eliminare le deformazioni prospettiche sul terreno.

Si ricorre quindi alla tecnica dell'ortoproiezione⁷⁴ che permette di trasformare geometricamente un'immagine fotografica in un'immagine che può essere considerata come una proiezione cartografica o ortogonale dell'oggetto in esame⁷⁵.

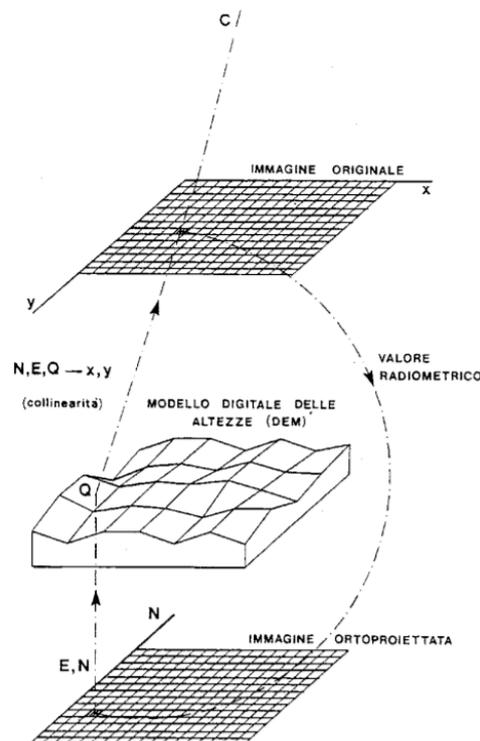


Figura 19: ortoproiezione digitale. Fonte: M. LO BRUTTO, *Geomatica e modellazione digitale del terreno, elementi di fotogrammetria digitale*, 2005, p. 24.

⁷³ Un Fotopiano è una carta fotografica senza sovrapposizione di informazioni ulteriori rispetto al contenuto del tono radiometrico come per esempio punti quotati, curve di livello, toponomastica. Una Fotocarta invece presenta oltre al tono radiometrico anche tutte le altre tipologie di informazioni appena citate.

⁷⁴ La tecnica prevede che per ogni *pixel*: si determinano le coordinate planimetriche (E, N), si interpola la quota (Z) mediante un modello altimetrico, si proietta il punto 3D sull'immagine (ξ, η) mediante un apposito modello, si determina il valore radiometrico da associare alla posizione immagine mediante ricampionamento, si scrive il valore radiometrico nel *pixel* dell'Ortofoto.

⁷⁵ *ivi*, pp. 35 - 40.

Per poter eseguire un'ortoproiezione serve conoscere la "forma" dell'oggetto rilevato, perciò bisogna affiancare l'uso di un modello altimetrico numerico a quello dei fotogrammi derivanti dal processo di rilievo.

In base alla precisione e gestione delle deformazioni prospettiche tipiche di qualsiasi prodotto fotografico, l'Ortofoto viene classificata nel seguente modo⁷⁶:

- Ortofoto speditiva: prodotta con tecniche rapide, utilizzata per la gestione delle emergenze ambientali e caratterizzata da precisioni grafiche corrispondenti a *"0,3 mm alla scala nominale dell'Ortofoto per elementi posti sul terreno e a 0,9 mm alla scala nominale dell'Ortofoto per gli oggetti in elevazione rispetto al terreno"*⁷⁷.
- Ortofoto ordinaria: prodotta con un'ortoproiezione utilizzando un DTM il quale restituisce però delle deformazioni prospettiche residue dovute ad un modello di forma non corretto; la precisione grafica è di *"0,2 mm alla scala nominale dell'Ortofoto per gli elementi posti sul terreno e di 0,6 mm alla scala nominale dell'Ortofoto per elementi in elevazione rispetto al terreno"*⁷⁸.
- Ortofoto di precisione: prodotta con un'ortoproiezione utilizzando sia modelli di forma corretti (DSM o DDSM) sia l'approccio multi-immagine, in modo da eliminare qualsiasi deformazione prospettica e ottenere una completa descrizione fotografica dell'oggetto rilevato; la precisione grafica è di *"0,2 mm alla scala nominale dell'Ortofoto sia per gli elementi posti sul terreno, sia per gli oggetti o le parti di oggetti in elevazione rispetto al terreno"*⁷⁹.

2.2. Computer Vision e Structure from Motion

La *Computer Vision* (o visione computazionale o visione artificiale) è una disciplina dell'informatica che tratta l'estrazione delle informazioni dalle immagini. Le informazioni, sotto forma di dati possono essere di natura simbolica o numerica⁸⁰. Nel primo caso si sviluppa la problematica di scoprire cosa è presente nella scena catturata dalle immagini (quali identità e quali relazioni le legano tra loro gli oggetti), nel secondo caso quella di scoprire dove si trovano gli oggetti immortalati (coordinate spaziali).

Essa nasce come branca della IA (Intelligenza Artificiale) negli anni '70 senza proporsi di replicare la visione umana, bensì di studiarla, analizzarla e comprenderla appieno, per

⁷⁶ ivi, pp. 41 - 49.

⁷⁷ ivi, op. cit. p. 41.

⁷⁸ ivi, op. cit. p. 41.

⁷⁹ ivi, op. cit. p. 42.

⁸⁰ A. FUSIELLO, *Visione computazionale, tecniche di ricostruzione tridimensionale*, Franco Angeli, Milano 2013, p. 18.

poi applicare i teoremi maturati, di comune accordo con le strumentazioni tecnologiche sviluppate, ai vari casi pratici migliorandone i risultati di volta in volta.

La *Computer Vision* (CV) si può suddividere in⁸¹:

- visione di basso livello, la quale si occupa dell'estrazione di determinate proprietà fisiche dell'ambiente visibile (profondità, forma 3D, contorni degli oggetti) senza possederne una conoscenza a priori.
- visione di alto livello, la quale si occupa dell'estrazione di proprietà delle forme, di relazioni spaziali, di riconoscimento e di classificazione di oggetti, dipendendone dall'obiettivo della computazione e dalla conoscenza a priori associata agli oggetti.

La ricostruzione 3D della scena catturata dalle immagini, intesa come visione di basso livello, è possibile analizzando attentamente:

- la descrizione geometrica della scena;
- la descrizione fotometrica della scena;
- la descrizione dell'apparato della camera di acquisizione.

Il passo successivo è l'inversione del processo della presa fotografica, ovvero la proiezione in ambiente digitale dei dati acquisiti dell'oggetto reale sotto forma di modello 3D, possibilmente georeferenziato.

Negli ultimi decenni, i recenti sviluppi degli algoritmi di *image processing* e *computer vision*, con conseguente produzione di svariati *software* computazionali e mezzi *UAV*, come i droni a pilotaggio remoto, hanno restituito alla tecnica fotogrammetrica quella competitività nel mondo del rilievo topografico che da tempo non possedeva più, fornendole validi mezzi per la restituzione di nuvole di punti 3D e modelli digitali di oggetti, monumenti e territori pari alle tecniche di scansione *laser*.

Gli sviluppi si sono concentrati principalmente⁸²:

- sull'automazione della fase di orientamento delle immagini, il quale avviene tramite l'utilizzo di algoritmi (es *SIFT*)⁸³ che individuano i punti di interesse al posto dell'operatore applicando al processo stimatori robusti per minimizzare gli errori (es *RANSAC*)⁸⁴. Le corrispondenze tra i punti vengono utilizzate per stimare i parametri di orientamento interno ed esterno e le coordinate dei punti 3D

⁸¹ D. ULLMAN, *High - level Vision*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1996.

⁸² E. NOCERINO, F. REMONDINO, *Usa consapevole di software speditivi per ricostruzioni 3D*, GEOmedia, 2016.

⁸³ *SIFT: Scale Invariant Feature Transform* è un algoritmo che permette di rilevare e descrivere caratteristiche (*feature*) locali in immagini.

⁸⁴ *RANSAC: RANdom SAmple Consensus* è un metodo iterativo per la stima dei parametri di un modello matematico a partire da un insieme di dati contenente *outlier* (valori anomali). È un algoritmo non deterministico nel senso che produce un risultato corretto solo con una data probabilità, che aumenta al crescere delle iterazioni consentite.

estratti. Il procedimento viene ricondotto alla tecnica della *Structure from Motion* o *SfM*.

- Sulla creazione automatica di nuvole di punti dense, grazie ad algoritmi di *dense image matching* che raggiungono densità elevate quasi *pixel - per - pixel*.

2.2.1. Definizione di *Structure from Motion*

La *Structure from Motion* è una tecnica della CV che genera strutture di dati 3D a partire da sequenze di immagini 2D.

In natura essa fa riferimento al fenomeno per cui gli esseri umani ed altri possono ricostruire “strutture 3D” da un campo in movimento in proiezione 2D (retina) di un oggetto o una scena in movimento.

L’approccio alla tecnica, definito da Jeffrey Ullman nel 1979, propone il calcolo simultaneo dei parametri di orientamento interno delle camere, la posizione degli scatti (*motion*) e una prima ricostruzione 3D sparsa della scena rilevata (*structure*)⁸⁵. Il risultato finale è dunque la costruzione in uno spazio modello di un blocco di fotogrammi che generano una *sparse cloud* di punti.

Riprendendo i tre aspetti della CV di basso livello, la descrizione della geometria della scena può essere vista come la parte di *structure*, perciò ci si pone come interrogativo: dati punti immagine 2D omologhi in due o più immagini, dove sono i corrispondenti punti oggetto 3D?

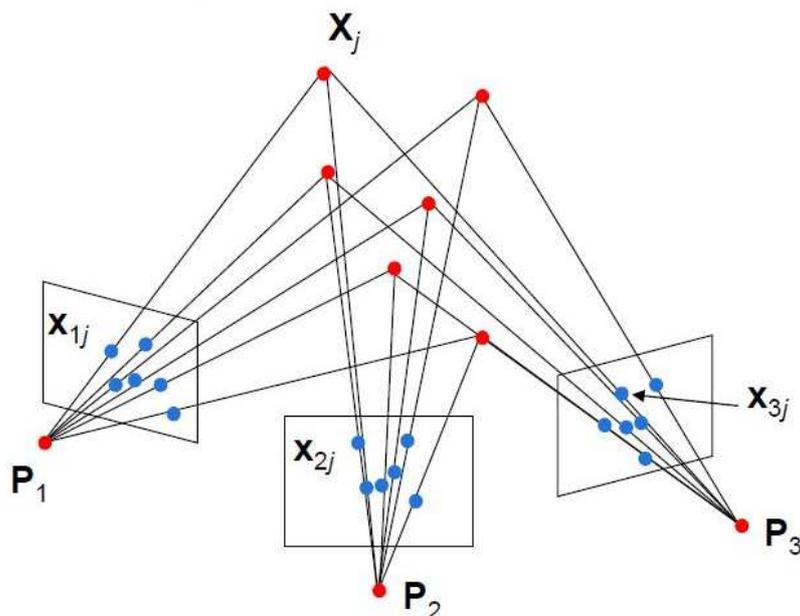


Figura 20: approccio geometrico di partenza alla base della SfM. Fonte: N. Haala, *High density image matching*, Module 1..., p. 21.

⁸⁵ ibidem.

Mentre la descrizione della geometria della camera può essere paragonata alla *motion*, perciò: dato un insieme di punti omologhi in due o più immagini qual è la matrice della camera di queste viste?

Infine la corrispondenza o *stereo matching* consiste nell'accoppiamento tra punti di due immagini che sono proiezione dello stesso punto della scena. Ci si chiede allora, dato un punto in una sola immagine, dov'è la posizione del punto omologo nell'altra?

Perciò, dato un numero di "n" punti omologhi in "m" immagini, il problema si riassume nella ricerca delle coordinate tridimensionali X_j dell'insieme di punti omologhi 2D e delle matrici delle camere P_i che ne determinano la posa nella scena (orientamento interno ed esterno)⁸⁶, dove:

- $x_{ij} = P_j X_j$,
- $i = 1, \dots, m$,
- $j = 1, \dots, n$.

Prima di risolvere i quesiti esposti bisogna fare alcune considerazioni sulle differenze che intercorrono tra la *structure from motion* e la fotogrammetria classica per la determinazione dei parametri di orientamento interno ed esterno.

2.2.2. Geometria della formazione dell'immagine

Le immagini, secondo il generico modello di formazione della *camera stenopeica*, vengono acquisite raccogliendo la luce riflessa degli oggetti della scena e proiettandola su un piano (piano immagine o quadro) attraverso un foro (centro di proiezione o punto di vista).

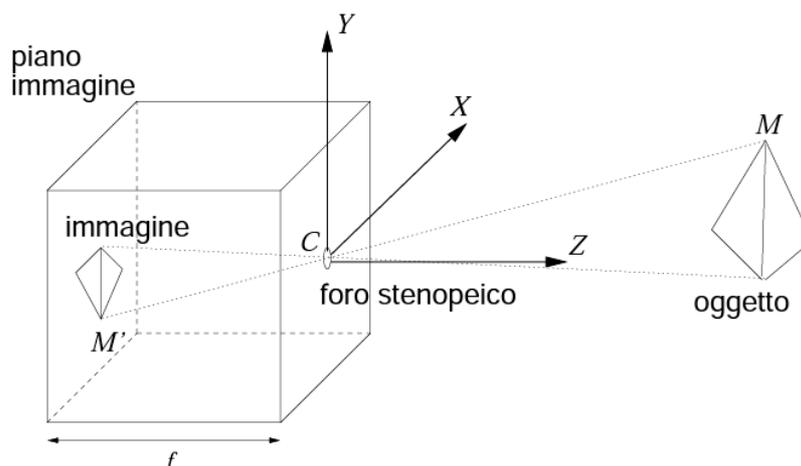


Figura 21: formazione dell'immagine in una camera stenopeica. Fonte: A. Fusiello, *Visione computazionale...*, p. 22.

⁸⁶ N. HAALA, *High density image matching, Module 1: Image Orientation and Object to Image Mapping, Part a: Computation of orientation parameters*, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, p. 21.

In un'immagine digitale il quadro è costituito da sensori *CCD* o *CMOS* che convertono l'intensità della radiazione luminosa incidente in un potenziale elettrico. La matrice del sensore viene a sua volta convertita in una matrice numerica $N \times M$ di valori interi. Ciascun elemento componente la matrice prende il nome di *pixel* (*picture element*). Il foro invece è rappresentato da un insieme di lenti sottili.

Osservando l'immagine sopra esposta, assumendo come "c" la lunghezza focale (f nell'immagine), come X, Y, Z le coordinate del punto oggetto "M" e come X', Y', Z' le coordinate del punto immagine "m", attraverso la similitudine dei triangoli si può sostenere che:

$$X' = -c \frac{X}{Z} \quad [2.28] \quad Y' = -c \frac{Y}{Z} \quad [2.29] \quad Z = -c \quad [2.30]$$

Queste equazioni definiscono il processo di formazione dell'immagine che prende il nome di proiezione prospettica o proiezione centrale⁸⁷.

2.2.3. Calibrazione della camera: matrice di proiezione prospettica

Al modello appena esposto dobbiamo inserire un sistema di riferimento cartesiano destrorso (X, Y, Z) per poter esprimere le coordinate dei punti nello spazio oggetto e un sistema di riferimento (u, v) per il piano dell'immagine per poter esprimere quelle dei punti proiettati nello spazio immagine.

$$\left\{ \begin{array}{l} u = -c \frac{X}{Z} \quad [2.31] \\ v = -c \frac{Y}{Z} \quad [2.32] \end{array} \right.$$

In questo caso la trasformazione delle coordinate 3D a quelle 2D non è lineare a causa del rapporto con la terza dimensione Z. Il problema si risolve utilizzando le coordinate omogenee. I punti nello spazio immagine (m) e quelli nello spazio oggetto (M) avranno come coordinate formulazioni del genere:

$$m = x = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad [2.33] \quad M = X = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad [2.34]$$

ponendo la terza coordinata pari a 1 ed escludendo i punti all'infinito.

⁸⁷ A. FUSIELLO, *Visione computazionale...*, Franco Angeli, Milano 2013, p. 22.

Includendo i punti all'infinito e moltiplicando quindi la [2.33] per la terza componente generica Z , l'equazione di proiezione prospettica che lega le coordinate di "m" a quelle di "M" si scrive nel seguente modo:

$$Z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} -cX/Z \\ -cY/Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -cX \\ -cY \\ Z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_P \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad [2.35]$$

che sotto forma di matrice diventa:

$$x = \frac{1}{Z} PX \simeq PX \quad [2.36]$$

dove la matrice [3x4] "P" rappresenta il modello geometrico della fotocamera e viene chiamata matrice della fotocamera o matrice di proiezione prospettica (*MPP*) e il simbolo \simeq significa che l'equazione necessita della presenza di un fattore di scala per essere completata⁸⁸. Infatti in un modello realistico di una fotocamera, oltre a considerare la sola trasformazione prospettica, bisogna tenere conto anche di una trasformazione rigida tra il sistema di riferimento della fotocamera e quello oggetto e del cambio di coordinate da metri (unità di misura della dimensione fisica dei punti 3D) a *pixel* (unità di misura nel piano del sensore) chiamato *pixelizzazione*.⁸⁹

La *pixelizzazione* viene applicata alla matrice P del modello semplificato con una matrice che permette di⁹⁰:

- effettuare la traslazione riferita al punto principale (di coordinate u_0, v_0);
- il cambio di unità di misura (k_u, k_v che consistono nell'inverso della dimensione del pixel lungo le due direzioni u e v);
- l'inversione della direzione degli assi (applicando il segno negativo).

La trasformazione è di tipo affine e consiste nella seguente espressione:

$$P = \begin{bmatrix} -k_u & 0 & u_0 \\ 0 & -k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -ck_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & -ck_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = K[I|0] \quad [2.37]$$

dove, essendo $\alpha_u = -ck_u$ e $\alpha_v = -ck_v$ rispettivamente le lunghezze focali orizzontali e verticali espresse in *pixel*:

⁸⁸ ivi, p. 33.

⁸⁹ ivi, p. 31.

⁹⁰ ivi, p. 35.

- la matrice “K” equivale a:

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [2.38]$$

- la matrice [I|0] identifica l’essenza della trasformazione prospettica, senza parametri:

$$[I|0] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad [2.39]$$

Il modello generalmente prevede anche un ulteriore parametro “ θ ” che corrisponde all’angolo compreso tra gli assi “u” e “v”. Esso modifica la formula della matrice K nel seguente modo:

$$K = \begin{bmatrix} -ck_u & -ck_u/\cot\theta & u_0 \\ 0 & -ck_v/\sin\theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & s & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [2.40]$$

essendo:

- “ α ” e “ β ” le due componenti della focale,
- “ u_0 ” e “ v_0 ” le coordinate del punto principale,
- $s = -ck_u/\cot\theta$ il parametro indicante lo *skew* (distorsione),

i parametri interni della camera⁹¹.

Quindi la [2.36] che lega i punti immagine a quelli oggetto si trasforma in:

$$x = PX = K[I|0]X. \quad [2.41]$$

La trasformazione rigida tra il sistema di riferimento della fotocamera e quello oggetto tiene conto della non coincidenza tra i due sistemi. Essa consiste in una rototraslazione spaziale della camera rispetto al sistema di riferimento oggetto.

Parametrizzando opportunamente la rotazione, l’orientamento esterno della camera dipende da sei parametri: tre per la rotazione e tre per la traslazione.

⁹¹ A. M. LINGUA, *Elaborazione dei dati acquisiti: fotogrammetria e Structure from Motion*, Politecnico di Torino, 2017, p. 11.

I tre parametri che regolano la rotazione sono contenuti nella seguente matrice:

$$R^T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad [2.42]$$

che consiste nella trasposta della matrice di rotazione; mentre i tre parametri che impongono la traslazione sono definiti dalla seguente forma matriciale⁹²:

$$t = (-X_0, -Y_0, -Z_0)^T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad [2.43]$$

ottenendo l'espressione finale seguente:

$$x = PX = K[R|t]X. \quad [2.44]$$

Se scriviamo la *MPP* suddividendola per righe, la inseriamo nella [3.36] e ci serviamo della [2.31] e della [2.32] generalizzandole, allora otteniamo due formule che in fotogrammetria prendono il nome di equazioni di collinearità⁹³:

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{p_1^T X}{p_3^T X} \\ v = \frac{p_2^T X}{p_3^T X} \end{array} \right. \quad [2.45]$$

$$[2.46]$$

dove per "X" si intendono le coordinate omogenee del punto "M" nello spazio oggetto (X, Y, Z, 1), "u" e "v" corrispondono alle coordinate sul piano del fotogramma, simili a "ξ" ed "η" ottenute in forma di prospettivizzazione dalla formula [2.7] e p_i^T è la i-esima componente della matrice P comprendente tutti i parametri di orientamento (sia esterno sia interno sia la distorsione). Si può dunque sostenere che con le coordinate omogenee le equazioni di collinearità in forma di prospettivizzazione diventano un prodotto matriciale.

Nella formula della *MPP* manca però la distorsione legata alla conformazione fisica dell'obbiettivo (distorsione radiale) che deve essere inserita a parte.

⁹² *ivi.* p. 12.

⁹³ A. FUSIELLO, *Visione computazionale...*, Franco Angeli, Milano 2013, pp. 37 - 38.

La formula che lega le coordinate non distorte (u, v) a quelle distorte (\hat{u}, \hat{v}) è la seguente⁹⁴:

$$\begin{cases} u = (u - u_0) \left(1 + k_1 \left(\left(\frac{u - u_0}{\alpha_u} \right)^2 + \left(\frac{v - v_0}{\alpha_v} \right)^2 \right) \right) + u_0 & [2.47] \\ v = (v - v_0) \left(1 + k_1 \left(\left(\frac{u - u_0}{\alpha_u} \right)^2 + \left(\frac{v - v_0}{\alpha_v} \right)^2 \right) \right) + v_0 & [2.48] \end{cases}$$

L'obiettivo è quello di ricavare il coefficiente di distorsione radiale k_1 per poi compensare la distorsione nell'immagine acquisita dalla fotocamera. Per far ciò bisogna assumere come nota la *MPP*, cosa che nella realtà non è. Si procede perciò iterativamente usando dei parametri approssimati fino a che questi non convergono al valore effettivo, arrivando perciò a definire in maniera accettabile (secondo un margine di errore prestabilito) sia la distorsione radiale, sia i parametri della camera e quindi la matrice p ⁹⁵.

2.2.4. Geometria epipolare

La geometria epipolare è quella legata alla visione stereoscopica. Permette di descrivere i legami geometrici che intercorrono tra due immagini di una stessa scena ottenute da fotocamere diverse o dalla stessa in movimento (orientamento e posizione differente)⁹⁶.

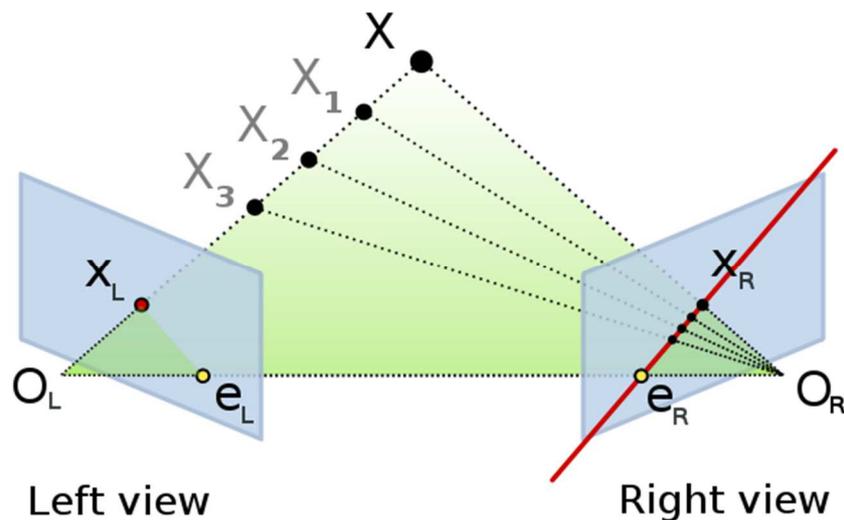


Figura 22: rappresentazione geometrica della determinazione della retta epipolare (in rosso). Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Geometria_epipolare.

⁹⁴ ivi. pp. 43 - 46.

⁹⁵ ivi, p. 46.

⁹⁶ ivi, pp. 49 - 50.

La figura riportata qua sopra rappresenta un caso di geometria epipolare dove un punto "X" 3D nello spazio oggetto viene acquisito sui due fotogrammi "destra" e "sinistra". La proiezione del punto viene identificata nel piano di ciascun fotogramma con i punti 2D " x_L " e " x_R " attraverso la trasformazione proiettiva data giustappunto dalla *MPP* ($x_L = P_L X$, $x_R = P_R X$). Proiettando i centri delle due camere l'uno sul piano immagine dall'altro si ottengono i punti $e_L = P_L O_R$, $e_R = P_R O_L$, chiamati epipoli o punti epipolari. La retta che unisce i punti " O_L " e "X", che intersecando il piano immagine della camera di sinistra materializza il punto " x_L ", proiettata sul piano immagine della camera di destra, genera una retta parallela passante per " x_R " e " e_R " ovvero le rispettive proiezioni di "X" e " O_L ". La retta in questione viene chiamata retta epipolare. Lo stesso ragionamento può essere fatto analogamente con i raggi di proiezione della camera di destra.

Invece prendendo in considerazione i punti "X", " O_L " e " O_R ", questi giacciono su un piano che prende il nome di piano epipolare.

Uno specifico piano epipolare associato a un punto "X" intercetta i piani immagine esattamente nelle rette epipolari associate a "X". Ciascun piano epipolare si incontra nella retta che unisce i due epipoli: la linea di base.

Tutto ciò ha una parte fondamentale nella ricostruzione della scena nello spazio oggetto, partendo da una coppia di immagini stereoscopiche. Infatti dato un insieme di punti omologhi, facenti parte delle due immagini, viene calcolata una matrice 3x3 chiamata matrice fondamentale "F", tale che:

$$x'Fx = 0 \quad [2.49]$$

dove x e x' sono le coordinate in forma omogenea delle coppie di punti omologhi.

Dalla matrice fondamentale vengono ricavate le *MPP* delle due camere (sinistra e destra) per poi riuscire a stimare, per ogni coppia di punti omologhi, la posizione del punto "X" sul piano del fotogramma. Perciò la matrice fondamentale contiene tutte le informazioni relative alla geometria epipolare.

Conoscendo F si può tracciare la retta epipolare di un punto arbitrario. Dato un punto in una sola immagine, la sua posizione corrispondente nell'altra immagine deve trovarsi lungo la corrispondente linea epipolare. Questo è noto come il vincolo epipolare.

Il vincolo epipolare significa che la possibile ricerca bidimensionale per l'accoppiamento di punti su due camere diverse diventa una ricerca monodimensionale lungo le linee epipolari, una volta che si conosce la geometria epipolare del sistema stereovisivo.

⁹⁷ Equazione di Longuet - Higgins. Fonte: A. FUSIELLO, *Visione computazionale...*, Franco Angeli, Milano 2013, p. 56.

Questo permette un risparmio enorme di calcolo e di eliminare un elevato numero di punti che potrebbero in caso contrario portare a corrispondenze non corrette⁹⁸.

Terminata la procedura di orientamento, il recupero della struttura procede per triangolazione fotogrammetrica la quale, dati per esempio due fotogrammi, prevede di ricostruire la posizione in coordinate assolute di un punto 3D, conoscendo le coordinate in *pixel* di due punti omologhi e le *MPP* relative alle due camere delle due immagini.⁹⁹

N.B. nel caso di orientamento relativo (parametri interni noti, moto della camera sconosciuto), la descrizione della geometria epipolare di due immagini prospettiche viene affidata alla matrice essenziale (E) che sostituisce quella fondamentale (F).

2.2.5. *Feature extraction e image matching*

Fino ad ora è stata sempre assunta come certa la possibilità di estrarre a priori un numero di corrispondenze di punti tale da consentire il calcolo della geometria epipolare, dunque la ricostruzione della scena 3D. Come avviene tutto ciò?

Non tutti i punti (*pixel*) di un immagine sono adatti al calcolo delle corrispondenze. Solo quelli appartenenti ad una regione del fotogramma, che si differenzia dal suo vicinato, possono essere rivelati in modo ripetibile e utilizzati per una ricerca dei propri omologhi negli altri fotogrammi.

Nel gergo della CV, l'estrazione automatica di zone di interesse quali punti, linee o aree, che presentano discontinuità radiometriche o tessiture utili per identificare punti omologhi con maggior facilità e precisione, viene chiamata *feature extraction*.

Invece, l'insieme delle tecniche che permettono di stabilire in modo automatico una corrispondenza tra zone di interesse estratte da due o più immagini di una stessa scena 3D vengono chiamate *image matching*.

Image processing¹⁰⁰

Per comprendere meglio la *feature extraction* e l'*image matching* bisogna introdurre il discorso dell'*image processing*.

Essa è un insieme di tecniche di miglioramento della qualità radiometrica delle immagini digitali sia per ridurre il degrado subito in fase di acquisizione (*image restoration*), sia per evidenziare specifici aspetti negli utilizzi mirati di estrazione dei punti (*image enhancement*).

⁹⁸ A. PENNISI, *Riconoscimento di azioni umane tramite hidden markov models*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica, Università di Roma "La Sapienza", 2010.

⁹⁹ Metodo linear - eigen. Fonte: A. FUSIELLO, *Visione computazionale...*, Franco Angeli, Milano 2013, pp. 50 - 53.

¹⁰⁰ A. M. LINGUA, *Fotogrammetria digitale...*, pp. 4 - 8.

Queste tecniche operano tutte sfruttando algoritmi di filtraggio che si basano sulla teoria dei segnali, infatti dal sistema immagine digitale il contenuto radiometrico viene convertito in un dominio di frequenza attraverso la trasformata di *Fourier*.

Nel dominio della frequenza un *pixel* altamente contrastato (punto di interesse o un contorno) produce alta frequenza, mentre un *pixel* con valori di contrasto ridotti rispetto all'area circostante produce bassa frequenza.

Il filtraggio consiste nell'applicazione di una matrice di convoluzione all'immagine digitale (in forma matriciale anch'essa). La matrice di convoluzione generalmente è di dimensioni dispari (3x3, 5x5, 7x7, e così via) senza raggiungere numeri elevati di righe e di colonne (uguali sempre tra di loro).

Esistono due tipologie di filtri:

- passa - basso (*LP*) che bloccano il passaggio delle frequenze al di sopra di una soglia limite detta frequenza di taglio. Nel caso in questione questi filtri vengono utilizzati per operazioni di *image - restoration*, come per esempio il filtro *gaussiano*.
- Passa alto (*HP*) che bloccano il passaggio delle frequenze inferiori della frequenza di taglio. Nel caso in questione questi filtri vengono utilizzati per operazioni di *image - enhancement* come per esempio l'operatore di *Laplace*, l'operatore *LoG* (*Laplaciano della Gaussiana*), il filtro di *Wallis*.



Figura 23: applicazione dell'operatore LoG. Fonte: A. M. LINGUA, *Fotogrammetria digitale...*, p. 7.

Feature extraction¹⁰¹

Le tecniche di estrazione vengono classificate in tre categorie:

- *interest operators* (operatori di interesse) che vengono utilizzati per estrarre punti (*pixel*) di immagini digitali per fornire buoni risultati in fase di *image matching*. Ne esistono di diverse tipologie, il più utilizzato per la tecnica fotogrammetrica è l'operatore di *Forstner* che sfrutta l'algoritmo *Least Square Matching (LSM)* applicato alla traslazione bidimensionale. In sostanza seleziona punti di interesse analizzando la dimensione e la forma degli ellissi *standard*

¹⁰¹ *ivi*, pp. 17 - 19.

d'errore forniti dalla matrice di varianza e covarianza C_{xx} del sistema di equazioni LSM.

- *Edge detectors* (riconoscimento dei contorni) che vengono utilizzati per estrarre insiemi di punti (bordi radiometrici) presenti in zone dell'immagine dove l'intensità luminosa cambia in maniera repentina, sintomo di discontinuità della profondità, delle superfici, di materiale, di illuminazione dell'ambiente circostante, ecc.
- *Region detectors* (riconoscimento di aree) che vengono utilizzati per estrarre porzioni di immagini in modo tale da garantire buoni risultati in operazioni di *image matching* su immagini stereoscopiche con forti variazioni geometriche e radiometriche.

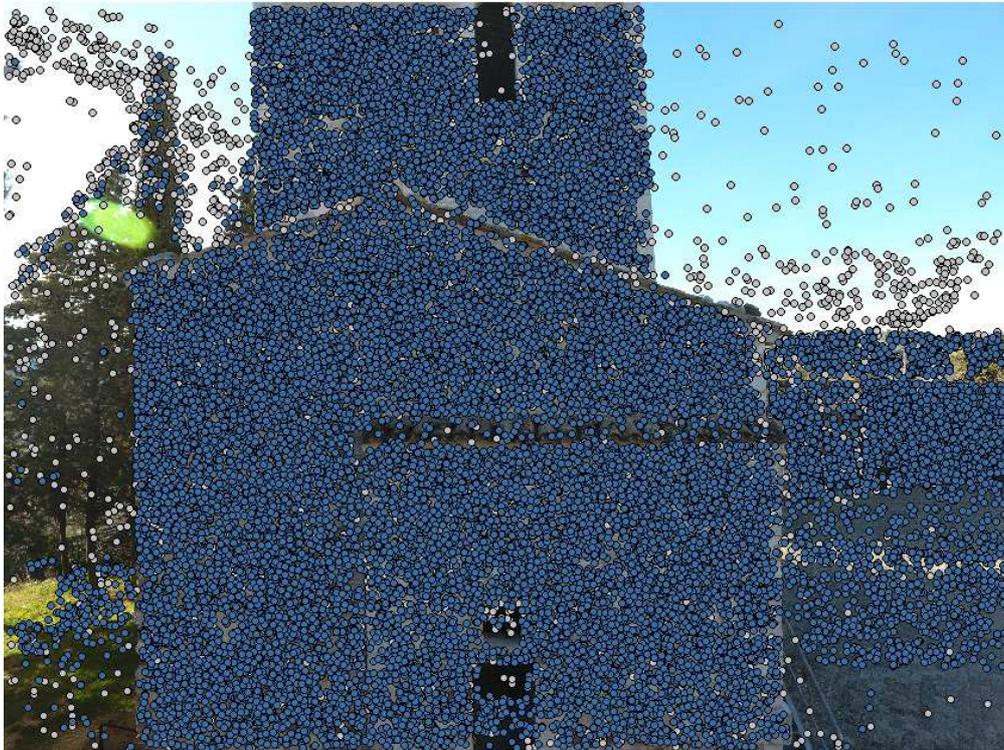


Figura 24: estrazione di punti di interesse con il software Agisoft Photoscan da un fotogramma della Torre degli Smeducci scattata dalla camera Canon FC330 del drone DJI Phantom4.

Image matching¹⁰²

Terminata l'operazione di estrazione dei punti di interesse, questi devono essere confrontati tra loro, a coppie di fotogrammi, in maniera tale da poter ottenere delle corrispondenze e quindi individuare automaticamente coppie di punti omologhi, e poter poi avviare la procedura di "misura" delle rispettive coordinate come esposto fino ad ora.

¹⁰² ivi, pp. 9 - 20.

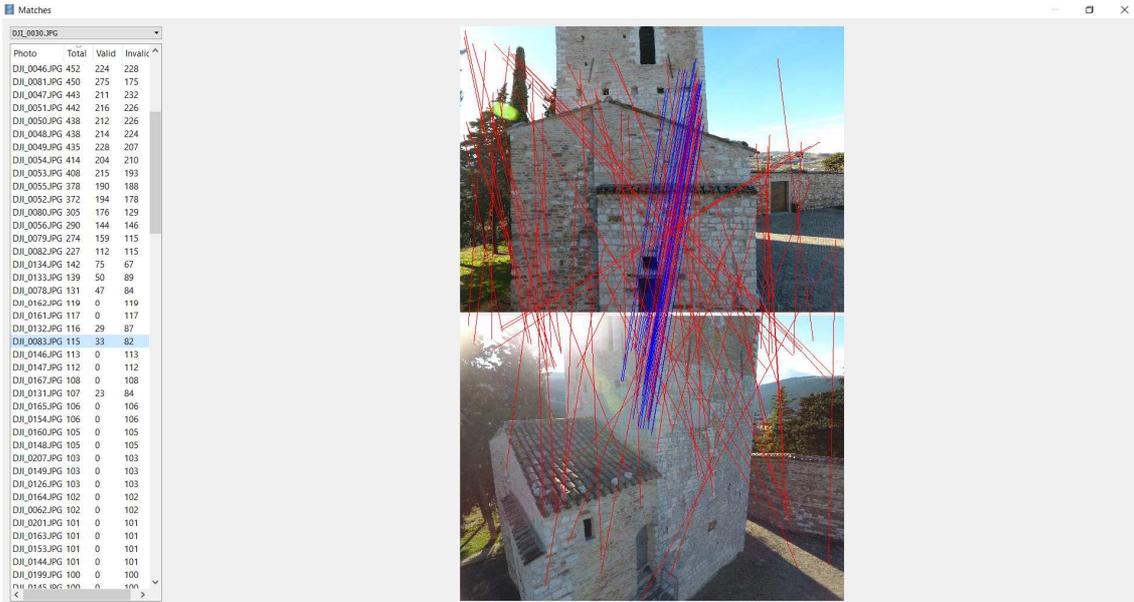


Figura 25: image matching eseguito col software Agisoft Photoscan sui punti estratti da due fotogrammi della Torre degli Smeducci scattata dalla camera Canon FC330 del drone DJI Phantom4. In blu i match validati (33), in rosso quelli invalidati (82).

Anche le tecniche di *image matching* si suddividono in tre categorie:

- **Feature Based Matching (FBM)** le quali basano la ricerca della corrispondenza automatica tra punti omologhi attraverso il confronto di un insieme di attributi che caratterizzano il contorno radiometrico (*feature*). Ad ogni *feature* è associato un vettore n - dimensionale chiamato descrittore che rappresenta e delinea in sinteticamente le caratteristiche radiometriche nel suo intorno. Il *matching* avviene valutando il grado di similarità tra i descrittori. La corrispondenza è appurata quando la distanza euclidea tra i due descrittori è minima.

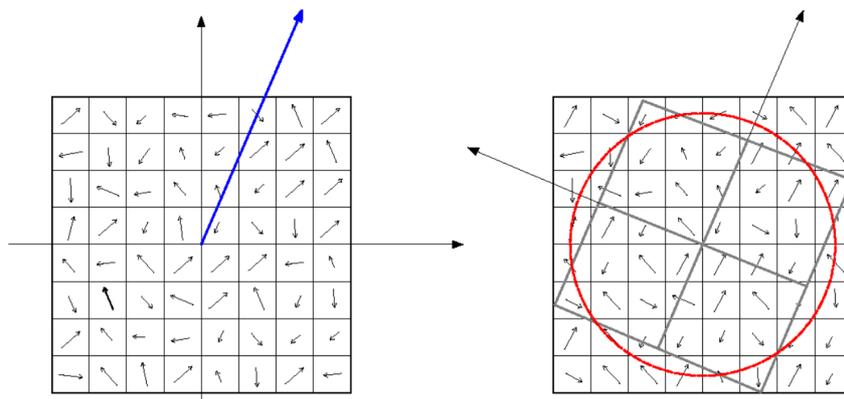


Figura 26: esempio di sviluppo di un descrittore. I toni radiometrici e/o altre informazioni caratteristiche (*features*) dei pixel presenti nell'intorno del punto vengono rappresentati sotto forma di vettori, la cui somma compone il vettore totale ovvero il descrittore. Fonte: Fonte: A. M. LINGUA, *Fotogrammetria digitale...*, p. 20.

- *Area Based Matching (ABM)* o tecniche di autocorrelazione le quali basano la ricerca della corrispondenza automatica tra punti omologhi attraverso il confronto dei toni radiometrici dei *pixel* nell'intorno dei punti stessi. Il confronto solitamente avviene utilizzando aree quadrate chiamate *correlation windows* (finestre di correlazione). Il *matching* è positivo quando il grado di similarità tra le finestre in esame è superiore ad un valore prefissato (coefficiente di correlazione). Le tecniche di correlazione si dividono a loro volta in:
 - *Cross - Correlation (CC)* o autocorrelazione a *pixel* intero con accuratezze di 0,5 *pixel* e finestre di correlazione con precisione di un *pixel*;
 - *Least Square Matching (LSM)* o autocorrelazione *sub - pixel* con accuratezze inferiori a 0,5 *pixel* e l'utilizzo di finestre di correlazione con precisione *sub - pixel*.
- *Relational Based Matching (RBM)*.

Un'altra importante distinzione tra la tecnica *FBM* e *ABM* è che nel primo caso i descrittori sono invarianti, quindi permettono l'accoppiamento automatico di punti omologhi anche in condizioni di forti variazioni geometriche e radiometriche, mentre nel secondo caso, per garantire l'automaticità del *matching*, l'oggetto rappresentato nelle finestre di correlazione deve essere approssimato ad un piano.

Le tecniche di *image processing*, *feature extraction* e *image matching* in un processo fotogrammetrico vengono generalmente accorpate in un unico procedimento automatico sotto forma di algoritmo.

Un esempio di algoritmo molto utilizzato dai programmi di elaborazione fotogrammetrica è lo *Scale Invariant Feature Transform*, o *SIFT* secondo il suo acronimo, proposto da David G. Lowe nel 2004.

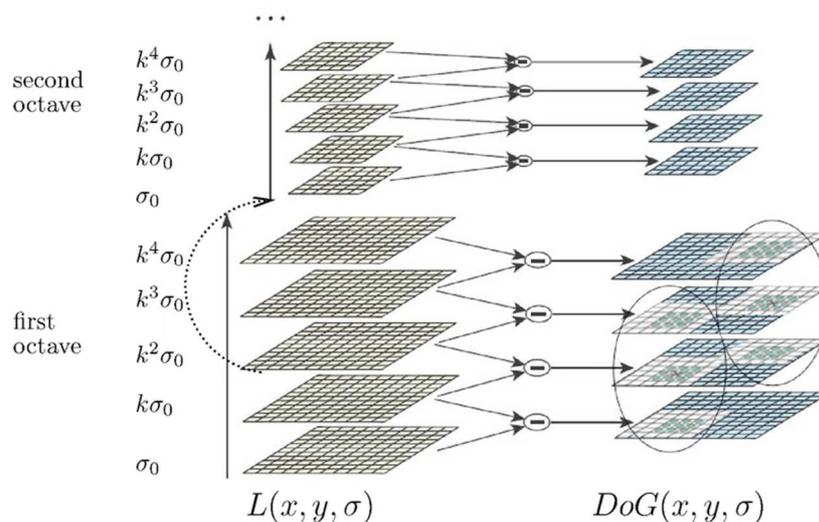


Figura 27: esempio di piramide gaussiana nell'algoritmo SIFT.

Fonte: <https://www.researchgate.net/figure/>

Esso estrae i punti di interesse da ciascuna immagine calcolando la piramide *gaussiana* (*DoG*), applicando ripetutamente il filtro *LoG* e sottocampionando ad ogni cambio di ottava con un numero fisso di livelli di scala ($n = 4$). Il cambio di ottava corrisponde ogni volta a un raddoppio di σ ($\sigma, 2\sigma, 4\sigma$ e 8σ). I punti vengono identificati nel dominio della frequenza. Finita l'estrazione dei punti, per ciascuno di essi viene calcolato il descrittore tramite istogramma locale della orientazione del gradiente in una finestra 16×16 . Successivamente, ogni punto di un'immagine viene messo in corrispondenza con il proprio omologo, cercando quel descrittore che in un'altra immagine minimizzi il più possibile la distanza euclidea.

Per affinare la tecnica e sopprimere accoppiamenti ambigui, si accettano solo coppie per le quali il rapporto tra la distanza del primo vicino e quella del secondo vicino è inferiore ad una certa soglia, tipicamente tra 0,6 e 0,8.¹⁰³

Inoltre la procedura di *matching* tra punti di interesse (quelli omologhi), presenti nelle coppie di immagini, viene sempre condotta tenendo conto del rumore e delle misure anomale (*outliers*). Nel primo caso si ha la necessità di raffinare le soluzioni algebriche trovate con una minimizzazione non lineare, nel secondo caso vengono chiamate in causa le tecniche robuste di stima come per esempio *RANSAC*.

2.2.6. Allineamento, collimazione e *bundle adjustment*

Terminate le procedure di *matching*, i *software* di elaborazione fotogrammetrica restituiscono una nuvola sparsa di punti 3D dopo aver composto un blocco dei fotogrammi caricati. Ciò avviene attraverso algoritmi con approcci sequenziali i quali offrono il vantaggio di non richiedere che i punti omologhi siano visibili in tutte le immagini.

A partire da un posizionamento iniziale di due immagini nella scena 3D, l'approccio itera i calcoli tra l'aggiunta di una fotocamera e l'aggiunta di punti. Il primo passo dunque è la ricerca delle prime due *MPP* (P_1 e P_2) calcolate secondo quanto detto nel paragrafo 2.2.3. Calibrazione della camera: matrice di proiezione prospettica Una volta che le due matrici sono state determinate, i punti omologhi sui fotogrammi possono essere utilizzati per identificare i relativi punti 3D attraverso la tecnica della triangolazione. A questo punto l'algoritmo entra nel ciclo principale di elaborazione che processa tutte le immagini i -esime successive ($i > 2$) da aggiungere alla ricostruzione. Gli accoppiamenti tra i punti già ricostruiti sono utilizzati per produrre corrispondenze 2D - 3D. Sulla base di queste viene stimata la calibrazione della P_i delle camere successive. Ad ogni aggiunta di fotogramma la struttura di volta in volta ottenuta viene aggiornata:

¹⁰³ A. FUSIELLO, *Visione computazionale...*, Franco Angeli, Milano 2013, pp. 109 - 118.

- ri - triangolando i punti 3D esistenti (aumenta la precisione delle precedenti triangolazioni effettuate, dovuta all'aggiunta di nuove equazioni);
- triangolando nuovi punti 3D dovuti a nuove corrispondenze divenute disponibili man mano che si aggiungono le nuove camere.

Il ciclo si conclude dopo aver processato tutte le immagini caricate¹⁰⁴.

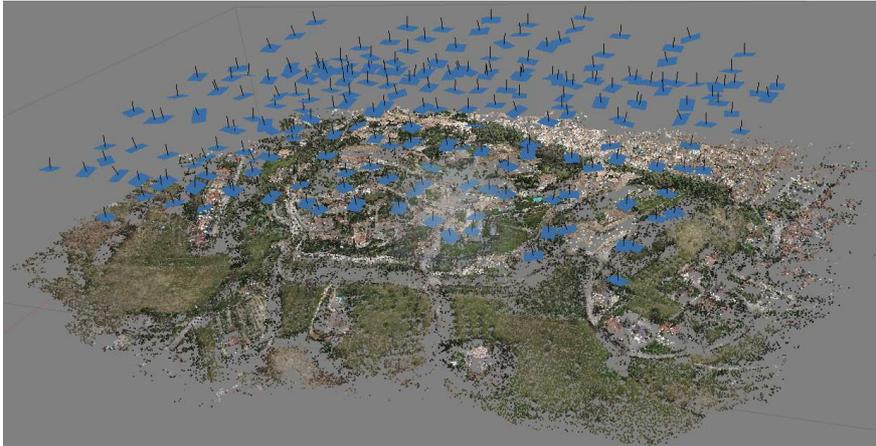


Figura 28: allineamento delle camere fotografiche della scena 3D del colle Monte Nero. Elaborazione compiuta con il software Agisoft Photoscan.

Il sistema dato dalle equazioni di collinearità, sotto forma di coordinate omogenee, permette di scrivere per ogni punto estratto tre equazioni per ogni immagine in cui è presente (per un punto presente in 3 immagini, si possono scrivere 9 equazioni). Inoltre le incognite sono i sei parametri di orientamento esterno per ogni immagine, i cinque di orientamento esterno ed eventualmente i coefficienti delle distorsioni. In base a queste condizioni di partenza il sistema si risolve minimizzando gli scarti dati dalla seguente formula:

$$v_{ij} = x_{ij} - P_i X_j \quad [2.50]$$

La procedura che permette di minimizzare gli scarti viene chiamata *bundle block adjustment* e si attua quando la presenza di molte camere in una scena causa una notevole accumulazione di errori che porta ad una deriva del risultato. Infatti gli errori sui parametri stimati delle prime camere e primi punti influenzano gli elementi che vengono aggiunti successivamente¹⁰⁵.

Per minimizzare al massimo gli scarti è bene che il *bundle block adjustment* venga eseguito ad ogni ciclo durante l'iterazione e non solo alla fine, a discapito però della velocità di processamento.

¹⁰⁴ ivi, pp. 174 - 179.

¹⁰⁵ ivi, pp. 179 - 183.

Terminata la procedura di allineamento può essere effettuata la collimazione nei fotogrammi dei *GCP* rilevati in fase di acquisizione dati. Esistono due tipologie di collimazione:

- manuale assistita: la collimazione dei *GCP* viene agevolata attraverso l'utilizzo delle rette epipolari (nel secondo fotogramma) o di collimazioni approssimate (dal terzo fotogramma in poi);
- automatica: la collimazione dei *GCP* viene agevolata dal riconoscimento automatico di *target* preimpostati.



Figura 29: collimazione manuale assistita dei *GCP* dell'area del colle Monte Nero. Elaborazione compiuta con il software Agisoft Photoscan.

A collimazione conclusa (comprensiva di *control point* e *check point*), generalmente, vengono ricalcolati i parametri di calibrazione della camera fotografica e riprodotto l'allineamento. Il procedimento è lo stesso spiegato precedentemente, tranne per il fatto che vengono aggiunte delle equazioni di vincolo dipendenti dalle coordinate dei *GCP* collimati.

2.2.7. Dense Image Matching (DIM)

Le tecniche di *Dense Image Matching (DIM)* vengono utilizzate per ottenere una nuvola densa di punti (*dense cloud*). Esse sfruttano principalmente il calcolo delle disparità¹⁰⁶ per i punti (tutti o alcuni) dell'immagine di riferimento. Il risultato è una mappa o campo di disparità (*depth maps* o *disparity maps*)¹⁰⁷.

¹⁰⁶ La disparità binoculare è la differenza vettoriale tra due punti omologhi, immaginando di sovrapporre le due immagini di cui fanno parte.

¹⁰⁷ *ivi*, p. 121.



Figura 30: depth maps di un'immagine digitale.

Per evitare falsi accoppiamenti tra i punti omologhi e rendere il calcolo dei *matching* trattabile, è necessario introdurre una serie di vincoli¹⁰⁸:

- vincolo di somiglianza: si assume che localmente due immagini differiscano lievemente, in modo da considerare simile un particolare della scena;
- vincolo epipolare illustrato nel paragrafo 2.2.3;
- vincolo della liscezza: la profondità dei punti (*depth*) di una superficie liscia varia lentamente, lontano dai bordi;
- vincolo di unicità: un punto di un'immagine può essere corrisposto con uno solo di un'altra immagine e viceversa;
- vincolo dell'ordinamento monotono;

oltre a dover considerare una serie di problemi dovuti a¹⁰⁹:

- oclusioni: discontinuità nelle superfici, ovvero parti di scena che non appaiono in tutti i fotogrammi;
- distorsione fotometrica: la radianza di un punto della scena osservata in più camere è di diversa intensità;
- distorsione prospettica: un oggetto della scena osservato in più camere assume forme diverse.

Nell'affrontare queste problematiche esistono tre metodologie operative¹¹⁰:

- locale (*local matching*): considera solo una piccola finestra che circonda il *pixel* che si vuole accoppiare. Per esempio tecniche di accoppiamento *ABM* basati su correlazione (*Normalized Cross Correlation* o *NCC*, *Zero - mean NCC* o *ZNCC*) o sulle differenze di intensità (*Sum of Squared Differences* o *SSD*, *Sum of Absolute Differences* o *SAD*) o su operatori di rango (*trasformata census*);

¹⁰⁸ *ivi*, p. 122.

¹⁰⁹ *ivi*, p. 123.

¹¹⁰ *ivi*, pp. 123 - 135.

- globale (*global matching*): impone i vincoli su tutta la linea di scansione (*scanline*) o su tutta l'immagine. Possiede dei tempi computazionali maggiori ai metodi locali a causa dell'elevata complessità, ma restituisce migliori risultati in termini di qualità e risoluzione.
- semi - globale (*semi - global matching*): approssima l'approccio globale riducendo al minimo i tempi di *matching* e consentendo l'elaborazione di nuvole dense partendo da immagini di grandi dimensioni senza inficiare pesantemente sulle tempistiche.

2.2.8. Procedura *SfM* e prodotti finali

Alla luce di quanto detto in questo paragrafo vengono riportate: la procedura di *Structure from Motion* per l'elaborazione fotogrammetrica di immagini digitali e le restituzioni 2D e 3D che ne derivano.

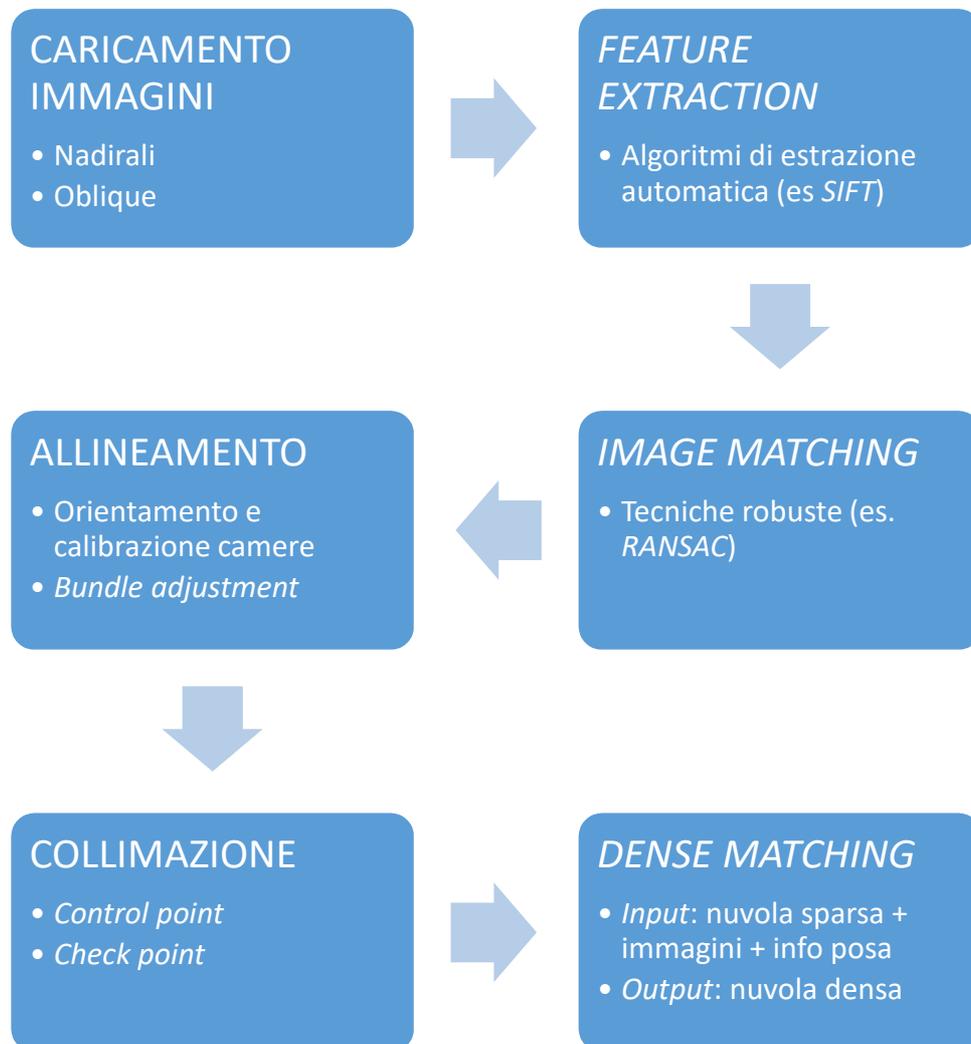


Figura 31: procedure della *Structure from Motion*.

I prodotti che possono essere generati dopo l'elaborazione dei dati acquisiti da un rilievo fotogrammetrico digitale, sono i seguenti:

- modello sotto forma di poligonale 3D ottenuto dall'unione dei punti componenti la nuvola densa;
- *mesh* triangolare e *mesh* con *texture*;
- *DSM/DDS*, *DTM/DDTM* e Ortofoto (cfr. paragrafo 2.1.11);

Successivamente a ciò la restituzione, a seconda delle finalità del rilievo, si completa con eventuali:

- stesure e realizzazioni di cartografia topografica o cartografia numerica;
- stesure e realizzazioni di elaborati grafici quali prospetti o sezioni;

le quali avranno una personale metodologia di rappresentazione grafica corredata da sistemi di codifica dei singoli elementi riprodotti.

2.3. Rilievo tramite tecnica *Laser Scanner*

Il *Laser Scanner* rientra tra le tecniche di rilievo e misurazione di volumi e forme 3D senza contatto con l'oggetto rilevato, adoperando in modo attivo le radiazioni luminose prodotte.

2.3.1. Il *LASER*: cenni storici e principi di funzionamento

Il termine *LASER* è l'acronimo della definizione in lingua inglese "*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*" la quale tradotta in italiano significa "*amplificazione di luce tramite emissione stimolata di radiazioni*"¹¹¹.

Il concetto fisico dell'emissione stimolata di radiazioni nacque nel 1917 ad opera di Albert Einstein, il quale intuì la possibilità di indurre un atomo ad emettere radiazione luminosa in seguito alla propria stimolazione da parte di un altro raggio di luce incidente di specifica frequenza¹¹².

L'invenzione di una prima strumentazione sfruttante i principi di "emissione stimolata di radiazione" è legata a due fisici americani: Charles Townes e il suo studente Gordon Gould. Questi, durante degli studi sulle strutture molecolari, realizzarono inizialmente un *radar* a microonde il quale però aveva le seguenti problematiche: onde elettromagnetiche con una lunghezza d'onda insufficientemente corta e radiazione utilizzata difficilmente controllabile. Solo in seguito allo studio delle teorie di Einstein del 1917 e l'utilizzo di un gas di ammoniaca i due arrivarono a far funzionare un dispositivo a cui diedero il nome di "*Maser*".

¹¹¹ <http://www.iet.unipi.it/p.bagnoli/ea/laser.pdf>. Ultima consultazione 22/09/2017.

¹¹² D. BARTOLUCCI, *Principi di laser scanning 3D: hardware - metodologie - esempi*, Dario Flaccovio Editore, 2009, p. 11.

I primi scienziati che si addentrarono nello studio di radiazioni con lunghezza d'onda sempre inferiore, come la luce infrarossa, e che introdussero un sistema di specchi agli estremi del *Maser*, furono il solito Charles Townes e il collega della *Stanford University*, Arthur Schawlow.¹¹³

Sfortunatamente per loro il primo a relegare l'appellativo di "LASER" alla strumentazione inventata fu lo studente Gordon Gould al quale dopo 20 anni di cause legali venne riconosciuta la paternità della tecnica.

A Townes e ad altri due fisici, Basov e Prokhorov, il primo australiano e il secondo russo, che in quegli anni parallelamente studiarono anch'essi le leggi fisiche che stavano dietro al laser, fu invece attribuita la formulazione teorica tramite l'assegnazione del premio Nobel¹¹⁴.

Per vedere le prime strumentazioni laser bisogna aspettare fino all'anno 1960 quando il 16 maggio, Theodore H. Maiman azionò il primo laser funzionante a Malibù in California presso i laboratori della *Hughes Research*.

Il funzionamento fisico consiste principalmente nell'interazione tra onde elettromagnetiche e particelle elementari quali atomi.

Le radiazioni delle onde elettromagnetiche del laser possiedono un *range* di operatività di 200-300 nm ai 1100 nm di lunghezza d'onda, toccando i campi dell'ultravioletto, del visibile e dell'infrarosso.

L'interazione tra onde elettromagnetiche e atomi produce due effetti¹¹⁵:

- l'assorbimento: ovvero la cessione di energia da parte di un fotone (particella costituente la radiazione elettromagnetica) ad un atomo che si trova ad uno stato energetico E_1 e viene eccitato ad uno stato con energia superiore E_2 , generando un dislivello;
- emissione stimolata: ovvero la diseccitazione dell'atomo dallo stato energetico E_2 a quello E_1 ad opera del fotone, generando un secondo fotone identico al primo.

Dal punto di vista strumentale il laser è composto da un cilindro allungato chiamato "cavità risonante" o "risonatore ottico" al cui interno vi è inserita la materia, di varia natura (aeriforme, liquida o solida) che sotto forma di atomi, consente di amplificare le radiazioni.

Il risonatore ottico è interposto tra una coppia di specchi, uno riflettente al 100% e l'altro ad una percentuale che va dall'80 al 99% a seconda del caso di utilizzo. I due specchi

¹¹³ G. BASSANELLO, *La tecnica del laser a scansione nel rilevamento di strutture: un caso studio*, Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, Università di Bologna, A. A. 2006/2007, pp. 30 - 32.

¹¹⁴ <http://www.lundici.it/2010/05/50-anni-e-non-li-dimostra/>. Ultima consultazione 22/09/2017.

¹¹⁵ G. BASSANELLO, *La tecnica del laser a scansione...*, p. 33.

permettono la riflessione della radiazione all'interno dello strumento e ne regolano, mediante quello non riflettente al 100%, la relativa fuoriuscita regolata. Oltre a regolare la quantità di radiazione in uscita, il risonatore ottico ne controlla anche la lunghezza d'onda, impostandola a valori interi di mezze estensioni.

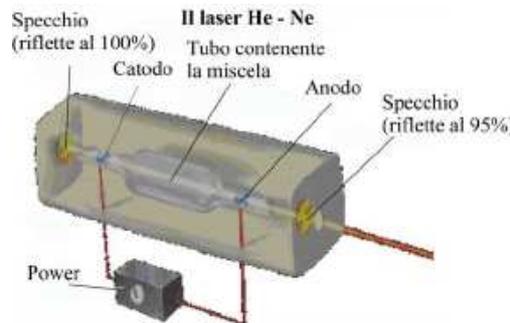


Figura 32: schema di riproduzione di un raggio laser in una cavità risonante. Fonte: G. BASSANELLO, La tecnica del laser a scansione..., p. 35.

Il componente che destina l'approvvigionamento di energia alla cavità risonante e che permette l'emissione stimolata è il sistema di pompaggio. L'oscillazione continua tra uno stato energetico e l'altro deve essere mantenuta continua nel tempo per permettere alle radiazioni elettromagnetiche di "emettere il laser". Il metodo più veloce è il pompaggio ottico, un'altra tipologia è quella del pompaggio termico¹¹⁶.

2.3.2. Caratteristiche del laser e sue classificazioni

Il laser possiede le seguenti caratteristiche¹¹⁷:

- unidirezionalità: la radiazione luminosa emessa si diffonde nella direzione di propagazione voluta a seconda di come si dispone la strumentazione, quindi in modalità totalmente differente rispetto a normali sorgenti luminose quali per esempio lampadine a incandescenza;
- monocromaticità: la radiazione luminosa emessa viene generata e si diffonde nello spazio secondo una singola frequenza di radiazione elettromagnetica;
- coerenza spaziale: la forma dell'onda si mantiene sinusoidale (coerenza di fase) nello spazio;
- coerenza temporale: la forma dell'onda si mantiene sinusoidale (coerenza di fase) nel tempo.

La classificazione del laser si può effettuare in base a due fattori: il materiale utilizzato all'interno della cavità risonante e i livelli di radiazione emergente.

¹¹⁶ ivi, pp. 34 - 35.

¹¹⁷ D. BARTOLUCCI, *Principi di laser scanning 3D...*, pp. 11 - 12.

2.3.2.1. Classificazione in base al materiale

Vi sono alcune grandi categorie che vengono prese in considerazione a seconda dello stato fisico di aggregazione della materia utilizzata dallo strumento per generare l'emissione *laser*. Esse sono¹¹⁸:

- *gas laser*: ovvero quei *laser* che funzionano attraverso l'utilizzo di materia allo stato aeriforme. Sono un insieme abbastanza ampio ed eterogeneo dove alcuni possiedono emissione intermittente, mentre altri quella continua. Il *range* della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica varia tra 300-1100 nm. La tipologia di materiale può essere sotto forma di gas puro o come insieme di gas tipo il *laser* ad elio-neon (dove l'elio costa poco e il neon facilita il pompaggio e quindi rende molto comune il proprio impiego), il *laser* ad anidride carbonica (di importante impiego industriale per il caratteristico fascio emesso ad elevata potenza fino a 1 MW), il *laser* ad argon ionizzato, o infine il *laser* a diossido di carbonio.
- *Solid - state laser*: ovvero quei *laser* che funzionano attraverso l'utilizzo di materia allo stato solido e restituiscono una maggiore potenza in uscita. Generalmente composti da piccole barre di cristalli di rubino o di vetro drogato con neodimio, la frequenza di emissione va dal campo infrarosso a quello ultravioletto. Sono il presupposto per l'ottenimento di frequenze raggiunte dalle radiazioni chiamate raggi "X".
- *Laser* allo stato liquido o *laser* a coloranti: il materiale attivo è costituito generalmente da un colorante inorganico disciolto in alcol o acqua, chiuso in un recipiente in vetro.
- *Semiconductor laser*: tutta quella serie di *laser* la cui emissione è causata dall'attraversamento di corrente tra due materiali semiconduttori.

Esistono anche altre categorie come i *laser* a centri di colore, i *laser* a eccimeri e i *laser* a elettroni liberi (*FEL*).

2.3.2.2. Classificazione in base al livello di radiazione emergente

Il *laser*, a causa della propria conformazione fisica e della diffusione nello spazio di radiazioni luminose che interessano più campi emissivi tra cui l'infrarosso e l'ultravioletto, può generare dei danni e/o disturbi agli organi dell'essere umano, *in primis* pelle ed occhi, a seconda della durata e della modalità di esposizione subita.

Il raggruppamento si confà di 5 vere e proprie classi basate sul rischio¹¹⁹:

¹¹⁸ G. BASSANELLO, *La tecnica del laser a scansione...*, pp. 36 - 41.

¹¹⁹ Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI), *Norma EN 60825 - 1: Sicurezza degli apparecchi laser: classificazione delle apparecchiature, prescrizioni e guida per l'utilizzatore*, 2009.

- Classe 1: strumentazioni *laser* intrinsecamente sicure o attrezzate di dispositivi di sicurezza nel caso di guasto dell'involucro strumentale.
- Classe 2: strumentazioni *laser* che emettono con lunghezze d'onda pari a 400-700 nm ovvero quelle caratteristiche delle radiazioni visibili all'occhio umano e quindi a bassa potenza per l'organismo umano. L'apparato visivo si auto protegge dal contatto col fascio luminoso serrando istintivamente le palpebre.
- Classe 3A: strumentazioni *laser* con potenze non inferiori a 5 mW, la cui emissione nel campo al di fuori del visibile, garantisce una visione in sicurezza ad occhio nudo fatto eccezione l'utilizzo di altri strumenti ottici quali binocoli e telescopi. Nel caso di emissione nel campo del visibile la reazione di riflesso della palpebra a difesa dell'occhio è sufficiente a garantirne la protezione.
- Classe 3B: strumentazioni *laser* con emissione sempre pericolosa dal punto di vista visivo, sia diretta sia riflessa. I livelli di emissione devono restare entro i 500 mW e lo spettro di emissione varia dall'infrarosso all'ultravioletto.
- classe 4: strumentazioni *laser* con emissione sempre pericolosa, le quali provocano lesioni dermatologiche e minacce di incendio. Nell'utilizzo di questi *laser* bisogna sempre porre estrema cautela.

2.3.3. Campi di applicazione del *laser scanner*

Le tipologie *laser* oggi sono molteplici così come gli sviluppi che hanno portato questa tecnologia ad ampliarsi in svariati campi di applicazione, tra i quali:

- campo scientifico: per lo studio delle strutture molecolari, lo studio e attivazione di fenomeni chimici altrimenti irrealizzabili come le proprietà di assorbimento dei materiali o la fotosintesi;
- campo militare: per lo studio o analisi di performance strumentali o strutturali di determinate strutture come per esempio nel campo navale o aeronautico, ecc.;
- campo industriale: per riscaldare, fondere o vaporizzare una sostanza con grande precisione attraverso l'utilizzo di *laser* dal fascio minuziosamente convogliato in zone microscopiche;
- campo medico: per operare il corpo umano sempre attraverso l'uso di *laser* che convogliano il fascio in aree piccolissime con una altissima precisione che permette di aprire e cauterizzare immediatamente tessuti del corpo umano;
- campo infrastrutture e territorio: per il monitoraggio di movimenti del terreno o di infrastrutture poste al di sopra di esso, rilievo del territorio, modellazione del territorio;
- campo giudiziario: per sostenere nel miglior modo il rilievo di incidenti o scene del crimine;

- campo architettonico, restauro ed edilizia: per il rilevamento, il monitoraggio e lo studio della deformazione strutturale di particolari manufatti, edifici o monumenti, e la loro restituzione 2D o 3D.

La tecnica di *laser scanning*, applicata alla topografia, viene utilizzata sia per i rilievi a scala urbana sia per quelli a scala architettonica.

Nel primo caso la scansione *laser* si appoggia a mezzi aerei sui quali viene montata l'apparecchiatura (*laser scanner* aviotrasportati o aerei), nel secondo caso la scansione *laser* avviene a terra posizionando la strumentazione (*laser scanner* terrestri) su un treppiede in posizione fissa.

Nella presente tesi ci si occuperà soltanto dell'argomentazione inerente il *laser scanner* terrestre, una delle strumentazioni utilizzate per l'acquisizione dei dati della Torre degli Smeducci.

2.3.4. Il *laser scanner* terrestre: principi di funzionamento e classificazione

Il *laser scanner* terrestre sfrutta la tecnica di rilievo denominata "LiDAR", "Light Detention and Ranging" o "Laser Imaging Detection and Ranging", e permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie utilizzando un impulso *laser*.

Il *range* di applicazione della lunghezza d'onda va dai 200 ai 700 nm passando dal campo dell'ultravioletto a quello dell'infrarosso attraverso il campo del visibile.

La tecnologia *laser* appena citata può essere considerata una stazione totale quasi del tutto automatizzata in grado di acquisire una notevole mole di dati, principalmente sotto forma di punti, in pochissimo tempo.

L'insieme di punti rilevati e disposti ordinatamente, secondo un sistema di riferimento proprio dello strumento, si chiama "nuvola di punti".

Per effettuare un rilievo con la metodologia *laser scanner* terrestre è necessario l'utilizzo di più stazioni. Ciascuna stazione avrà un posizionamento nello spazio e rileverà una propria nuvola di punti ordinata, chiamata più precisamente "*range scan*" ovvero "*scansione laser*"¹²⁰.

Dal punto di vista tecnico il *laser scanner* terrestre funziona nel seguente modo: il raggio sotto forma di fascio, emesso dalla strumentazione, colpisce la superficie oggetto di rilievo, riflette su di essa e torna indietro al *laser* stesso. Punto fondamentale per la misurazione delle coordinate dei punti rilevati è l'analisi del raggio in uscita e di quello in entrata: dovranno essere presenti perciò dei sensori che gestiranno entrambi le fasi¹²¹.

¹²⁰ M. SGRENZAROLI, G. P. M. VASSENA, *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner: Volume 1 - Introduzione generale*, Università degli Studi di Brescia, pp. 8 - 9.

¹²¹ *ivi*, p. 8.

Come appena esposto l'analisi si effettua sulle differenti informazioni del segnale, che sia esso in uscita o in entrata; in base alla tipologia di analisi avanzata sul segnale vi è una differente classificazione per i *laser scanner* terrestri.

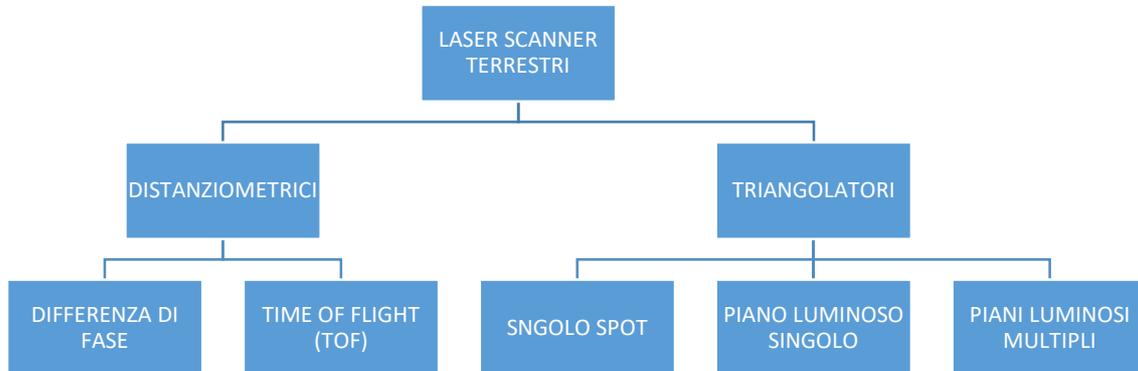


Figura 33: classificazione laser scanner terrestri.

2.3.4.1. Sistemi di scansione distanziometrici

E' la tipologia di laser scanner terrestri più simile a quella delle tradizionali stazioni totali ad impulsi, se si tiene conto la determinazione delle misure dei punti secondo angoli e distanze.

La sostanziale differenza tra le due tecniche è che per la stazione totale i punti rilevati sono quei pochi significativi che permettono di restituire successivamente l'oggetto rilevato, per contro nella tecnica distanziometrica le superfici dell'oggetto vengono rilevate attraverso una notevole acquisizione di punti distanti tra loro anche pochi millimetri. La problematica che può sorgere, consiste nella casualità di determinazione dei punti rilevati, infatti, come si può vedere dall'immagine sottostante per quanto riguarda la tecnica del *laser scanner* terrestre vi è una maggiore densità di punti distribuiti lungo una maglia regolare, ma anche una minore precisione della determinazione del posizionamento effettivo di spigoli, vertici, ecc.

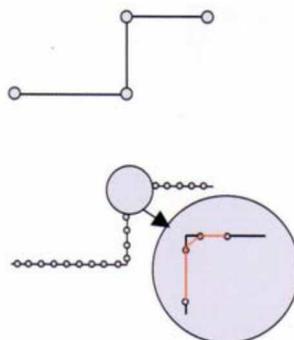


Figura 34: differenze di acquisizione dei punti tra il rilievo con stazione totale e quello con laser scanner terrestre. Fonte: A. PIEMONTE, *Introduzione al laser scanner*, Università di Pisa, p. 4.

L'intelligenza necessaria a trasformare il dato acquisito dal *laser* in un rilievo metrico vero e proprio deve essere inserita a posteriori, caratteristica fondamentale per qualsiasi restituzione derivante da tecniche a scansioni *laser*.

I *laser scanner* distanziometrici si suddividono a loro volta in¹²²:

- sistemi a differenza di fase: dove la misurazione della distanza viene computata in base alla differenza di fase tra l'onda emessa e quella ricevuta. La differenza di fase viene riprodotta tramite un processo di modulazione e trasmissione di onde elettromagnetiche, di λ pari a 0,78 mm circa (infrarosso vicino), verso un prisma riflettore che le diffonde in parte verso l'oggetto da rilevare e in parte verso un sistema di ricezione per interpretare la differenza di fase a seguito della misurazione effettuata.
- sistemi ad impulsi o *Time Of Flight (TOF)*: dove la misurazione della distanza viene computata in base al tempo di impiego del segnale a percorrere il tragitto interposto tra la strumentazione e la superficie dell'oggetto del rilievo e viceversa. Il raggio viene emesso dallo strumento ad un determinato valore di frequenza e ricevuto da un sensore, collegato generalmente ad un orologio al quarzo, che calcola la distanza in maniera diretta attraverso la seguente formula:

$$distanza = \frac{\text{tempo di volo (TOF)} \cdot \text{velocità della luce}}{2} \quad [28]^{123}$$

Al calcolo del tempo di volo è associato anche una misurazione angolare di precisione data dalla rotazione di due specchi rotanti attorno agli assi x e z (l'asse y è associato alla distanza e la z è la verticale).

La rotazione dello specchio, in funzione della risoluzione angolare impostata dall'operatore per la scansione, crea la spaziatura tra i differenti punti rilevati sul *target* e genera la nuvola di punti rilevando l'oggetto indagato.

Le portate di acquisizione dei sistemi distanziometrici *TOF* prevedono distanze minime che si aggirano comunemente attorno ai 2 m e distanze massime di circa 800 m¹²⁴.

Per quanto riguarda i sistemi che scansionano a differenza di fase, le precisioni strumentali sono migliori rispetto a quelli *TOF*, rallentandone però la velocità e il raggio d'azione d'operazione.

¹²² G. BASSANELLO, *La tecnica del laser a scansione...*, pp. 53 - 62.

¹²³ M. SGRENZAROLI, G. P. M. VASSENA, *Tecniche di rilevamento tridimensionale...*, p. 8.

¹²⁴ G. BASSANELLO, *La tecnica del laser a scansione...*, pp. 54 - 55.

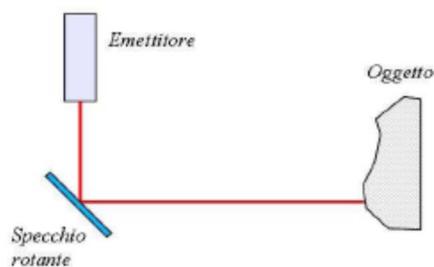


Figura 35: schema di funzionamento di un sistema a scansione distanziometrica. L'emissione del fascio passa attraverso un sistema di componenti ottico-meccanici rotanti che lo distribuiscono sulla superficie da rilevare. Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Laser_scanner#/media/File:Principio_Laser_scanner_distanziometrici.jpg

Entrambi però restituiscono, a seguito di calcoli interni al sistema strumentale, le seguenti informazioni sui punti:

- distanza tra il centro strumentale e ogni singolo punto rilevato sull'oggetto in esame;
- angolo di inclinazione del raggio emesso secondo un asse verticale strumentale di riferimento;
- angolo azimutale del raggio emesso secondo un asse orizzontale strumentale di riferimento.

Tenendo conto delle coordinate del centro strumentale, grazie a queste tre tipologie di misurazioni registrate dalla centralina interna, a ciascun punto rilevato (fino a milioni per scansione) vengono destinate una terna di coordinate cartesiane dopo averle convertite dal sistema di coordinate polari (sistema tramite il quale lo strumento lavora).

2.3.4.2. Sistemi di scansione triangolatori

I sistemi di scansione triangolatori, per la determinazione della posizione spaziale dei singoli punti facenti parte della "range scan", sfruttano lo stesso principio geometrico della triangolazione topografica.

Vengono utilizzati principalmente su distanze più brevi rispetto a quelli distanziometrici, generalmente pochi metri, tuttavia acquisiscono dati in maniera più rigorosa e precisa. Il principio di funzionamento è così descritto: il raggio, emesso dalla sorgente strumentale e deflesso da un sistema ottico rotante verso la superficie oggetto del rilievo, viene riflesso da quest'ultima e catturato da un sensore CCD o CMOS posto ad una distanza nota, denominata base, rispetto al punto di emissione. Il punto di emissione e il sensore recettivo compongono un unico elemento chiamato "scanner head"¹²⁵.

¹²⁵ ivi, p. 63.

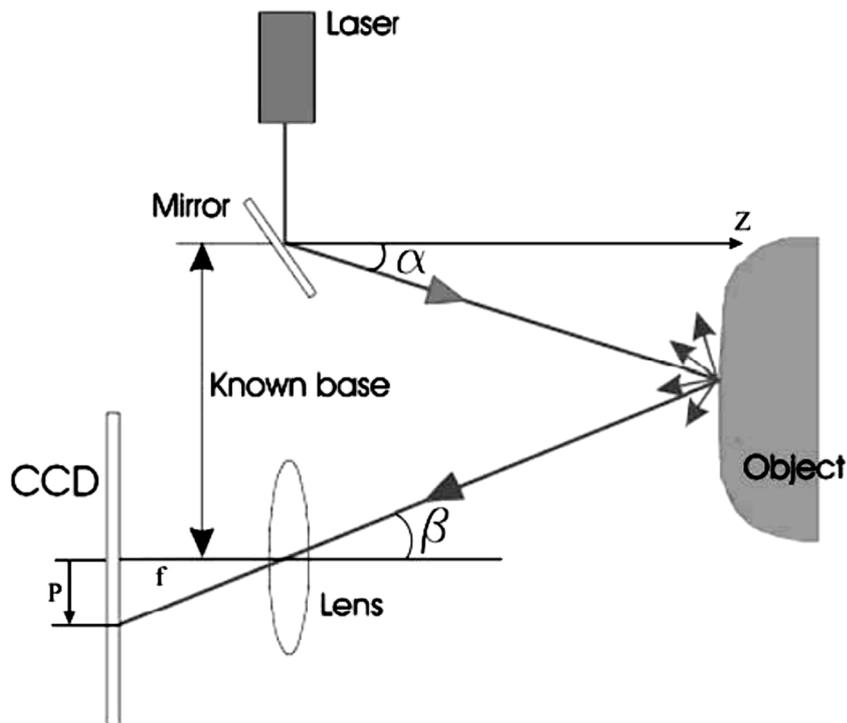


Figura 36: schema di funzionamento del sistema di scansione triangolatore. Fonte: G. BASSANELLO, *La tecnica del laser a scansione...*, p. 63.

Un'altra caratteristica limitativa della strumentazione è l'elevata quantità di tempo necessario per espletare il rilievo. Queste limitazioni sono imputabili al principio geometrico della triangolazione che si rifà agli elementi di base della geometria di Talete, difatti ciò dipende dalla distanza chiamata precedentemente "base" la quale non può eccedere in dimensioni per praticità di utilizzo della strumentazione stessa¹²⁶.

2.3.5. Problematiche legate ai sistemi TLS

I sistemi TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) comportano alcune problematiche legate alla conformazione strumentale o alle tecniche di rilievo che si ripercuotono in successione sulla precisione del dato rilevato. L'esempio della collimazione di punti caratteristici dell'oggetto da rilevare come spigoli e vertici è già stato trattato precedentemente. Qui di seguito vengono elencate altre casistiche.

2.3.5.1. Divergenza del raggio laser

Il raggio *laser* alla luce delle definizioni apportate precedentemente, può essere descritto come un fascio di radiazioni luminose monodirezionali e parallele tra loro costanti nel tempo e nello spazio. Nella realtà dei casi si differisce da questa nozione, soprattutto per quanto riguarda il parallelismo dei raggi componenti il fascio.

¹²⁶ *ivi*, pp. 64 - 67.

L'emissione della radiazione luminosa dalla cavità strumentale causa una leggera e impercettibile divergenza dei singoli raggi. Quindi maggiore sarà la distanza dall'oggetto da rilevare e la superficie di impatto del *laser*, maggiore sarà l'errore di posizionamento del punto rilevato.

2.3.5.2. Tipologia superficiale dell'oggetto rilevato

La presenza di sconessioni di vario genere sulla superficie da rilevare, dalle più piccole come la conformazione rugosa, alle più grandi come la presenza di elementi spuri, comporta la collimazione di questi punti, da parte del raggio incidente, in maniera non esaustiva. Infatti il fascio luminoso non colpirà in tutta la sua totalità il punto in questione, ritornando allo strumento con "informazioni" differenti da quelle reali.

2.3.5.3. Segnali di ritorno rumorosi

Il segnale di ritorno, del raggio emesso dallo strumento *laser*, generato dalla presenza di oggetti del più svariato tipo tra cui elementi presenti nell'atmosfera, vegetazione interferente, ecc., può falsare il rilievo restituendo "informazioni" tridimensionali fasulle.

Per ovviare a queste problematiche ci sono alcune tecniche automatiche di filtraggio dei dati come per i *laser scanner* aerei che sfruttano la ridondanza del dato acquisito o assunzioni standardizzate sugli oggetti rilevati.

La seconda procedura è quella relegata all'operatore in fase di acquisizione e soprattutto in fase di restituzione, dove dovrà avere la capacità critica di distinzione tra un dato accettabile e uno da scartare.

2.3.6. Procedure esecutive di un rilievo con laser scanner terrestre

L'utilizzo dei sistemi *TLS*, come nel caso della fotogrammetria e altre tecniche di rilievo, prevede una serie di fasi e procedure operative da seguire per poter generare informazioni e prodotti utili alle utenze finali.

2.3.6.1. Scelta della strumentazione laser scanner

La strumentazione *laser scanner* è varia e possiede caratteristiche differenti a seconda delle esigenze date dal caso di rilievo da effettuare. La scelta della giusta tipologia del sistema *scanner* risulta perciò fondamentale per la riuscita delle misurazioni.

Gli aspetti da tenere in considerazione sono i seguenti¹²⁷:

¹²⁷ M. SGRENZAROLI, G. P. M. VASSENA, *Tecniche di rilevamento tridimensionale...*, pp. 11 - 15.

- accuratezza: difficile da paragonare tra le case madri commerciali e a volta anche tra strumentazioni della stessa azienda in quanto gli aspetti tecnico-meccanici possono variare da un *laser scanner* all'altro e venire esposti in schede tecniche attraverso parametri di difficile confronto incrociato. L'accuratezza finale di uno strumento di scansione *laser* si compone dell'accuratezza angolare e di quella della misura delle distanze.
- Risoluzione: definita come la capacità di rilevare e rappresentare oggetti di dimensioni minime, ovvero la massima densità della nuvola di punti. Una maggiore risoluzione è ottenibile con passi angolari di direzionamento del raggio *laser* ridotti che permettono una migliore densità della nuvola di punti e la conformazione e dimensione della cavità di uscita del flusso radiativo. Per aspetti architettonici o di rilievo di opere d'arte l'aspetto della risoluzione è fondamentale ottenendo però il giusto compromesso con la portata.
- Riflettività della superficie di rilievo: che può modificare l'intensità del segnale di ritorno a seguito di incidenze spurie sulle superfici dell'oggetto da rilevare. Questi errori nel campo delle misurazioni possono considerarsi sistematici.
- Condizioni ambientali: quali temperatura, radiazioni luminose esterne, campi elettromagnetici e altri fattori influenzanti l'accuratezza delle misure.
- Velocità di acquisizione: fattore da tenere in grande considerazione per poter pianificare l'acquisizione dei dati in loco. Un'acquisizione può durare da pochi secondi a qualche minuto e dipende da svariati fattori tra i quali il più influente è quello della tecnica di rilevamento utilizzata (*TOF* o triangolatrice, ecc.).
- Portata massima di misura: ovvero la distanza massima rilevabile dalla strumentazione.
- Caratteristiche del segnale *laser*: per poter intuire quali disturbi luminosi esterni possano inficiare sul funzionamento efficiente del raggio strumentale.
- Campo visivo: in quanto i *laser scanner* operano con tre tipologie diverse di campi visivi, i *camera scanner* con campo visivo limitato a pochi gradi in orizzontale e verticale, i *panorama scanner* con campo visivo quasi panoramico e gli *scanner* di tipo ibrido con campo visivo lungo un asse principale di 360° e lungo un asse secondario di circa 60° - 70°.
- Utilizzo congiunto di camere fotografiche: la fotocamera può essere integrata alla strumentazione *scanner*, esterna ma collegata ad essa o infine esterna e scollegata. Con l'utilizzo di queste camere aggiuntive, di cui si conoscono i parametri interni, la focale e il posizionamento spaziale, si sconfinano nel campo della fotogrammetria applicata ai sistemi *TLS*. Le leggi, procedure e metodologie di acquisizione e trattamento di dati fotogrammetrici vengono riprese dai *software* analizzanti le nuvole di punti scansionate dalla strumentazione *laser*.

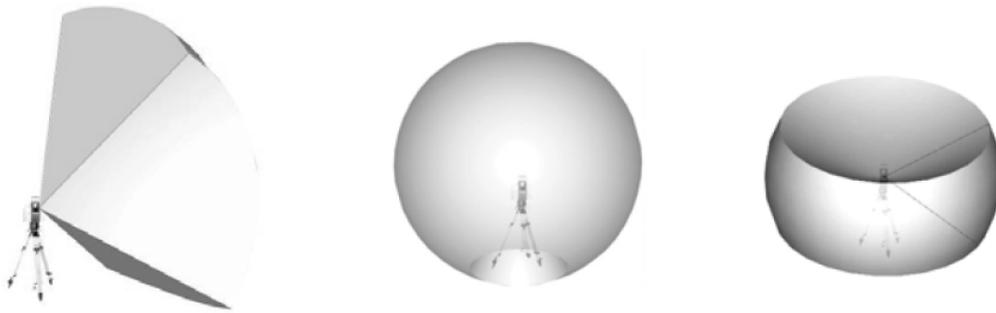


Figura 37: a sinistra la camera scanner, al centro la panorama scanner, a destra lo scanner ibrido. Fonte: M. SGRENZAROLI, G. P. M. VASSENA, Tecniche di rilevamento tridimensionale..., p. 15.

2.3.6.2. Acquisizione dati

L'acquisizione dei dati con *laser scanner* terrestre permette dunque il rilevamento di una quantità di punti e altre informazioni digitali in alcuni minuti, ciò consente di destinare alla fase di restituzione l'estrazione di elementi caratteristici dell'oggetto da rilevare, quali per esempio vertici e spigoli, o la decisione di quali elementi dover rilevare in quanto il *laser* scansiona tutto ciò che interessa il raggio operativo strumentale.

Nonostante ciò, non si possono tralasciare tutta una serie di aspetti legati alla progettazione del rilievo di campagna, il quale varierà a seconda della:

- conformazione geometrica dell'oggetto da rilevare,
- tipologia del risultato desiderato.

In base a queste due considerazioni si pianificheranno:

- il posizionamento delle stazioni *laser*,
- il posizionamento dei target di coordinate note sulle superfici da rilevare.

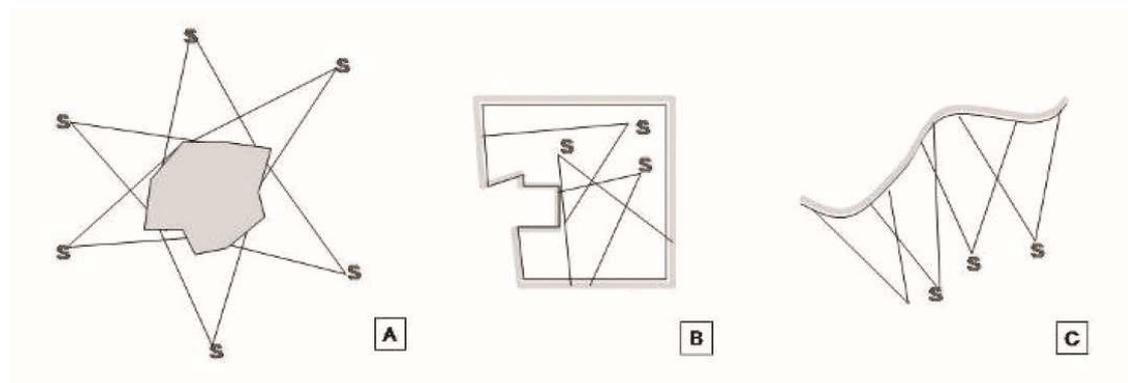


Figura 38: differenti schemi di posizionamento delle stazioni laser scanner a seconda della forma e tipologia di rilievo: a) oggetto convesso chiuso rilevato esternamente, b) oggetto convesso chiuso rilevato dall'interno, oggetto sia concavo sia convesso rilevato in modalità "parete". Le stazioni sono stilizzate con la dicitura "s". Fonte: M. SGRENZAROLI, G. P. M. VASSENA, Tecniche di rilevamento tridimensionale..., p. 15.

Per quanto riguarda il posizionamento delle stazioni *laser*, entrano in gioco dei fattori legati alla forma, influenti sulla procedura operativa: la concavità chiusa/aperta e la convessità chiusa/aperta dell'oggetto o superficie in esame e l'apertura angolare strumentale¹²⁸. In base a ciò si possono prevedere svariati schemi di posizionamento e un numero differente di stazioni utilizzate.

Per scegliere il miglior numero e tipologia di posizionamento delle stazioni bisogna effettuare un accurato sopralluogo. Nel caso si sia impossibilitati ad effettuarlo si deve almeno procedere ad una fase conoscitiva del caso in esame mediante documentazioni informatiche o cartacee.

Ulteriori accorgimenti per il posizionamento dei sistemi *TLS* possono essere¹²⁹:

- riduzione delle zone d'ombra e occlusioni;
- studio dell'angolo di incidenza massimo accettabile del raggio emesso dalla stazione *laser*;
- omogeneità di risoluzione e adeguata sovrapposizione dell'intero parco di scansioni acquisite;
- visibilità dei *target* previsti.

Il posizionamento dei *target* prevede la scelta di questi in maniera tale da poter essere riconosciuti automaticamente dai *software* che elaborano i dati e congiungono le singole scansioni in un unico modello di nuvole di punti.

Nel caso non si possano posizionare i *target* lungo le superfici del manufatto, possono essere utilizzati per compiere questa funzione i punti naturali, elementi caratteristici riconoscibili in maniera univoca sull'oggetto. La determinazione del posizionamento del centro dei *target* o dei punti naturali materializzati passa attraverso le tradizionali tecniche di rilevamento topografico celerimetrico.

L'utilizzo dei *target* permette di¹³⁰:

- collegare le scansioni tra loro e generare un unico modello di nuvole di punti, ciò è possibile se all'interno di ciascuna scansione sono presenti almeno tre punti di coordinate note tra *target* e punti naturali e che tra scansioni consecutive questi tre punti siano comuni in entrambi;
- geo - riferire le scansioni rispetto ad un sistema di riferimento esterno mediante rototraslazione rigida nello spazio basata sulla conoscenza delle coordinate di almeno 3 punti noti per ciascuna scansione;
- geo - riferire un modello di nuvole di punti generato mediante allineamento e sovrapposizione automatici delle singole scansioni.

¹²⁸ M. SGRENZAROLI, G. P. M. VASSENÀ, *Tecniche di rilevamento tridimensionale...*, p. 19.

¹²⁹ ibidem.

¹³⁰ *ivi*, p. 28.

L'acquisizione delle immagini da parte delle camere generalmente interne ed integrate all'apparecchiatura *laser* permette di:

- aumentare il contenuto di informazioni tematiche utili ad una migliore comprensione delle nuvole di punti restituite;
- semplificare la modalità di visualizzazione;
- estrarre informazioni multispettrali;
- estrarre viste 2D ortografiche o panoramiche dal modello 3D.

L'immagine 2D viene generalmente mappata automaticamente sul modello 3D in scale di toni di grigio¹³¹.

2.3.6.3. Elaborazione dei dati

L'elaborazione dei dati avviene generalmente a posteriori rispetto all'acquisizione in loco dei dati. Si verificano una serie di sotto - fasi, automatiche e manuali a seconda degli obiettivi, che permettono all'operatore di ottenere un singolo modello dell'oggetto rilevato. La sotto - fasi generalmente sono:

- Filtraggio: consiste nella rimozione del *noise* (ovvero rumore di fondo) e degli errori di acquisizione tramite filtri automatici o intervento manuale di un operatore.
- Georeferenziazione: consiste nella definizione delle coordinate globali di ciascun singolo punto della nuvola attraverso la ricostruzione del legame tra le coordinate dei *marker* rilevate in un sistema di riferimento globale e quelle dei punti della nuvola stessa calcolate in un sistema di riferimento strumentale. Il *software* utilizzato determina i parametri di trasformazione delle coordinate minimizzando gli scarti.
- Ricampionamento: consiste nella riduzione dei punti componenti la nuvola e ottenere un modello omogeneo a discapito della originalità del rilievo iniziale.
- Colorazione delle nuvole di punti: ai punti delle nuvole delle scansioni acquisite vengono attribuite le informazioni di contenuto radiometrico rappresentato dalle tre componenti *RGB* (*Red, Green, Blue*) derivanti dalle immagini acquisite dalla camera fotografica e ricampionate tramite tecniche fotogrammetriche.
- Registrazione delle scansioni: consiste nella memorizzazione per ciascun punto di ogni singola nuvola di informazioni legate a coordinate, valori *RGB* e valori di riflettanza. A seguito di questo passaggio le singole scansioni vengono unificate in un unico modello di nuvola di punti.
- Segmentazione: consiste nella sostituzione della nuvola colorata in entità geometriche più leggere dal punto di vista del contenuto informatico, quali per

¹³¹ *ivi*, pp. 22 - 23.

esempio le superfici omogenee (piani, cilindri e con). Oltre ad una semplificazione e un alleggerimento del modello permette di effettuare una classificazione degli elementi. La procedura di segmentazione non è automatica e la sua riuscita dipende da:

- densità e precisione della nuvola di punti acquisita,
- complessità geometrica e formale dell'oggetto rilevato: difficilmente potrà essere segmentata una statua o un elemento architettonico troppo arzigogolato.

Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati di sistemi *TLS*, a seguito di un vantaggio riscontrato in fase di acquisizione dati, inerente alle tempistiche ridotte e alla gran mole di dati ottenuti, in questa fase il processo produttivo presenta alcuni aspetti negativi. Difatti le migliaia di informazioni acquisite comportano tempi di elaborazione notevoli e l'utilizzo di *software* di media-alta fascia, i quali rappresentano un costo non trascurabile da parte dell'operatore di settore. Oltre al fatto che la stessa strumentazione *laser* implica un costo superiore a quella utilizzata per rilievi tradizionali o fotogrammetrici.

2.3.6.4. Restituzione e prodotti della tecnica *TLS*

L'ottenimento di un'unica nuvola di punti dell'oggetto rilevato permette una serie di operazioni quali:

- creazione di modelli sotto forma *mesh*;
- creazione di *mesh* con applicazione di *texture*;
- produzione di elaborati grafici quali sezioni, prospetti, modelli tridimensionali a superfici, modelli a curve di livello, ecc.;
- ortofoto di precisione;
- modello 3D a colori;
- analisi di qualità sull'intero modello o su singole parti di esso;
- misurazioni di angoli o distanze;
- navigazioni virtuali del modello (video, ecc.);
- creazione di modelli digitali, nel caso soprattutto di sistemi *laser* aerei, come *DTM* e *DSM*.

2.4. Rilievo tramite tecnica *SLAM*

La tecnica *SLAM* deriva dall'acronimo inglese "*Simultaneous Localization And Mapping*" il quale indica un insieme di procedure volte a definire una mappatura tridimensionale di ambienti sconosciuti e al tempo stesso utilizzare la scena costruita per dedurre il posizionamento spaziale. Ciò viene effettuato principalmente da una strumentazione

robotica che in base allo studio della propria traiettoria è capace di navigare all'interno della mappa generata.¹³²

L'implementazione di un processo automatico a sistemi robotici può essere suddivisa in quattro apparati:

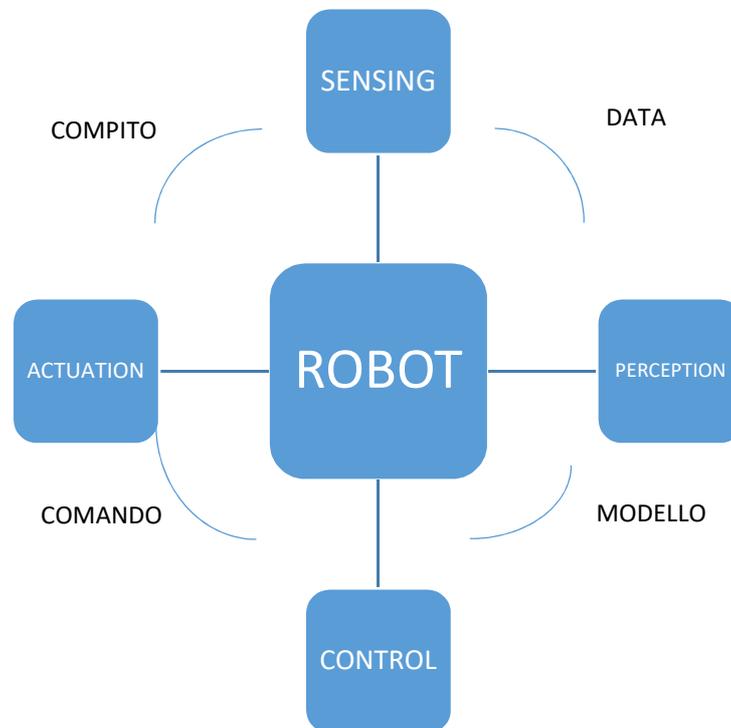


Figura 39: caratteristiche di una procedura automatica implementata ad un sistema robotico.

- *sensing*: insieme di *hardware* che forniscono informazioni sullo stato del *robot* e degli ambienti in cui si trova (codificatori inerziali, *GPS/GNSS*, acquisizioni video, *Lidar*, *Radar*, ecc.);
- *perception*: insieme di *software* che acquisiscono e elaborano i dati di un ambiente in un modello di facile comprensione per il *robot*;
- *control*: insieme di *software* che comandano le azioni del *robot* (pianificazione del percorso ottimale ed elusione degli ostacoli);
- *actuation*: insieme di *hardware* che producono un'azione (motori elettrici, attuatori pneumatici e idraulici, ecc.).

Un aspetto fondamentale della robotica è stata la definizione e installazione di sensori aggiuntivi per garantire un rilevamento soddisfacente degli errori strumentali e fornire una ridondanza del dato e un controllo a ciclo chiuso. Considerati i notevoli progressi compiuti nell'ultimo decennio nell'affidabilità, nella sensibilità e nel costo di questi

¹³² H. DURRANT - WHYTE, T. BAILEY, *Simultaneous Localization and Mapping: Part I*, IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006.

sensori, la comunità scientifica si è focalizzata maggiormente sull'aspetto della percezione. Essa può essere suddivisa in quattro componenti: localizzazione e mappatura tipiche della tecnica *SLAM*, rilevamento degli oggetti in movimento e rilevamento dei cambiamenti tipiche della mappatura a lungo termine.

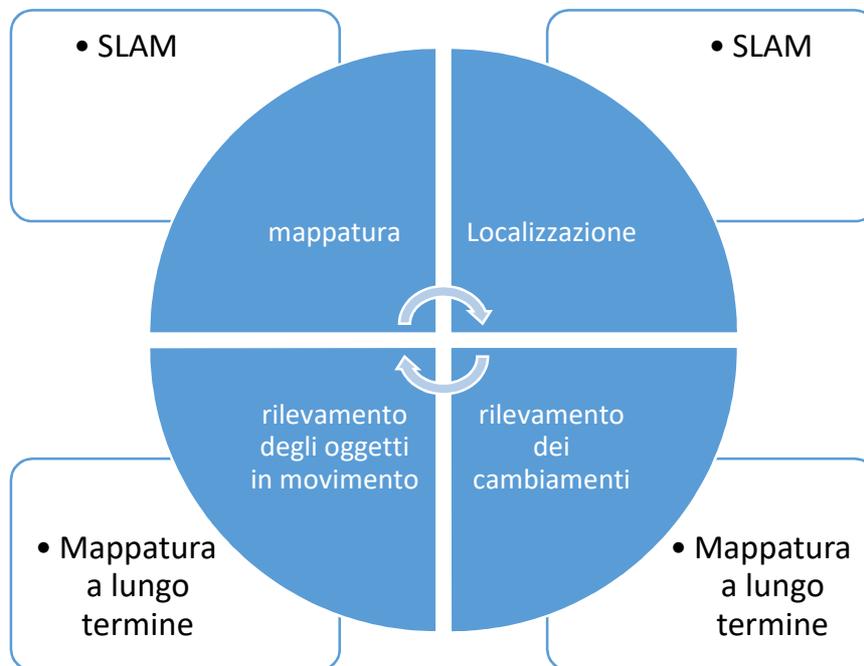


Figura 40: processo della percezione.

La localizzazione è l'abilità di conoscere il proprio posizionamento e orientamento. Il posizionamento di base può essere eseguito convenzionalmente con sistemi *GNSS*, spesso però non è sufficientemente accurato per la navigazione autonoma, come per sistemi di rilevamento laser in movimento, con precisioni che raggiungono anche i 10-20 m. Con le correzioni della tecnica di posizionamento *RTK (Real Time Kinematic)* la precisione può essere migliorata fino ad arrivare all'ordine del centimetro ma ciò non può essere garantito senza la giusta copertura satellitare o con interferenze *multipath* causate dalla riflessione su superfici limitrofe. Questi inconvenienti possono essere superati con due soluzioni:

- *data fusion*: dove un *IMU* fornisce dati in grado di aiutare il sistema *GNSS* a rifiutare i segnali provenienti da sorgenti *multipath* e a mantenere una localizzazione continuativa anche nelle aree dove il sistema *GNSS* non ha copertura satellitare. L'accuratezza della soluzione dipende dal costo dell'*IMU*.
- *Pseudo-satellites*: dove dei trasmettitori *GNSS* possono essere installati attorno alle zone con scarsa copertura satellitare per garantire una ricezione completa. Tuttavia, i pseudo satelliti non sono autorizzati a trasmettere sulle bande *GNSS*

convenzionali, rendendo così il sistema incompatibile con i ricevitori *GNSS* commerciali.

La soluzione alternativa è quella di installare una rete di localizzazione non *GPS/GNSS*. Questa può utilizzare tecniche *radar*, *laser*, *tag RFID*¹³³ o tecniche alternative di localizzazione *TOF* simili a quella degli aeroporti e dei porti che seguono il movimento di aeromobili o navi nel loro settore d'interesse.

La mappatura è la capacità di misurare in maniera continuativa nel tempo l'ambiente 3D circostante. Essa può essere condotta con un sistema di rilevamento convenzionale (come per esempio la tecnologia *laser*). Tuttavia da soli questi sistemi non forniscono la fedeltà temporale necessaria per la navigazione nella mappatura creata o la pianificazione ottimale di un percorso di viaggio.

Il rilevamento degli oggetti in movimento è la capacità di determinare la posizione di altri oggetti in movimento nello scenario creato. Nel caso dei rilievi topografici, questa opzione viene principalmente sfruttata nei cantieri edili, dove la presenza di strumentazioni mobili quali gru elevatori, o mezzi di movimentazione, possono interferire con l'operazione di rilievo e creare interferenze dannose al livello di sicurezza prestabilito. Per far fronte a ciò si sfrutta l'utilizzo di due tipologie di sensori:

- attivi, quando lo strumento di rilievo trasmette la propria posizione agli altri sensori installati sugli altri macchinari, collegati tra loro mediante una rete generale;
- passivi, quando lo strumento di rilievo possiede la capacità di "vedere" il posizionamento degli altri oggetti limitrofi.

Il rilevamento dei cambiamenti è la capacità di rilevare qualsiasi tipologia di cambiamento nella mappa del terreno digitale nel tempo. Interessa principalmente l'individuazione automatica di ostacoli fissi. Le tecnologie utilizzate per ovviare a questa problematica sono l'utilizzo di *radar*, *laser* e ultrasuoni.¹³⁴

2.4.1. Tecnica *SLAM* con sensore *laser*

Nell'edilizia, per il rilievo di beni architettonici, può essere utilizzata la tecnica *SLAM* basata sull'utilizzo di un sensore *laser* adoperato per eseguire la mappatura dell'ambiente da rilevare.

La mappatura si basa quindi sui principi della scansione *laser*, ma la differenza sostanziale è la progettazione di una strumentazione capace di generare una nuvola

¹³³Radio Frequency IDentification: tecnica di identificazione e riconoscimento di oggetti, animali o persone tramite l'utilizzo delle frequenze radio. Si basa sull'acquisizione e aggiornamento di dati contenuti in appositi marchi digitali chiamati *tag*.

¹³⁴ E. DUFF, *Recent development in SLAM: Technology and its impact on mine automation*, QLD Mining&Energy, 2011, pp. 75-78.

densa di punti in tempo reale evitando l'utilizzo di sistemi *GPS/GNSS* e il posizionamento di stazioni statiche attorno alla porzione di territorio o del manufatto da rilevare. Ciò permette un miglioramento sostanziale delle tecniche di acquisizione dati in ambienti chiusi dove il sistema di posizionamento è maggiormente disturbato, oltre a garantire un abbattimento delle tempistiche di rilievo.

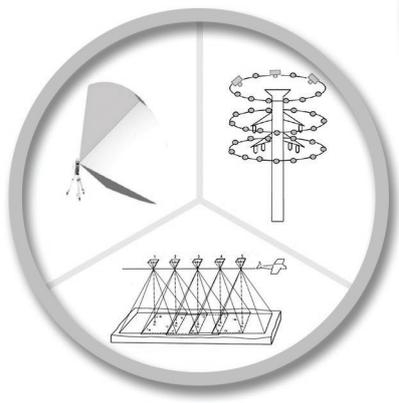
La strumentazione utilizzata difficilmente è a pilotaggio remoto o *unmanned*¹³⁵. Di solito l'apparecchio è mobilitato direttamente da un operatore che si muove nello spazio percorrendo il percorso prestabilito.

In questo campo il *Data61's Robotics team* dell'azienda governativa australiana *CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)* è il maggiore sviluppatore di algoritmi che gestiscono la mappatura e la localizzazione sincronizzata dell'ambiente oggetto del rilievo.

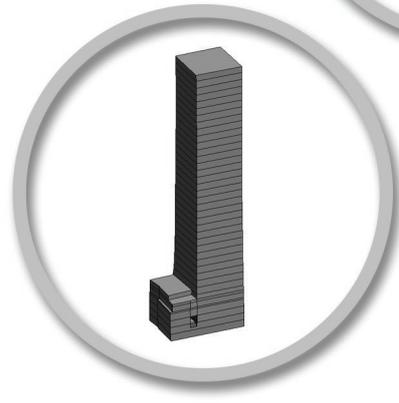
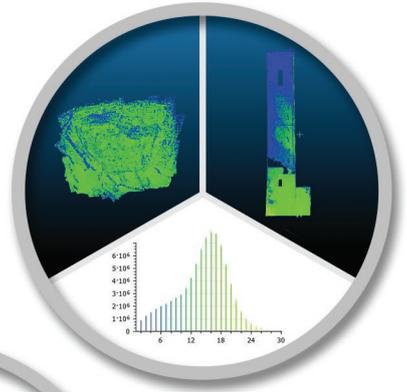
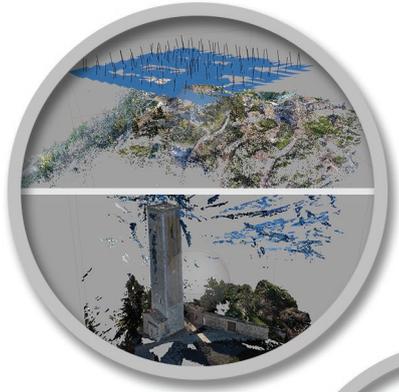
L'azienda è arrivata allo sviluppo di questa nuova tecnica di rilievo in seguito a ricerche relative a sistemi robotici applicati ai principali settori di cui si occupa: navigazione, movimentazione masse e manipolazione di oggetti.¹³⁶

¹³⁵ Senza pilota a bordo.

¹³⁶ <https://research.csiro.au/robotics/research-areas/>. Ultima consultazione 22/09/2017.



CAPITOLO 3 ACQUISIZIONE DEI DATI



L'acquisizione dei dati oggetto del seguente elaborato è stata effettuata dal *team* studentesco "DIRECT" (*Disaster RECOVERY Team*) del Politecnico di Torino, nell'ambito di un progetto interdisciplinare che ha visto coinvolti tra le altre parti il dipartimento DISEG, sempre del Politecnico di Torino e i comuni di San Severino Marche e Tolentino. La campagna di rilievo si è svolta tra il 20 e il 24 Febbraio 2017 nei due comuni sopracitati per raccogliere dati inerenti alle zone interessate dagli eventi sismici del centro Italia, accorsi durante la seconda metà del 2016 a partire dal 24 Agosto.

Il rilievo delle aree e dei manufatti interessanti il comune di San Sanseverino è stato attuato nei primi giorni, più precisamente il 21 e il 22 Febbraio.

I rilievi compiuti sul territorio comunale sono stati i seguenti:

- colle Monte Nero (località Castello) tramite tecnica fotogrammetrica aerea attraverso l'utilizzo di drone UAV, il 21 Febbraio;
- Torre degli Smeducci tramite tecnica fotogrammetrica aerea attraverso l'utilizzo di drone UAV e tecnica fotogrammetrica terrestre il 21 Febbraio;
- Torre degli Smeducci tramite tecnica TLS;
- Duomo Vecchio, non oggetto dell'elaborato, tramite tecnica fotogrammetrica aerea attraverso l'utilizzo di drone UAV, tecnica fotogrammetrica terrestre e tecnica *laser scanner* il 21 e 22 Febbraio.

3.1 Materializzazione delle reti topografiche

I rilievi eseguiti nelle due date sopra citate sull'area di San Severino Marche hanno previsto inizialmente la materializzazione di una rete principale d'inquadramento e un successivo rilievo di dettaglio.

3.1.1. Rete principale di inquadramento

La rete principale è servita a inquadrare i manufatti oggetto delle operazioni di acquisizione dati, ovvero la Torre degli Smeducci, la facciata esterna principale del Duomo Vecchio e il chiostro di quest'ultimo.

Il risultato delle operazioni di misura sono stati i seguenti vertici topografici: 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, e 6000; i primi quattro sono stati utilizzati per le parti esterne, gli altri due per il chiostro del Duomo.

Il posizionamento spaziale di questi punti è stato determinato avvalendosi dell'utilizzo della tecnica GPS/GNSS in modalità statica. Dunque, su ciascun vertice è stata posizionata una stazione con antenna GPS che, appoggiandosi alle costellazioni satellitari presenti nell'orbita terrestre, ne ha acquisito le coordinate.

La tecnica GPS/GNSS restituisce coordinate del punto da rilevare, eseguendo semplici calcoli di distanze intercorrenti tra i satelliti in orbita (di posizione nota) e il ricevitore

dello strumento posizionato sul punto stesso. La misurazione si basa sul calcolo del tempo di ritorno di un'onda elettromagnetica, modulata da un codice, tra i due oggetti in questione. Dovendo acquisire le tre incognite del punto si hanno tre misure di distanze e quindi la necessità della presenza di tre satelliti; un quarto satellite è invece indispensabile per sincronizzare i tempi che sussistono tra gli orologi della strumentazione a terra e quella in orbita.

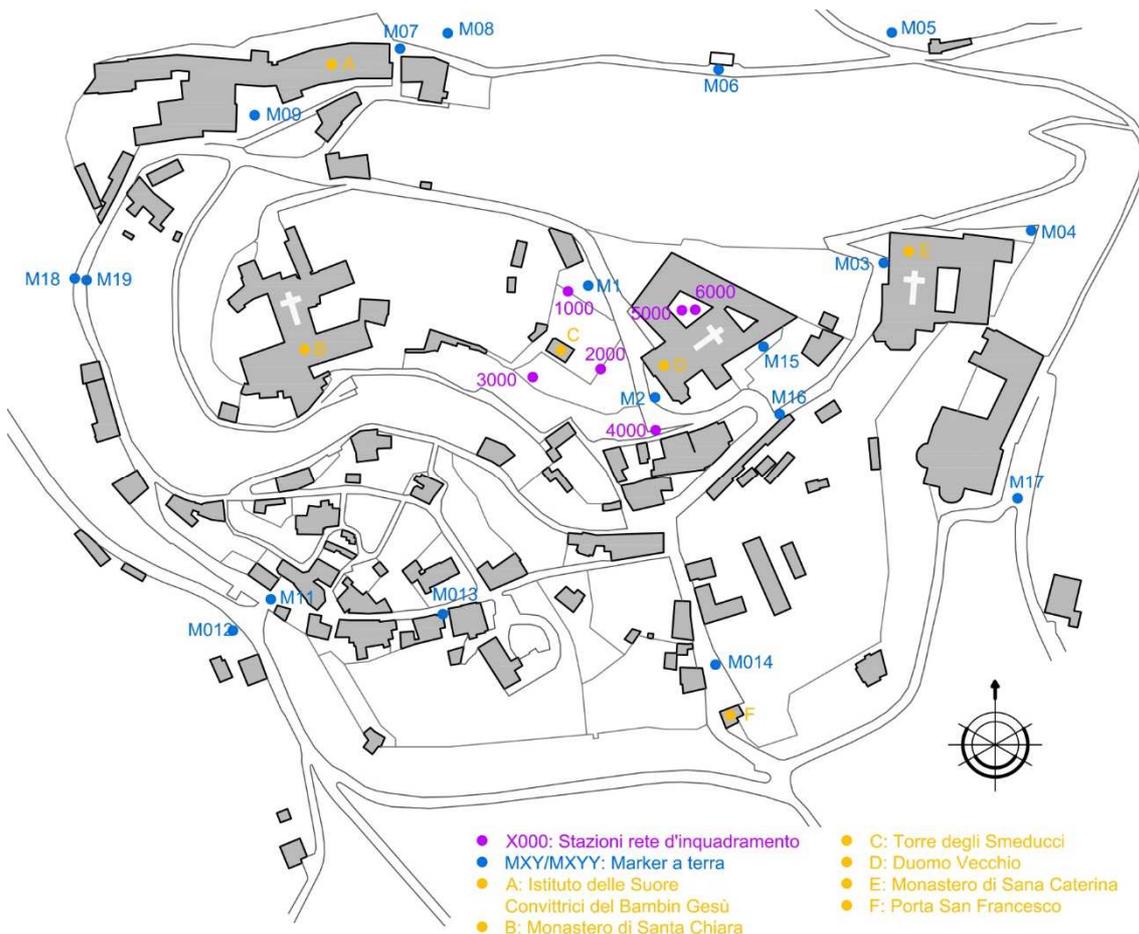


Figura 41: mappa non in scala del colle Monte Nero con identificazione dei monumenti di maggior interesse e delle due reti: primaria in viola e secondaria in blu.

3.1.2. Rilievo di dettaglio

La rete secondaria è servita invece ad inquadrare l'intera area del colle Monte Nero ed è stata materializzata sia con dei *marker* a terra di molteplici motivi a seconda della necessità di contrasto con la colorazione naturale delle superfici di appoggio, sia con dei punti naturali identificati in loco, quali spigoli di fabbricati o tombini delle reti di servizi cittadini.

Le coordinate di questa rete sono state ottenute con tecnica cinematica *RTK*, ovvero "Real Time Kinematic".

La tecnica prevede il posizionamento del “rover”, ovvero un ricevitore, su ciascun punto da rilevare, per qualche secondo fino a che la misurazione delle coordinate non è terminata. E’ presente poi un altro ricevitore statico che fa da base all’intero sistema; nel caso del rilievo in questione corrisponde alla stazione del vertice 2000. Per espletare le pratiche di rilievo sono stati utilizzati un “LEICA 1200 SERIES” e un “GEOMAX ZENITH25”.



Figura 42: a sinistra il GEOMAX ZENITH25, a destra il LEICA 1200 Series.
 Fonti: http://www.geomax-positioning.it/Serie-Zenith25-Pro_1336.htm;
<http://www.edilmaco.it/it/prodotto/leica-1200-gps/>.

3.1.3. Monografie

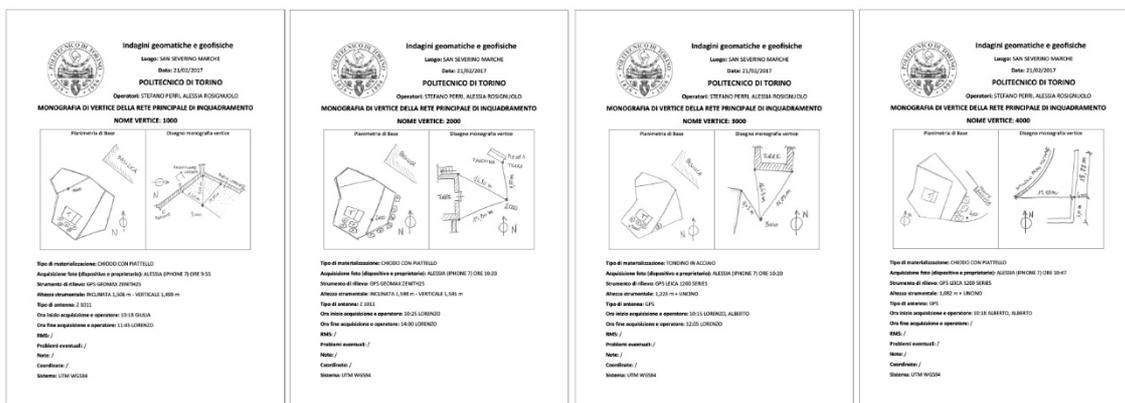


Figura 43: monografie dei primi quattro vertici utilizzati per il rilievo della rete di dettaglio della Torre degli Smeducci.

Per ciascun punto della rete primaria statica è stato redatto un documento, chiamato monografia, con identificate una serie di informazioni (tra cui per esempio nome vertice, operatori, data, ora e tempo di acquisizione, strumentazione utilizzata e documentazioni grafiche o fotografiche del punto), utili nella fase successiva di elaborazione dei dati.

Tutte le monografie compilate vengono riportate come documenti allegati. Invece per i *marker* a terra al posto delle monografie cartacee sono stati creati dei documenti informatici sul sito "<https://www.google.it/maps>" attraverso il comando "etichetta". Per ciascun punto è stata posizionata sulla mappa un'etichetta colorata a cui fanno riferimento il nome del *marker*, un'immagine che ne documenta l'esatta ubicazione ed eventuali note utili al riconoscimento. Una volta conclusa l'operazione, per tutti i punti di dettaglio, è stato creato un *link* che rimanda direttamente alla zona del colle Monte Nero con le etichette in primo piano.



Figura 44: Visualizzazione delle monografie dei marker a terra create su "Google Maps". Link: <https://www.google.it/maps/@43.2258925,13.1748431,441m/data=!3m1!1e3!4m2!6m1!1s1s5j8cTME XcYCYyvO2EvCYEjmpPk>.

Il *team* studentesco, dopo aver effettuato la compensazione delle reti, ha restituito le seguenti coordinate dei *marker* a terra rilevati con tecnica RTK.

Marker	Est	Nord	Quota	Marker	Est	Nord	Quota
M1	351886,449	4787540,017	342,010	M012	351724,887	4787380,695	285,032
M2*	-	-	-	M013	351820,179	4787387,066	300,660
M03	352023,058	4787550,719	321,664	M014	351944,973	4787363,001	326,655
M04	352090,959	4787566,030	312,230	M15	351967,836	4787511,367	336,901
M05	352026,980	4787658,212	262,599	M16	351974,702	4787481,470	331,735
M06	351946,354	4787640,959	280,167	M17	352087,044	4787441,055	295,444
M07	351800,251	4787652,005	304,610	M18*	-	-	-
M08	351821,454	4787657,016	298,863	M19	351654,635	4787542,653	303,381
M09	351732,358	4787619,172	311,253	M111**	351740,427	4787394,354	287,186
M11	351740,435	4787394,352	287,190	* Marker materializzati non rilevati			

**Marker ridondante scartato

Tabella 2: coordinate dei marker a terra rilevati con tecnica RTK.

3.2. Rilievo fotogrammetrico da UAV del colle Monte Nero

La materializzazione dei *marker* a terra, , ha permesso di avere a disposizione un numero sufficiente di *GCP* (*Ground Control Point*) per condurre il corretto processo fotogrammetrico nella successiva fase di elaborazione dati. Il passo successivo è stato quindi quello inerente alla presa fotogrammetrica dell'intera area del colle Monte Nero. Per effettuare ciò è stato necessario prendere in considerazione svariati parametri che entrano in gioco nella progettazione di un volo fotogrammetrico, come già spiegato nel capitolo 2. Gli stessi sono dipendenti dalla strumentazione utilizzata.

Per rilevare l'area sono stati effettuati due differenti voli: il primo riguardante l'intero colle, eseguito dal drone ad ala fissa *eBee* della casa madre *SenseFly*, il secondo riguardante la sola zona soprastante la Torre degli Smeducci e il Duomo Vecchio, eseguito dal drone quadricottero *Phantom4* della casa madre *Dji*.

3.2.1. Volo *SenseFly eBee*



Figura 45: Drone ad ala fissa *SenseFly eBee*. Fonte: <https://www.sensefly.com/drones/ebee.html>.

Per poter effettuare l'acquisizione dei dati fotografici il drone *SenseFly eBee* è stato dotato di una camera *Canon PowerShot S110*.

Il volo ha interessato un'area di circa 48 ettari con le seguenti estensioni: lato longitudinale = 800 m circa e lato trasversale = 600 m circa.

Il *GSD* massimo accettabile, dipendente dal fattore della scala di rappresentazione con cui si vuole restituire l'oggetto del rilievo e da cui dipende il progetto del rilievo, si può ottenere con le seguente formula:

$$GSD_{massimo} = 0,5 \cdot precisione_{progetto} = 0,5 \cdot (0,2 \cdot fattore\ della\ scala)^{137} \quad [3.1]$$

La scala di rappresentazione fissata è pari 1:500, perciò il *GSD* massimo equivale a 0,05 m.

¹³⁷ A. M. LINGUA, *Capitolati per la produzione di cartografia numerica, I metadati, fotogrammetria diretta, droni*, Dispense del corso di "Cartografia numerica e GIS", Politecnico di Torino.

Passo successivo è stato calcolare il *GSD* di progetto e il numero di strisciate necessarie per il rilievo. Per far ciò è stato necessario prendere in considerazione le seguenti caratteristiche delle strumentazioni utilizzate e dell'area in esame:

Drone SenseFly eBee

<i>Categoria</i>	Micro UAV
<i>Tipologia</i>	Ala fissa
<i>Materiale</i>	Schiuma EPP, struttura in carbonio e parti composite
<i>Peso</i>	0,690 kg
<i>Apertura alare</i>	0,96 m
<i>Durata massima di volo</i>	50 minuti
<i>Velocità di crociera nominale</i>	40-90 km/h
<i>Range collegamento radio</i>	3 km
<i>Resistenza al vento</i>	45 km/h
<i>Massima copertura aerea</i>	12 km ²

Tabella 3: informazioni relative al drone SenseFly eBee. Fonte: <https://www.sensefly.com/drones/ebee.html>.

Camera Canon PowerShot S110

<i>Focale</i>	5,2 mm
<i>Risoluzione</i>	(4000x3000) pixel
<i>Dimensioni pixel</i>	(1,86x1,86) µm
<i>Dimensioni sensore</i>	(7,44x5,58) mm

Tabella 4: informazioni relative alla camera fotografica Canon PowerShot S110. Fonte: manuale di istruzione Canon PowerShot S110.

Grazie a questi ultimi dati si sono potuti calcolare tutti i parametri mancanti:

Dati del progetto di volo

<i>Precisione e tolleranza di progetto</i>	0,10 - 0,20 m
<i>GSD massimo</i>	0,05 m
<i>Area da rilevare</i>	(800x600) m circa
<i>Altezza di volo di progetto</i>	140 m
<i>m_b di progetto</i>	26923
<i>GSD di progetto</i>	0,05 m
<i>Strisciate progetto</i>	8

Tabella 5: dati del progetto di volo ottenuto con i calcoli esposti dalle dispense fornite nel corso di Cartografia Numerica e GIS del Politecnico di Torino.

Il piano di volo è stato utilizzato nell'applicazione *SenseFly eMotion 2* per poter controllare in modalità automatica la presa fotogrammetrica in tutte le sue fasi, dall'acquisizione delle immagini, al numero delle strisciate, al tempo di volo, ecc.

3.2.2. Volo Dji Phantom4



Figura 46: drone Dji Phantom4. Fonte: <https://www.dji.com/phantom-4>.

La camera montata sul drone *Dji Phantom4* è la *Canon FC330*.

Il volo ha interessato un'area di circa 1 ettaro con le seguenti estensioni: lato longitudinale = 100 m circa e lato trasversale = 100 m circa.

La scala di rappresentazione fissata è identica al caso precedente, perciò il *GSD* massimo equivale a 0,05 m. Mentre le caratteristiche delle strumentazioni utilizzate e dell'area in esame sono le seguenti:

Drone Dji Phantom 4

<i>Categoria</i>	Micro UAV
<i>Tipologia</i>	Multirotore, quadricottero
<i>Materiale</i>	Struttura in magnesio
<i>Peso</i>	1,380 kg
<i>Durata massima di volo</i>	28 minuti
<i>Velocità massima orizzontale</i>	57,6 km/h
<i>Range collegamento radio</i>	3,5 km

Tabella 6: Informazioni relative al drone Dji Phantom4. Fonte: <http://www.dji.com/phantom-4>.

Camera Canon FC330

<i>Focale</i>	3,61 mm
<i>Risoluzione</i>	(4000x3000) pixel
<i>Dimensioni pixel</i>	(1,56x1,56) μ m
<i>Dimensioni sensore</i>	(6,24x4,68) mm

Tabella 7: informazioni relative alla camera fotografica Canon FC330. Fonte: manuale di istruzione Canon FC330.

Grazie a questi ultimi dati si sono potuti calcolare tutti i parametri mancanti:

Dati del progetto di volo

<i>Precisione di progetto</i>	0,10 m
<i>Tolleranza di progetto</i>	0,20 m
<i>GSD massimo</i>	0,05 m
<i>Area da rilevare</i>	(100x100) m circa
<i>Altezza di volo di progetto</i>	60 m
<i>m_b di progetto</i>	16620
<i>GSD di progetto</i>	0,025 m
<i>Strisciate progetto</i>	3

Tabella 8: dati del progetto di volo ottenuto con i calcoli esposti dalle dispense fornite nel corso di Cartografia Numerica e GIS del Politecnico di Torino.

Il piano di volo è stato realizzato utilizzando l'applicazione "Pix4D Mapper" per poter controllare in modalità automatica la presa fotogrammetrica in tutte le sue fasi.

3.3. Rilievo della Torre degli Smeducci

Terminata la fase di rilievo dei vertici componenti la rete di inquadramento attorno alla Torre degli Smeducci è stato realizzato il rilievo di dettaglio con metodo celerimetrico. Successivamente sono stati portati avanti tre differenti rilievi: due fotogrammetrici (aereo tramite l'utilizzo di drone UAV e terrestri) e uno con tecnica *Laser Scanner* Terrestre.

3.3.1. Rilievo di dettaglio con metodo celerimetrico

Il rilievo di dettaglio della Torre è stata ricavata sfruttando la rete principale materializzata inizialmente. Infatti ciascun vertice della rete di inquadramento acquisito, ha fatto da base per il posizionamento della stazione totale, utilizzata per collimare tutti i GCP studiati in fase di progetto della presa fotogrammetrica.

I punti del rilievo di dettaglio sono di due tipologie: punti naturali significativi della torre (come per esempio: spigoli, estremità delle chiavarde, ecc.) e *target* a scacchi bianchi e neri.

Per rilevare tutti i *marker* presenti sulle superfici della torre sono stati utilizzati quattro dei sei vertici della rete primaria, ciascuno per ogni singolo lato. Inoltre per tutti i prospetti sono stati realizzati gli eidotipi¹³⁸ riportanti le localizzazioni di tutti i punti.

¹³⁸ Veloce disegno fatto a mano rappresentante l'oggetto di un rilievo topografico e riportante una serie di indicazioni utili all'operatore nelle fasi successive al rilievo stesso.

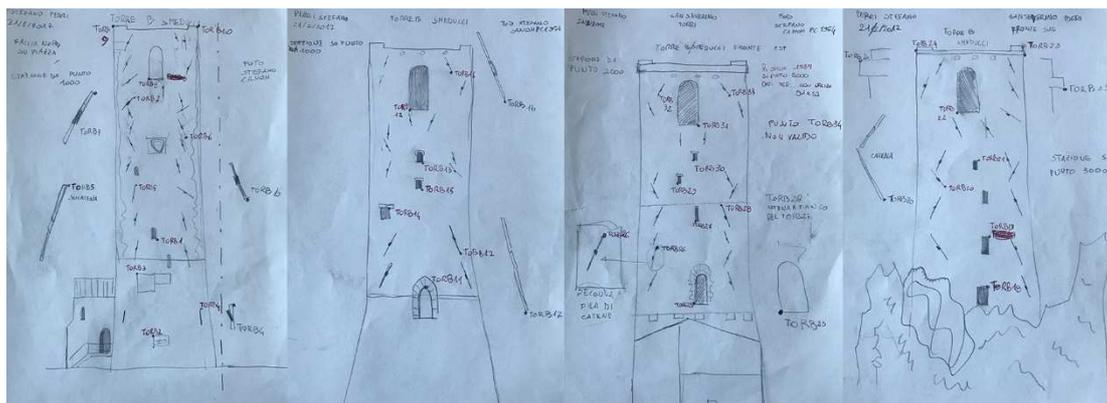


Figura 47: eidotipi dei quattro prospetti della Torre degli Smeducci realizzati in loco da Stefano Perri.

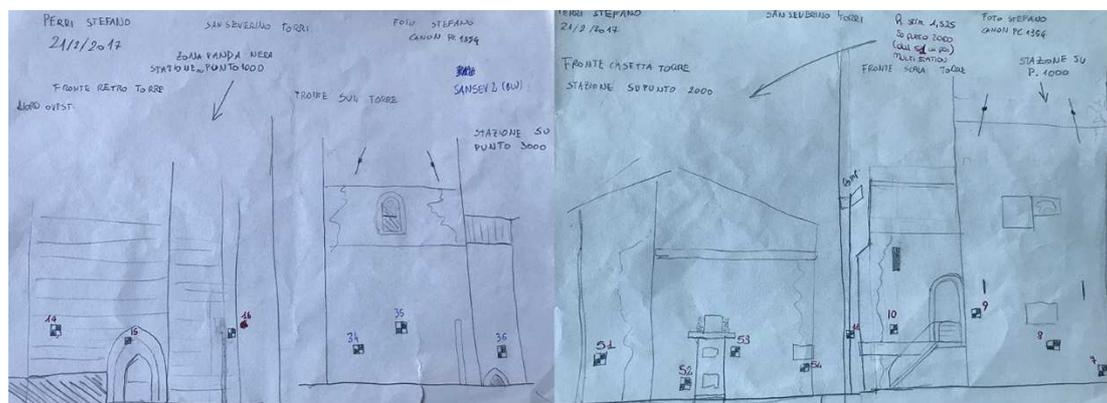


Figura 48: eidotipi delle parti inferiori dei quattro lati della Torre degli Smeducci, realizzati in loco da Stefano Perri.

Qui di seguito vengono espone le coordinate di tutti i punti naturali significativi collimati.

Marker	Est	Nord	Quota	Marker	Est	Nord	Quota
TORB1	351874,39557	4787513,95806	353,66513	TORB18	351870,73600	4787508,10000	360,04000
TORB2	351875,04240	4787513,99633	345,47659	TORB19	351870,65400	4787508,05100	363,23000
TORB3	351875,88320	4787513,08691	350,87452	TORB20	351868,78700	4787509,15300	367,66000
TORB4	351872,68738	4787515,48850	346,28239	TORB21	351870,38200	4787508,01800	369,21000
TORB5	351875,82726	4787512,75666	358,24021	TORB22	351869,57700	4787508,36800	373,13000
TORB6	351872,45089	4787514,79248	365,15113	TORB23	351872,70600	4787505,87700	380,94000
TORB7	351875,62977	4787512,42851	369,85170	TORB24	351867,09500	4787509,58500	381,35000
TORB8	351874,43869	4787513,08381	373,00791	TORB25	351875,70401	4787509,60883	352,63677
TORB9	351876,41857	4787511,40026	382,23886	TORB26	351874,40795	4787507,75259	355,79231
TORB10	351870,87942	4787515,20934	382,15862	TORB27	351875,10557	4787509,14297	362,84534
TORB11	351870,06660	4787513,44761	351,73537	TORB28	351875,81873	4787510,20323	363,40644
TORB12	351869,66735	4787513,07954	373,24441	TORB29	351874,74924	4787508,70455	366,39075
TORB13	351869,62788	4787512,86786	366,21563	TORB30	351874,92515	4787509,05822	369,17404
TORB14	351870,72134	4787514,39697	359,61276	TORB31	351875,11486	4787509,44631	373,27558
TORB15	351869,87432	4787513,17583	362,89858	TORB32	351873,46053	4787507,12059	378,54548
TORB16	351868,02308	4787510,75478	378,50590	TORB33	351875,96226	4787510,74653	378,68776
TORB17	351868,69564	4787511,48688	351,92733	TORB34	351880,37168	4787509,42577	345,94232

Tabella 9: coordinate dei punti naturali.

Mentre nella tabella successiva vengono esposte quelle di tutti i punti collimati di tipo *target*.

Marker	Est	Nord	Quota	Marker	Est	Nord	Quota
1	351882,98134	4787550,86840	343,97278	21	351909,83034	4787528,20129	343,29319
2	351879,77088	4787549,48835	343,95049	22	351913,65708	4787524,08552	343,51345
3	351876,27765	4787547,94059	342,82262	23	351920,57834	4787516,81121	343,25345
4	351874,15132	4787544,49240	344,26973	24	351920,08832	4787512,23877	343,47276
5	351873,06849	4787539,27233	343,14014	25	351916,43620	4787509,46547	342,78678
6	351871,62567	4787532,60526	344,29506	26	351912,59089	4787507,52125	342,23444
7	351871,97281	4787516,05314	342,99234	27	351912,23852	4787506,13583	342,27878
8	351874,53786	4787514,36753	343,89240	28	351914,64123	4787502,46238	340,99466
9	351877,14435	4787512,56560	345,46657	29	351921,26758	4787494,84382	341,46817
10	351879,84396	4787510,82128	344,86383	30	351923,33391	4787491,78981	341,79416
11	351 884,76707	4787491,63975	342,95822	31	351926,22925	4787487,64542	341,52820
12	351870,43620	4787527,13159	343,04130	32	351890,42222	4787541,16101	342,90109
13	351868,93472	4787520,24551	343,97998	33	351896,30100	4787528,86606	342,73334
14	351871,18303	4787515,13239	343,68305	34	351868,79600	4787509,42500	343,09000
15	351869,73331	4787513,03088	343,36338	35	351871,04300	4787507,91500	344,08000
16	351867,68601	4787510,29126	343,82504	36	351875,06200	4787505,63500	343,96000
17	351898,03051	4787497,00848	342,34825	51	351877,17415	4787505,00995	343,65903
18	351902,69857	4787506,73157	342,46511	52	351878,80924	4787507,38421	343,08225
19	351900,95291	4787516,21521	342,77852	53	351879,39600	4787508,14132	344,54223
20	351899,30498	4787520,64413	342,70250	54	351880,80786	4787510,04911	343,75797

Tabella 10: coordinate dei marker di tipo *target*.

3.3.2. Fotogrammetria da UAV

Il rilievo della Torre degli Smeducci con drone *UAV* è stato effettuato dal mezzo *Dji Phantom4* dotato sempre di camera *Canon FC330*.

Il *planning* di volo è stato valutato in loco, impostando come parametro principale la distanza del drone (mantenuta costante a quote di volo progressive) da ciascuna parete della torre, per poter rispettare il valore della scala di rappresentazione voluta pari a 1:50 e del *GSD* ammissibile pari a 5 mm.

La distanza, pari a circa 4 - 5 m, è stata tenuta sotto controllo tramite i sensori distanziometrici presenti come strumentazione di base del drone.

La pratica della presa fotogrammetrica è stata espletata attraverso una serie di strisciate verticali, con posizionamento dell'asse della fotocamera perpendicolare alle superfici della torre da rilevare. Le strisciate sono state in tutto sette:

- una per ciascun spigolo della torre,
- una per ciascun lato della torre tranne quello sud a causa della presenza di vegetazione arborea ad alto fusto.

Per ciascuna strisciata sono stati acquisiti circa 25 - 30 fotogrammi per un totale di 172 immagini.

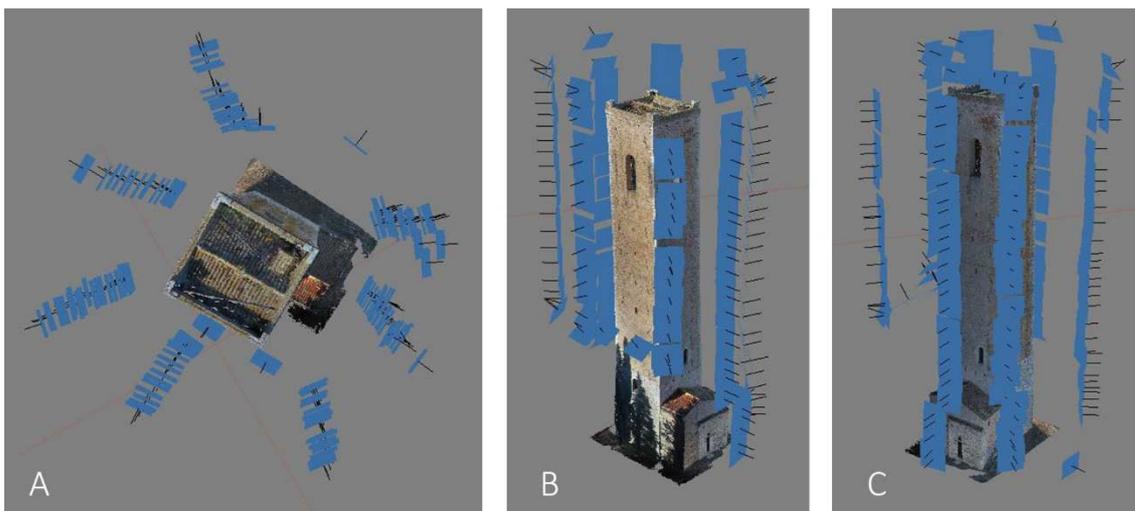


Figura 49: identificazione delle strisciate effettuate dal drone *Dji Phantom4*; a) vista dall'alto, b) vista fronte sud - est, c) vista nord - est.

3.3.3. Fotogrammetria terrestre

Per il rilievo della Torre degli Smeducci con tecnica fotogrammetrica terrestre è stata utilizzata la camera fotografica “*Nikon D800E*”.



Figura 50: Camera *Nikon D800E*. Fonte: <http://www.nikonusa.com/en/nikon-products/product-archive/dslr-cameras/d800e.html>.

Camera Nikon D800E

<i>Focale</i>	24 mm
<i>Risoluzione</i>	(7360x4912) pixel
<i>Dimensioni pixel</i>	(1,56x1,56) μm
<i>Dimensioni sensore</i>	(35x23,359) mm

Figura 51: informazioni relative alla camera fotografica *Nikon D800E*. Fonte: manuale di istruzione *Nikon D800E*.

In questo caso l’acquisizione delle immagini ha subito delle consistenti variazioni a causa della differente tecnica di rilievo. Essendo il manufatto un oggetto longilineo alto circa

40 m e dovendo rilevare tenendo in considerazione sia la completezza della torre stessa senza tralasciare le parti più alte, sia il *GSD* ammissibile dipendente dalla scala di rappresentazione fissata (1:50), allora si è proceduti nel seguente modo:

- per i lati est e nord sono state eseguite circa tre strisciate circolari concentriche:
 - quella più interna con asse della camera perpendicolare alla parete, per poter rilevare le parti più basse della torre (circa 1/4 dell'altezza totale);
 - quella centrale con asse della camera obliquo, con l'inclinazione ideale per poter rilevare la parte centrale della torre (circa da 1/4 ai 3/4 dell'altezza totale);
 - quella più esterna con asse della camera obliquo, con inclinazione ideale per poter rilevare la parte terminale della torre (circa l'ultimo quarto dello sviluppo in altezza della torre);

più alcuni fotogrammi sparsi per riempire i buchi lasciati.

- Per i lati ovest e sud sono state eseguite solo delle singole strisciate rettilinee con asse della camera perpendicolare alle pareti a causa degli ostacoli fisici retrostanti (il muro per il lato ovest e la presenza di vegetazione per quello sud).

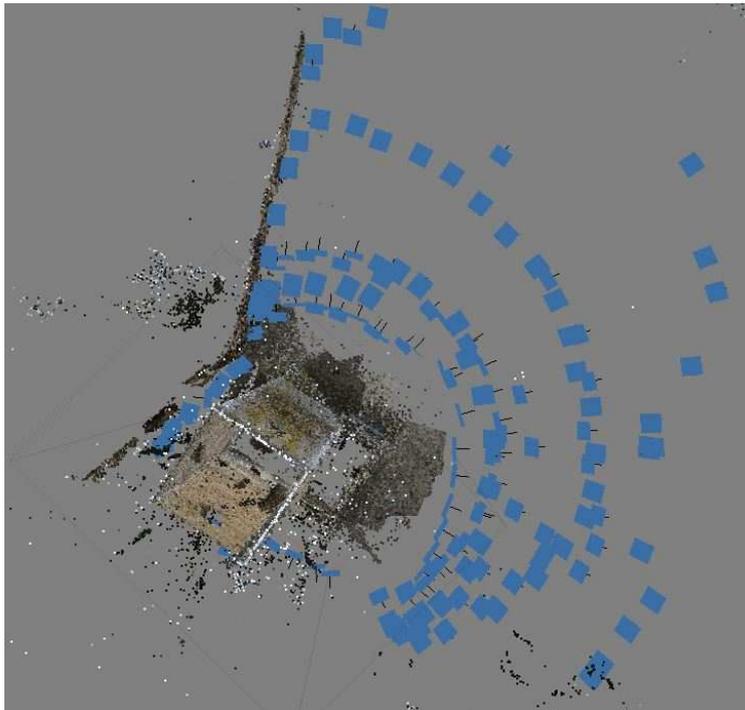


Figura 52: identificazione delle strisciate effettuate con la presa fotogrammetrica terrestre.

3.3.4. Rilievo con *Laser Scanner*

Per il rilievo della Torre degli Smeducci realizzato con tecnica *TLS* sono stati utilizzati due *laser scanner Faro CAM2*: uno di proprietà del *DAD* (Dipartimento di Architettura e

Design) e l'altro del DIATI (Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente del Territorio e delle Infrastrutture).



Figura 53: Faro CAM2. Fonte: <http://www.faro.com>.

Le specifiche tecniche di operatività sono le seguenti:

Laser scanner Faro CAM2

<i>Range Focus3D x 130</i>	(0,6 - 130) m
<i>Velocità di misurazione</i>	Fino a 96.000 pti/s
<i>Errore di linearità</i>	± 2 mm
<i>Macchina fotografica a colori integrata</i>	Fino a 70 milioni di <i>pixel</i>
<i>Classe laser</i>	1
<i>Peso</i>	5,2 kg
<i>Multi-sensor</i>	GPS, bussola, sensore di altezza, compensatore biassiale
<i>Dimensioni dello scanner</i>	240 x 200 x 100 mm
<i>Controllo dello scanner</i>	Tramite <i>display touchscreen</i> e <i>WLAN</i>

Figura 54: caratteristiche del laser scanner Faro CAM2. Fonte: <http://www.faro.com>.

La strumentazione è stata posizionata in diversi punti attorno alla Torre per permettere una sufficiente completezza del rilievo. Ad ogni stazionamento del *laser scanner* in un preciso punto, corrisponde una scansione a 360° della relativa area circostante.

Come già esposto, oltre alla Torre, anche la facciata e il chiostro del Duomo Vecchio sono state rilevate con la stessa tecnica. Di seguito viene illustrato l'elenco completo delle scansioni acquisite durante la campagna topografica e quello relativo alle scansioni riguardanti la sola torre.

Scansioni laser scanner DAD

Nome generale scansioni	Arch_sansevXXX (X = numero scansione)
Numero scansioni totali	25
Scansioni totali	Arch_sansev001 - Arch_sansev025
Numero scansioni utilizzate	11
Scansioni utilizzate	Arch_sansev001 - Archsansev010, Arch_sansev025,

Scansioni laser scanner DIATI

Nome generale scansioni	Inge_sansevXXX (X = numero scansione)
Numero scansioni totali	21
Scansioni totali	Inge_sansev001 - Inge_sansev021
Numero scansioni utilizzate	5
Scansioni utilizzate	Inge_sansev001 - Inge_sansev005

Totale scansioni utilizzate = 16

Figura 55: scansioni totali acquisite dal laser scanner e totali utilizzate per la Torre degli Smeducci.

3.3.5. Rilievo con tecnica SLAM

Le parti interne alla Torre sono state rilevate con la tecnica *SLAM*. In questa fase però sono state riscontrate problematiche inerenti all'acquisizione dei dati dei piani terzo, quarto, quinto e sesto (l'ultimo) fuori terra. Perciò per completare il lavoro e acquisire le misure delle distanze di interpiano e di spessore delle solette dei livelli in questione è stato eseguito un secondo rilievo, con longimetro, dal *team* del *DISEG* del prof. Donato Sabia del Politecnico di Torino, il 30 maggio 2017. I piani ammezzati dell'edificio non sono stati rilevati a causa della loro inaccessibilità.

Lo strumento che utilizza la tecnica *SLAM* impiegato nell'acquisizione della nuvola di punti degli ambienti interni è lo *ZEB-REVO* della *GeoSLAM*, *partner* ufficiale dell'azienda *CSIRO* che ne ha sviluppato il sistema di acquisizione chiamato *Zebedee*.



Figura 56: ZEB-REVO. Fonte: <https://geoslam.com/>.

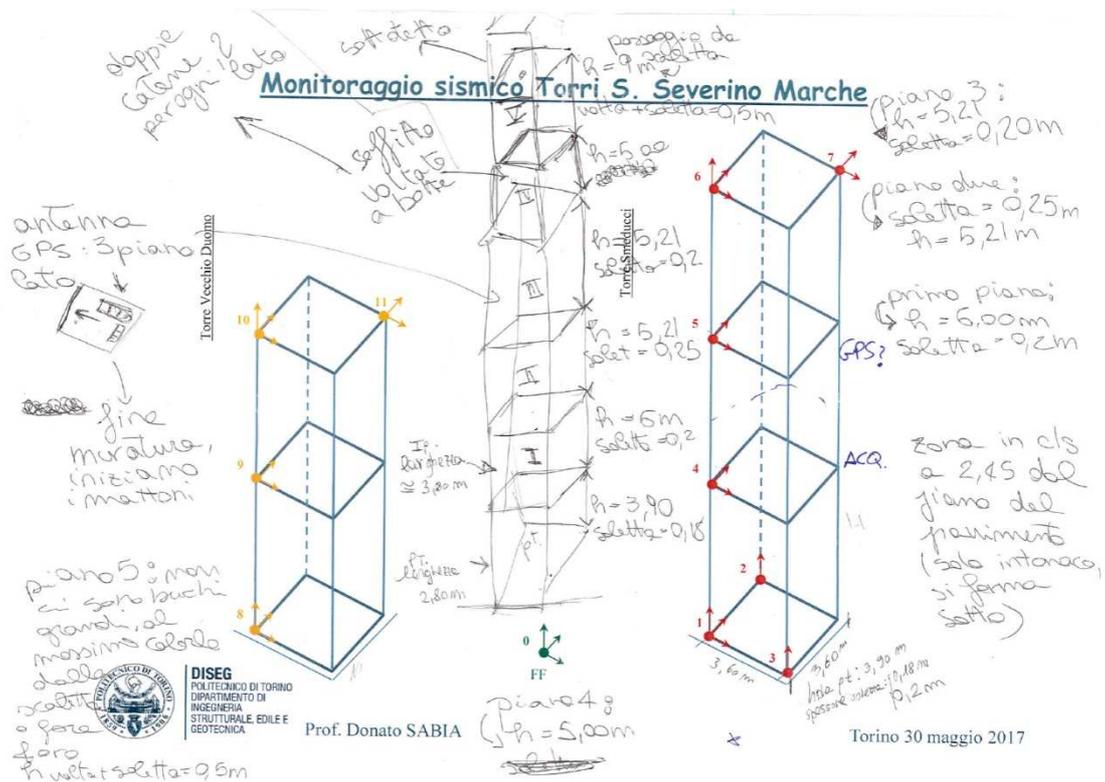


Figura 57: eidotipo del rilievo interno compiuto con rotella metrica. Misure a cura del DISEG.

Esso possiede una portata massima che va dai 15 m ai 30 m a seconda della riflettività superficiale e dalle condizioni ambientali, oltre ad un'unità di misura inerziale montata su un semplice meccanismo a molla.

Il dispositivo è di tipologia *hand-held*, quindi tramite l'operatore addetto al rilievo passa attraverso l'ambiente. Lo *scanner*, in movimento, oscilla attorno alla molla e produce un movimento di rotazione che converte il piano di scansione 2D intrinseco del *laser* in un campo di visualizzazione locale 3D.

Attraverso l'utilizzo del *software* proprietario, la traiettoria del sensore a sei gradi di libertà può essere calcolata in modo preciso e continuo dalle misurazioni *laser* e da quelle della piattaforma inerziale integrata. Successivamente le misurazioni possono essere proiettate in un sistema di coordinate comune per generare una nuvola di punti 3D.¹³⁹

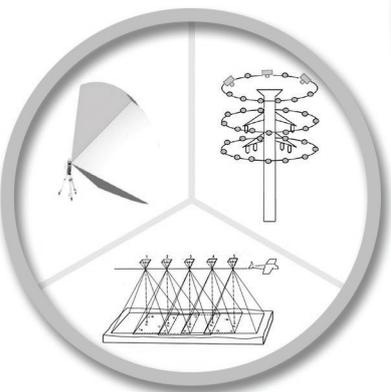
La registrazione della nuvola di punti è avvenuta in maniera automatica tramite l'utilizzo dell'applicazione *GeoSLAM Desktop*.

¹³⁹ Fonte: <https://confluence.csiro.au/display/ASL/Zebedee>.

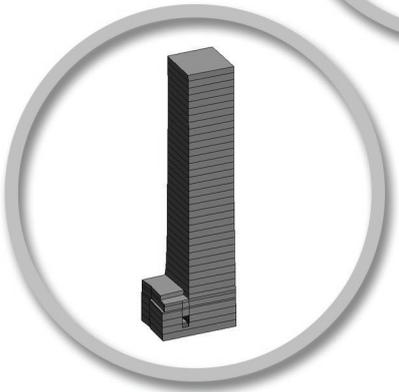
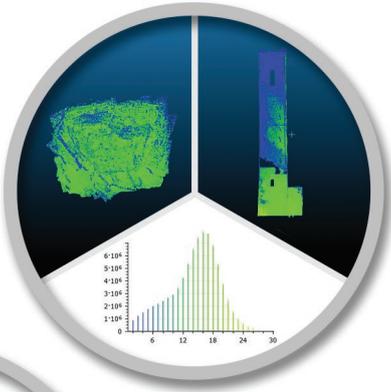
ZEB - REVO

<i>Velocità di acquisizione dei dati</i>	43200 pti/s
<i>Accuratezza delle misurazioni 3D</i>	±0,1%
<i>Range massimo</i>	Fino a 30 m (fino a 15 m <i>indoor</i>)
<i>Peso</i>	1,0 kg
<i>Dimensioni</i>	(86x113x287) mm
<i>Classe laser</i>	1
<i>Ulteriori caratteristiche</i>	Montabile su velivolo UAV o veicolo terrestre, acquisizione automatica.

Tabella 11: caratteristiche dello strumento ZEB-REVO. Fonte: <https://geoslam.com/hardware/zeb-revo/>.



CAPITOLO 4 ELABORAZIONE DEI DATI



La parte centrale della tesi prevede l'elaborazione dei dati raccolti sul campo attraverso più metodologie di rilievo (quelle già esposte nei capitoli precedenti) e differenti *software* computazionali sia commerciali sia *open source*, reperibili nella rete informatica. La suddivisione tra le tecniche e i *software* utilizzati è rappresentata nel diagramma seguente.

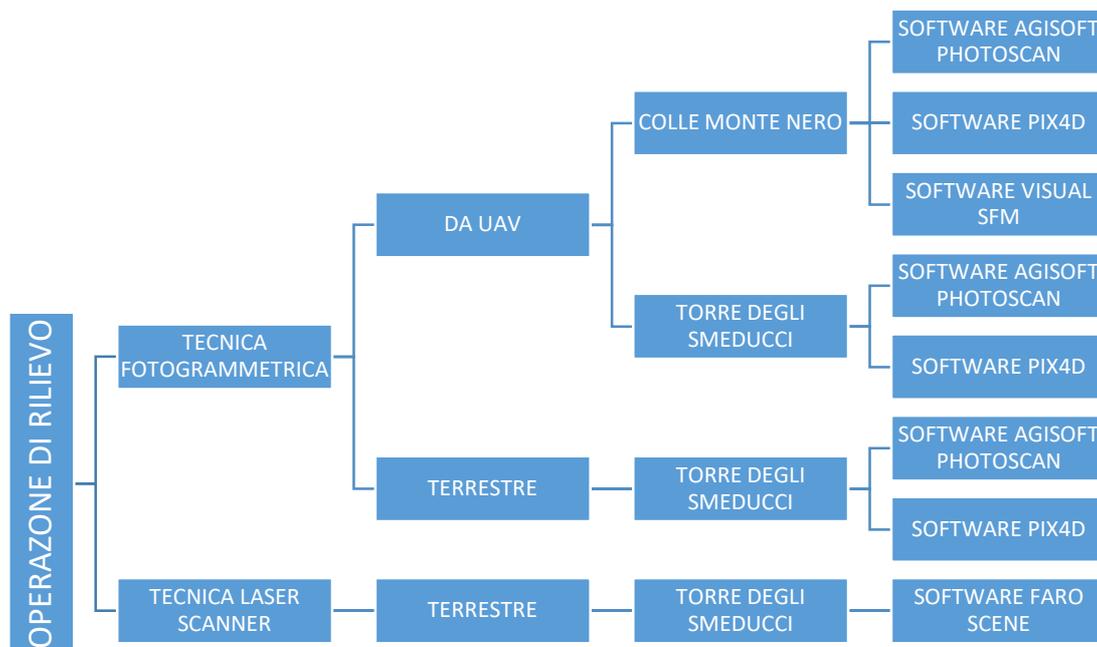


Figura 58: diagramma delle tecniche di rilievo e dei software utilizzati per acquisire ed elaborare i dati.

La scelta di questi specifici *software* si è verificata in seguito ad un percorso formativo intrapreso durante il tirocinio curricolare che ne ha permesso l'apprendimento dei comandi base e lo sviluppo di una capacità critica nei confronti dei risultati restituiti.

4.1. Scala urbana: elaborazioni fotogrammetriche dei dati acquisiti da UAV del colle Monte Nero

I dati dell'area del colle Monte Nero, acquisiti tramite tecnica fotogrammetrica aerea con i droni *eBee* della *senseFly* e *Phantom4* della *Dji*, sono stati elaborati con tre diversi *software*, uno *open source* (*Visual SFM*) e due commerciali (*Agisoft Photoscan* e *Pix4D*). La scelta di avvalersi di un *software open source* è stata effettuata per poter analizzare le potenzialità di questi rispetto a quelli commerciali e verificare se e quando il loro utilizzo sia adeguato per scopi lavorativi o accademici.

4.1.1. Elaborazione dati con *Agisoft Photoscan*

Photoscan (versione 1.2.4) è un programma *stand alone* (indipendente) della *software-house Agisoft*, che esegue l'elaborazione fotogrammetrica di immagini digitali e genera dati spaziali 3D, coprendo tutte le fasi della *structure from motion* fino alla creazione di modelli digitali con *mesh texturizzate*, *DEM* e Ortofoto.

L'elaborazione dei dati in una prima fase è stata caratterizzata dalla creazione di due lavori separati: uno relativo ai fotogrammi acquisiti dal volo effettuato dal drone ad ala fissa *eBee* e uno relativo ai fotogrammi acquisiti dal volo effettuato dal drone quadricottero *Phantom4*: pertanto i passaggi che verranno elencati di seguito saranno da intendersi per entrambi i lavori in questione.

Il programma gestisce lavori differenti in cartelle interne al progetto ciascuna di esse chiamata *chunk*, all'interno delle quali sono state caricate le immagini delle due prese fotogrammetriche.

Dopo aver effettuato il caricamento dei fotogrammi, ne è stato portato avanti l'allineamento, frutto dei processi di *image matching* e *feature extraction*. Conseguentemente a questa operazione il programma crea una nuvola di punti sparsa (*sparse cloud*). Per eseguire ciò è stato necessario impostare differenti parametri come¹⁴⁰:

- *accuracy* ovvero accuratezza o precisione: varia al variare del numero di punti usati per eseguire il *match* tra i fotogrammi, più il valore è alto maggiore risulta essere la precisione dell'allineamento e maggiore sarà il tempo necessario per terminare il processo. Nel caso in questione per il volo effettuato con il drone *Phantom4* è stato utilizzato il valore *high*, che corrisponde ad un utilizzo dell'immagine a piena risoluzione, cioè un punto estratto ogni *pixel*, per quello effettuato con il drone *eBee* è stato utilizzato il valore *medium*, che corrisponde ad un utilizzo dell'immagine al 50% della risoluzione, cioè un punto estratto ogni quattro *pixel*.
- *Pair selection* in italiano selezione di coppie: consiste in un'azione di preselezione di un sottoinsieme di coppie di immagini le quali vengono confrontate tra loro. A seconda della tipologia di fotogrammi utilizzati, serve impostare ulteriori parametri che determinano quali coppie di immagini scegliere. Generalmente la *pair selection* serve a snellire la procedura di *matching* delle *feature*, tralasciando qualche corrispondenza. Nel caso in questione l'opzione è stata disabilitata.
- *Key point limit* e *tie point limit*: il primo dato indica il numero limite di punti che il programma può estrarre da ogni immagine (varia a seconda delle dimensioni dell'immagine stessa). Il secondo dato indica il numero limite di punti che

¹⁴⁰ <http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=3559.0>. Ultima consultazione 23/09/2017.

l'operatore vuole che vengano estratti da ciascuna immagine analizzata. Per esempio: se il *key point limit* è impostato su 40000 e il *tie point limit* è impostato su 1000, Photoscan estrae 40000 punti per ogni foto e di questi ne tiene i migliori 1000. Questi ultimi vengono poi utilizzati per i calcoli di allineamento. Nel caso in questione per entrambi i parametri è stato impostato il valore "0". L'utilizzo dello zero consente di trovare il maggior numero possibile di punti chiave, ma può portare a un numero elevato di punti meno affidabili.

Dopo l'allineamento, in ciascun *chunk* sono state importate, tramite un file di testo, le coordinate spaziali dei *marker* rilevati. La gestione dei *marker* e delle loro coordinate è importante per la corretta georeferenziazione del modello finale, risultato del processo della *structure from motion*.

Una volta caricate tutte le informazioni spaziali dei *marker* bisogna dunque rapportarle al corretto sistema di riferimento. Il progetto di rilievo trovandosi a San Severino Marche è stato impostato col sistema *WGS 84/UTM zone 33N*.

Dopo aver settato il sistema di riferimento, ha avuto luogo la collimazione manuale dei *marker* rilevati in ciascun fotogramma, ove presenti. La collimazione può essere effettuata anche in maniera automatica, in tal caso è opportuna un'attenta analisi di ciascun punto o un affinamento manuale. Il *software*, in ogni modo, anche nel caso di collimazione manuale, dopo aver espletato la suddetta pratica per un *marker* in almeno tre fotogrammi, restituisce un posizionamento di quest'ultimo pressoché veritiero per consentire all'operatore un'ottimizzazione migliore dei tempi. Più il numero di *marker* collimati sale e maggiore è l'affinamento della tecnica di collocamento di quelli ancora da collimare.

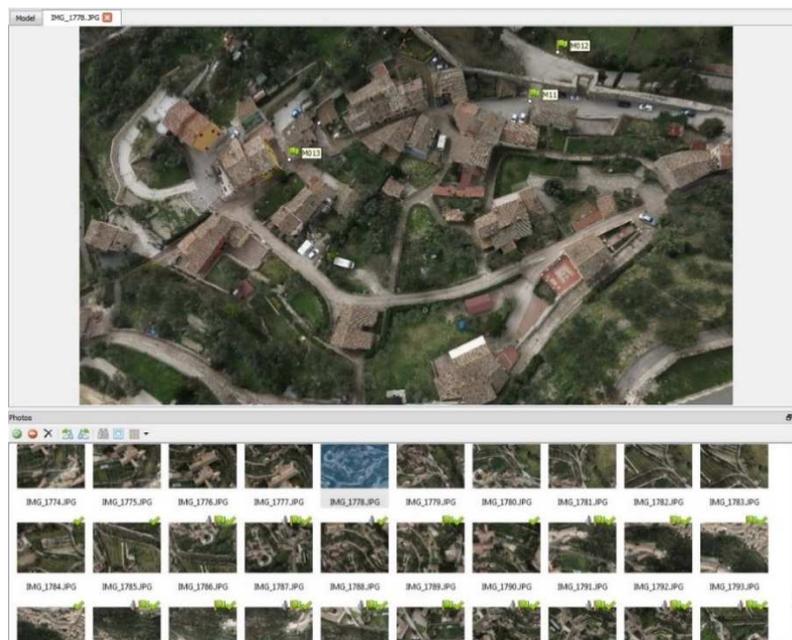


Figura 59: schermata di collimazione dei marker a terra.

Durante l'operazione di collimazione possono essere tenuti sotto controllo una serie di aspetti relativi ai *marker*:

- il numero di proiezioni, ovvero quante volte un punto è stato collimato;
- le coordinate inserite dei punti;
- le coordinate dei punti stimate dal programma;
- i residui nelle tre direzioni del sistema di riferimento e quelli totali di ciascun punto;
- i residui globali nelle tre direzioni del sistema di riferimento e quello totale globale;
- l'errore in *pixel* per ciascun punto e quello globale.

In base a questi dati alcuni *marker* sono stati tenuti in considerazione come *check point*, in numero tale da rientrare nella percentuale media voluta dalla teoria (circa 1/5 dei *GCP*).

Finita questa analisi sono stati compiuti sia il riallineamento delle camere sia la relativa ottimizzazione dei parametri di orientamento, che permette di ricalcolare questi ultimi secondo le informazioni della collimazione dei *marker* effettuata.

I parametri su cui è stata eseguita l'ottimizzazione sono:

- f : lunghezza focale in *pixel*;
- c_x, c_y : coordinate del punto principale;
- b_1, b_2 : coefficienti della trasformazione affine;
- k_1, k_2, k_3 : coefficienti della distorsione radiale;
- p_1, p_2, p_3 : coefficienti della distorsione tangenziale.

Il risultato di tutto ciò è quindi una nuvola sparsa georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto.

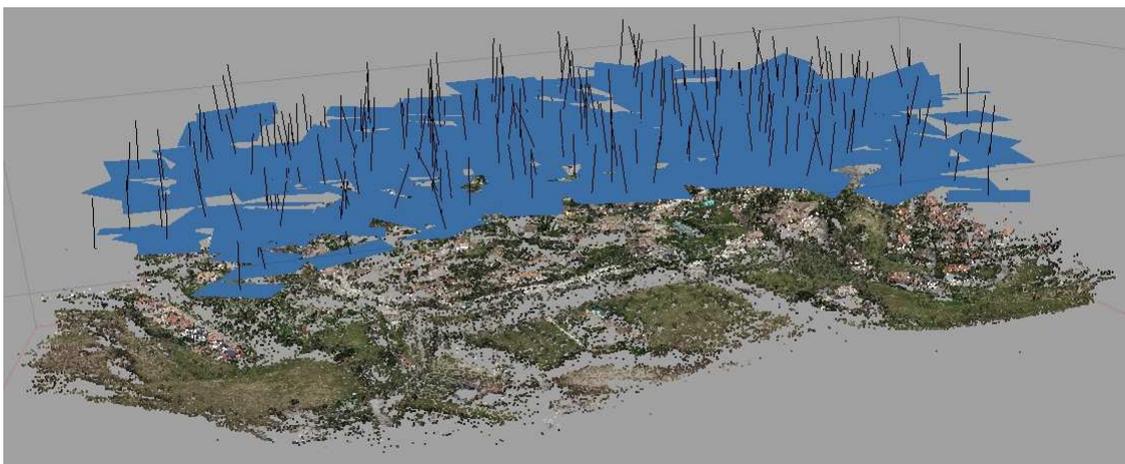


Figura 60: nuvola sparsa del volo aereo con drone eBee con identificazione spaziale delle singole prese fotogrammetriche.

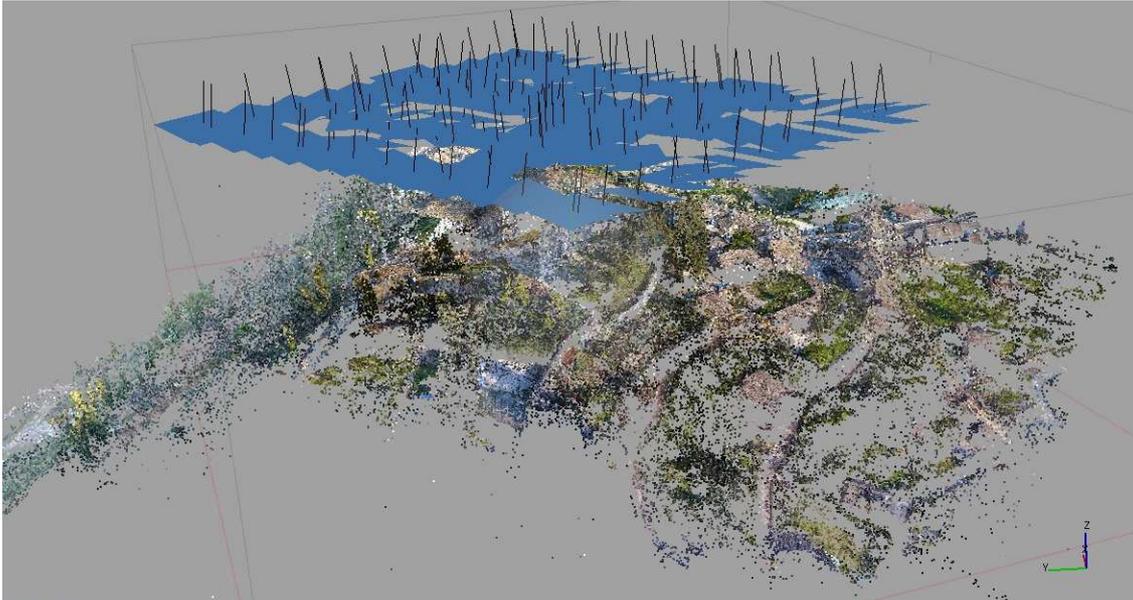


Figura 61: nuvola sparsa del volo aereo con drone Phantom4 con identificazione spaziale delle singole prese fotogrammetriche.

I risultati delle procedure compiute fino ad ora, di entrambi i *chunk*, sono riassunti nella seguente tabella:

DATO	CHUNK 1 - VOLO DJI PHANTOM4	CHUNK 2 - VOLO SENSEFLY EBEE
<i>Hardware CPU</i>	Intel Core i7 - 6850K - 3,60GHz	Intel Core i7 - 6850K - 3,60GHz
<i>Hardware GPU</i>	NVIDIA Quadro M2000	NVIDIA Quadro M2000
<i>Sistema operativo</i>	Windows 7 Professional, 64 - bit	Windows 7 Professional, 64 - bit
<i>Numero di immagini caricate</i>	121	227
<i>Numero di immagini allineate</i>	121	227
<i>Altitudine media di volo</i>	61 m	147 m
<i>GSD</i>	0,0260 m/pix	0,0478 m/pix
<i>Area coperta dal volo</i>	0,151 km ²	0,439 km ²
<i>Modello della camera</i>	FC330	Canon PowerShot S110
<i>Dimensione del pixel</i>	1,56x1,56 µm	1,86x1,86 µm
<i>Risoluzione</i>	4000x3000	4000x3000
<i>Lunghezza focale</i>	3,2 mm	5,2 mm
<i>Matching time</i>	59' 02''	06' 29''
<i>Alignment time</i>	24' 16''	05' 03''
<i>Optimization time</i>	01' 41''	00' 34''

<i>Collimation time</i>	1h ca.	3h ca.
<i>Punti (sparse cloud)</i>	608'553	238'388
<i>Numero control point</i>	4	13
<i>Numero check point</i>	0	3
<i>E_{XYZ} medio [m]</i>	0,0463	0,0183
<i>σ_{XYZ} [m]</i>	0,0352	0,0089
<i>RMSE_{XY} [m]</i>	0,0428	0,0195
<i>RMSE_Z [m]</i>	0,0394	0,0059
<i>RMSE_{XYZ} [m]</i>	0,0582	0,0203
<i>Precisione_{XY} [m]</i>	0,0390	0,0717
<i>Precisione_Z [m]</i>	0,0520	0,0956
<i>Precisione scala 1:500 [m]</i>	0,1000	0,1000

Tabella 12: informazioni relative ai fotogrammi e alle elaborazioni compiute dal software Agisoft Photoscan per il chunk 1 e chunk 2 fino alla generazione delle sparse cloud georeferenziate.

Dove gli “Errori_{XYZ}” di ciascun *marker*, o quelli totali, sono da intendersi come la distanza tra la posizione stimata e la loro posizione iniziale. Ovvero:

$$E_{Ti} = \sqrt{e_{xi}^2 + e_{yi}^2 + e_{zi}^2} \quad [4.1]$$

dove:

- “E_{Ti}” è l’errore totale i-esimo, ovvero la distanza tra la posizione stimata e la posizione iniziale dell’i-esimo *marker*;
- “e_{xi}”, “e_{yi}”, “e_{zi}” sono gli errori, ovvero le distanze lungo le tre componenti, tra la posizione stimata e quella iniziale dell’i-esimo *marker*;
- ciascun errore è stato preso in valore assoluto.

“σ” è lo scarto quadratico medio o deviazione standard:

$$\sigma = \sqrt{\sum (e_i - e_m)^2 / n} \quad [4.2]$$

dove:

- “e_i” sono i singoli errori;
- “e_m” è la media aritmetica degli errori;
- “n” è il numero dei *marker*.

Il *Root Mean Square Error (RMSE)*, espresso in metri, si ottiene dalla formula:

$$RMSE = \sqrt{\sum (E_{Ti}^2 / n)} \quad [4.3]$$

dove:

- “RMSE” è l’errore quadratico medio;
- “n” è il numero dei *marker*.

Le precisioni plano - altimetriche sono state calcolate con le formule [2.25] e [2.26] del paragrafo 2.1.9. La precisione della fotogrammetria) seguendo le considerazioni dell'*EuroSDR*. Risultano perciò essere:

- per il volo effettuato dal *Phantom4*:

$$Precisione_{XY} = 1,5 \cdot GSD \cdot \sigma_{pix} = 1,5 \cdot 0,0260 \cdot 1 = 0,0390 \text{ m} \quad [4.4]$$

$$Precisione_Z = 2 \cdot GSD \cdot \sigma_{pix} = 2 \cdot 0,0260 \cdot 1 = 0,0520 \text{ m} \quad [4.5]$$

- per il volo effettuato dall'*eBee*:

$$Precisione_{XY} = 1,5 \cdot GSD \cdot \sigma_{pix} = 1,5 \cdot 0,0478 \cdot 1 = 0,0717 \text{ m} \quad [4.6]$$

$$Precisione_Z = 2 \cdot GSD \cdot \sigma_{pix} = 2 \cdot 0,0478 \cdot 1 = 0,0956 \text{ m} \quad [4.7]$$

L'unico *RMSE* non verificato con la precisione fotogrammetrica è quello planimetrico relativo al volo compiuto dal drone *Phantom4*. Nonostante ciò questo rientra appieno nella precisione grafica dettata dalla scala di restituzione 1:500.

Successivamente si è proseguito alla creazione di una nuvola densa (*dense point cloud*) attraverso il comando "*build dense point cloud*" solo per il *chunk* del volo effettuato dal drone *eBee*. Anche in questo caso il programma permette di stabilire la precisione (*accuracy*) con la quale il calcolatore effettua l'operazione di densificazione della nuvola con una scala di giudizio che va da un massimo di "*ultra high*" ad un minimo di "*lowest*". Per *ultra high* si intende l'elaborazione di immagini piene ovvero l'estrazione di un punto ogni *pixel*, mentre ciascun livello successivo subisce una riduzione di estrazione pari ad un quarto di quello precedente (*high* un punto ogni 4, *medium* un punto ogni 16 e così via). Nel caso in questione è stata scelta una precisione di livello *high*.

Oltre a ciò si può scegliere l'algoritmo di filtraggio (*depth filtering*) da utilizzare per ridurre al minimo gli errori dovuti dagli *outliers* (valori anomali) presenti in immagini particolarmente rumorose o con specifiche distorsioni. Tre sono le scelte per questa opzione di filtraggio: "*mild*", "*moderate*" e "*aggressive*". Nel caso in questione è stata scelta l'opzione "*moderate*" in quanto risulta essere una via di mezzo tra le altre due. L'opzione di filtraggio può essere anche disabilitata, ciò comporterebbe però la restituzione di una nuvola densa di punti maggiormente rumorosa.¹⁴¹

Il prodotto dell'elaborazione è stata una nuvola densa di 83'032'629 punti processata in 34' 37".

A questo punto si è creato un nuovo *chunk* utilizzato per unificare i due di partenza in uno singolo. Per effettuare ciò è stato adoperato prima il comando "*align chunks*" e successivamente il comando "*merge chunks*".

La prima operazione è stata effettuata sulle nuvole sparse in base alle coordinate dei marker presenti in ciascuna di esse; ciò ha comportato qualche difficoltà in quanto l'area rilevata dal volo del drone *Phantom4* presentava 4 *marker* di cui solo 3 risultavano

¹⁴¹ Agisoft LLC, *Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 1.2*, 2016.

essere *GCP* nel volo del drone *eBee*; nonostante questo l'allineamento è stato eseguito con successo.

La seconda operazione ha visto compiere al programma l'unione e la generazione di un'unica nuvola sparsa di punti a partire da quelle iniziali.



Figura 62: nuvola sparsa del colle Monte Nero del chunk unione.

Anche per il *chunk 3* è stato necessario effettuare un'ottimizzazione dell'allineamento delle camere il quale ha restituito le seguenti informazioni generali:

DATO	CHUNK 3 - UNIONE VOLI DJI PHANTOM4 & SENSEFLY EBEE
<i>Hardware CPU</i>	Intel Core i7 - 6850K - 3,60GHz
<i>Hardware GPU</i>	NVIDIA Quadro M2000
<i>Sistema operativo</i>	Windows 7 Professional, 64 - bit
<i>Numero di immagini caricate</i>	348
<i>Numero di immagini allineate</i>	348
<i>Altitudine media di volo</i>	117 m
<i>GSD</i>	0,0403 m/pix
<i>Area coperta dal volo</i>	0,439 km ²
<i>Optimization time</i>	01' 41''
<i>Punti (sparse cloud)</i>	846'941
<i>Numero control point</i>	14
<i>Numero check point</i>	3
<i>E_{XYZ} medio [m]</i>	0,0187

$\sigma_{XYZ} [m]$	0,0093
$RMSE_{XY} [m]$	0,0199
$RMSE_Z [m]$	0,0064
$RMSE_{XYZ} [m]$	0,0209
$Precisione_{XY} [m]$	0,0605
$Precisione_Z [m]$	0,0806
$Precisione\ scala\ 1:500 [m]$	0,1000

Tabella 13: informazioni relative ai fotogrammi e alle elaborazioni compiute dal software Agisoft Photoscan per il chunk 3 fino alla generazione della sparse cloud georeferenziata.

Quindi anche in questo caso gli errori piano - altimetrici sono inferiori ai valori limite suggeriti dall'*EuroSDR*:

$$Precisione_{XY} = 1,5 \cdot GSD \cdot \sigma_{pix} = 1,5 \cdot 0,0403 \cdot 1 = 0,0605\ m \quad [4.8]$$

$$Precisione_Z = 2 \cdot GSD \cdot \sigma_{pix} = 2 \cdot 0,0403 \cdot 1 = 0,0806\ m \quad [4.9]$$

Obiettivo del *chunk 3* è stato quello di unire le due tipologie di voli differenti a propria disposizione per generare un modello *DSM*, impropriamente chiamato *DEM* dal programma e un'Ortofoto dell'intera zona del colle Monte Nero, per poter analizzare successivamente le diverse caratteristiche tra il singolo volo effettuato con l'eBee e quello generato dall'unione dei due voli. Le analisi di qualità verranno esposte nel capitolo 5.

Per ottenere il modello *DSM* e l'Ortofoto aerea sono stati svolti i seguenti punti:

- generazione della nuvola densa di punti (109'838'982 punti) con qualità "*high*" e algoritmo di filtraggio (*depth filtering*) "*moderate*" le cui specifiche sono state illustrate precedentemente;

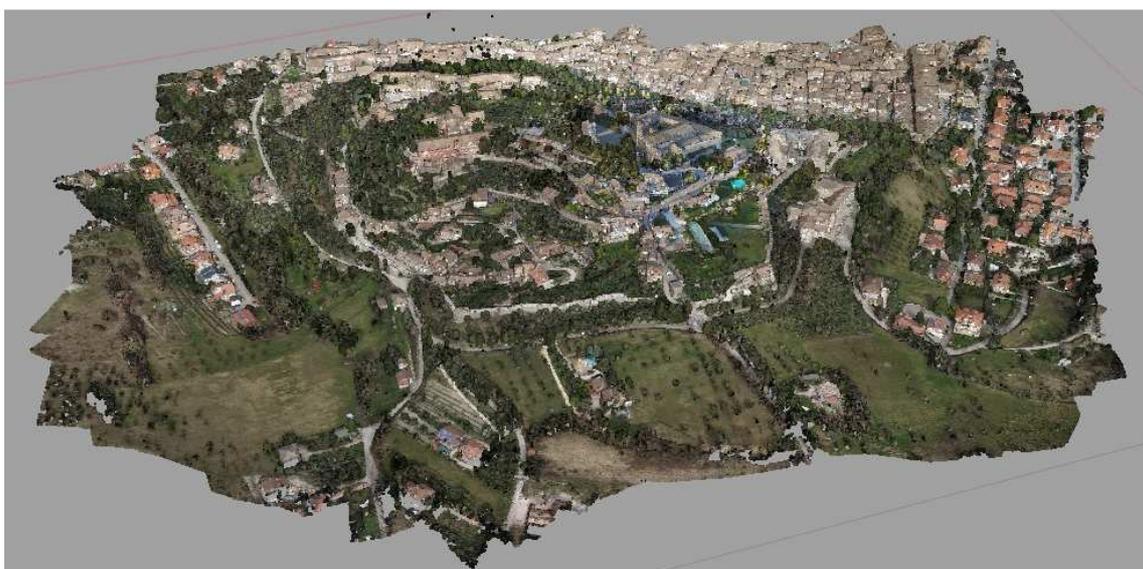


Figura 63: nuvola densa di punti del colle Monte Nero del chunk unione.

- generazione della *mesh* (18'104'963 facce e 9'676'936 vertici) con:
 - *surface type* (tipologia di superficie) "*high field*" caratteristica per voli aerei su scala territoriale;
 - *data source* (dato di partenza) la nuvola densa di punti;
 - *face count* (conteggio delle facce) di tipo "*high*" in questo caso il più alto livello di qualità;
 - *interpolation* (interpolazione) "*disabled*" per poter ricostruire come superfici solo le parti di terreno facenti parte della nuvola densa di punti e tralasciare quelle interposte nelle zone prive di informazioni numeriche.

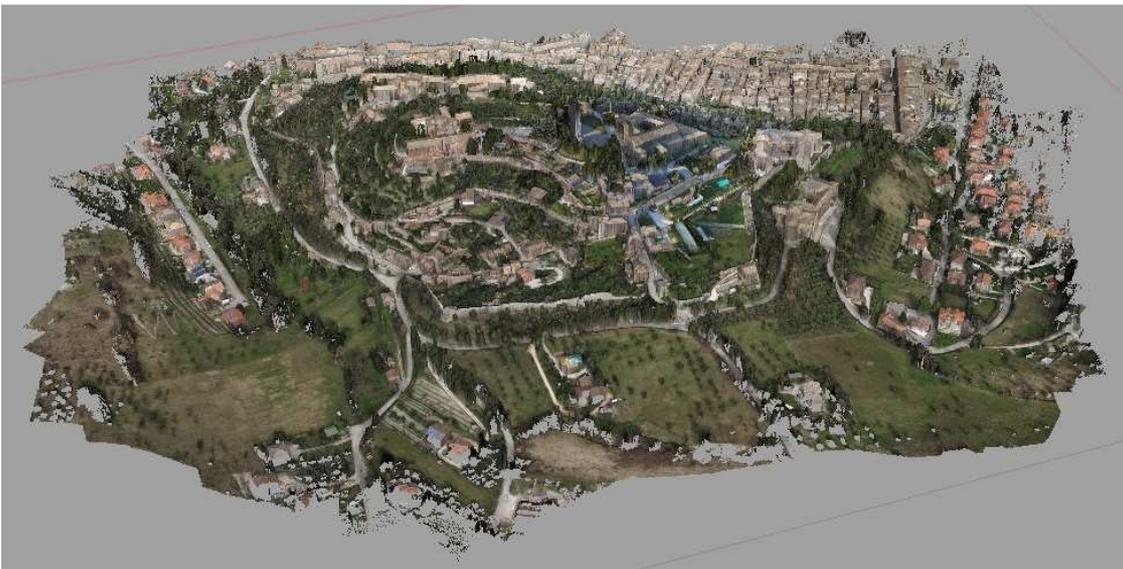


Figura 64: mesh del colle Monte Nero del chunk unione.

- generazione della *mesh* con *texture* con:
 - *mapping mode* (modalità di mappatura) "*orthophoto*" consigliata dallo sviluppatore per generare ortofoto aeree;
 - *blending mode* (seleziona il modo in cui i valori dei *pixel* di fotogrammi differenti vengono combinati nella *texture* finale) "*mosaic*";
 - disabilitazione della "*color correction*".



Figura 65: mesh con texture del colle Monte Nero del chunk unione.

La generazione del *DSM* prevede l'utilizzo di un modello di riferimento dal quale partire (*sparse cloud*, *dense cloud* e *mesh*); nel caso in questione si è optato per la *mesh* che risulta essere tra le tre il dato più completo.

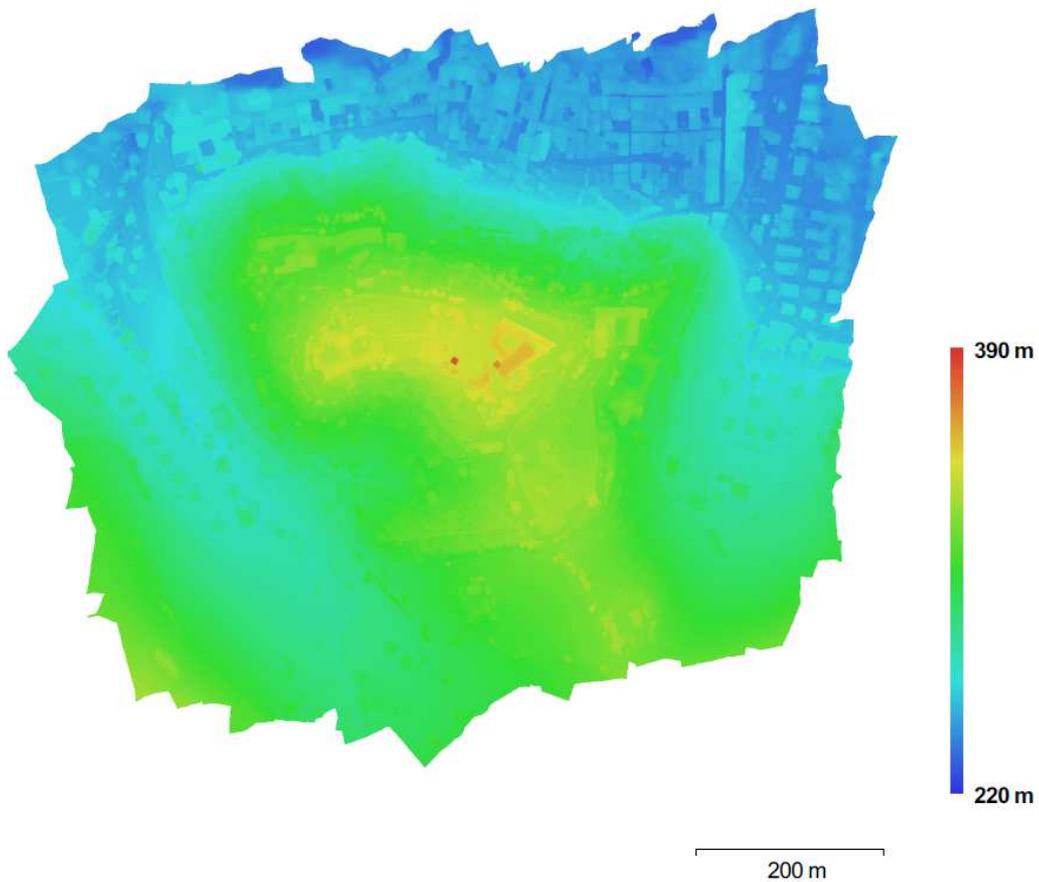


Figura 66: DSM del colle Monte Nero.

Altre opzioni impostate sono:

- *interpolation* (interpolazione): *enabled*;
- *coordinate system* (sistema di riferimento): *WGS 84/UTM zone 33N*;
- *resolution*: 0,04 m/*pixel* in base alla precisione della scala desiderata 1:500.

La generazione dell'Ortofoto (o *orthomosaic* secondo il linguaggio del programma) prevede invece le seguenti specifiche di *input*:

- *projection type* (tipo di proiezione): *geographic*;
- *coordinate system* (sistema di riferimento): *WGS 84/UTM zone 33N*;
- *surface*: *mesh*;
- *pixel size*: 0,04 m;
- *blending mode*: *mosaic*;
- disabilitazione della "*color correction*".



Figura 67: Ortofoto del colle Monte Nero con indicazione della collocazione dei marker.

Per poter disporre materialmente del *DSM* e dell'Ortofoto al di fuori del programma bisogna esportarli tramite gli appositi comandi "export ortomosaic" ed "export DEM" i quali attraverso una finestra interattiva permettono di far impostare all'operatore i confini di ritaglio (*boundaries*), la risoluzione del *pixel*, la tipologia di compressione, il sistema di coordinate di *output* e la scrittura del *World file* dell'elaborato.

Qui di seguito vengono esposti: un diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione eseguite sui tre lavori (*chunk*) realizzati e una tabella che analizza le tempistiche totali di elaborazione per ciascun prodotto passo dopo passo.

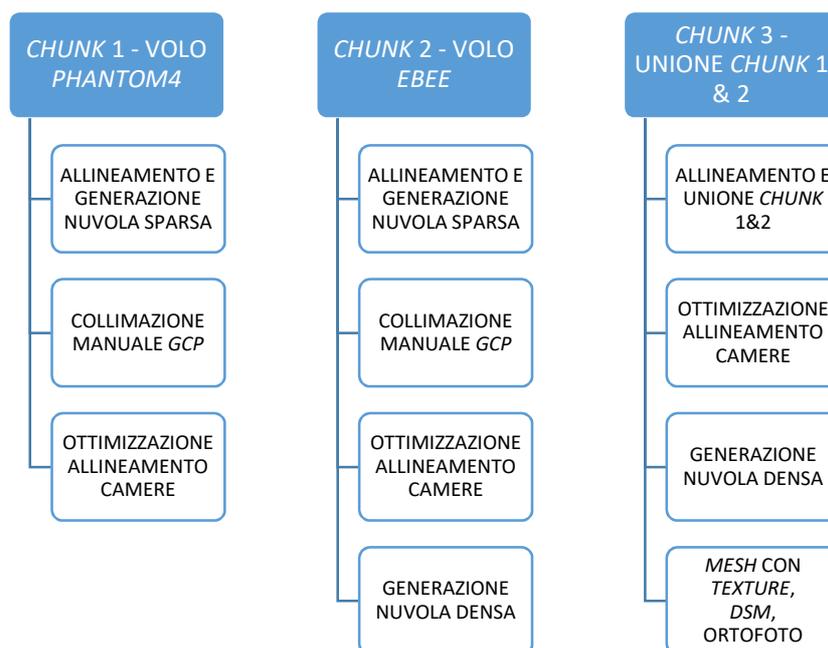


Figura 68: Diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione dei tre chunk utilizzati per generare le nuvole dense di punti, la mesh texturizzata, il DSM e l'ortofoto dell'area del colle Monte Nero col software Agisoft Photoscan.

Elaborazione	CHUNK 1	Tot. prog.	CHUNK 2	Tot. prog.	CHUNK 3	Tot. prog.
Allineamento	1h 23' 18"	1h 23' 18"	0h 11' 32"	0h 11' 32"	-	5h 34' 50"
Collimazione	1h 00' 00"	2h 23' 18"	3h 00' 00"	3h 11' 32"		
Ottimizzazione camere	0h 01' 41"	2h 24' 59"	0h 00' 34"	3h 12' 06"	0h 01' 41"	5h 36' 31"
Nuvola densa	-	-	0h 34' 37"	3h 46' 43"	1h 23' 00"	6h 59' 31"
Mesh	-	-	-	-	0h 05' 24"	7h 04' 55"
Mesh con texture	-	-	-	-	0h 11' 20"	7h 16' 15"
DSM	-	-	-	-	0h 05' 00"	7h 21' 15"
Ortofoto	-	-	-	-	0h 05' 00"	7h 26' 15"
Totale approssimato	-	2h 25'	-	3h 50'	-	7h 30'

Tabella 14: tempistiche di elaborazione dei tre chunk.

Le tabelle di tutti gli errori di ciascun *chunk* vengono inserite come allegati alla fine della presente tesi.

4.1.2. Elaborazione dati con *Pix4D Mapper*

Pix4D Mapper (versione 1.2.4) è un programma stand-alone della *software - house* svizzera *PIX4D SA*, che esegue l'elaborazione fotogrammetrica di immagini digitali e genera dati spaziali 3D, coprendo tutte le fasi della *structure from motion* fino alla creazione di modelli digitali con *mesh texturizzate*, *DEM* e Ortofoto.

Come per quanto già eseguito con il *software Photoscan* l'elaborazione dei dati ha previsto la creazione di due lavori separati: quello relativo ai fotogrammi acquisiti dal volo effettuato dal drone ad ala fissa *eBee* e quello relativo ai fotogrammi acquisiti dal volo effettuato dal drone quadricottero *Phantom4*.

Differentemente da quanto visto per il precedente programma, *Pix4D* gestisce lavori eterogenei in *file* di progetto separati l'uno dall'altro, dando successivamente la possibilità di creare un ulteriore progetto di lavoro nel caso di unione di quelli precedentemente elaborati. I passaggi elencati di seguito si riferiscono a entrambi i *file* di lavoro creati.

Attraverso una procedura guidata:

- è stata scelta la tipologia di progetto da utilizzare secondo la modalità “*3D Maps*”, adatta alla generazione di *DSM* e Ortofoto;
- sono state caricate le immagini dei due voli da *UAV* effettuati in località Castello;
- è stata presa visione dei dati propri di ciascun fotogramma, come le coordinate (se presenti), la tipologia della camera, la distanza focale, la definizione del sistema di coordinate da utilizzare e il numero di immagini geolocalizzate. Il sistema preso in considerazione è sempre il *WGS 84/UTM zone 33N*. Nel caso del volo con il drone ad ala fissa *eBee* le coordinate dei fotogrammi state cancellate a seguito di problematiche di georeferenziazione in fase di elaborazione.
- è stato inserito l'output coordinate system che risulta essere identico a quello di input ovvero *WGS 84/UTM zone 33N*.

Conclusasi questa prima fase di caricamento dati, la rispettiva elaborazione è stata compiuta seguendo tre passaggi differenti a causa della diversa strutturazione del programma. Essi sono:

- “*initial processing*” adibito all'allineamento dei fotogrammi e alla generazione della nuvola sparsa di punti. Esso è suddiviso a sua volta in tre finestre differenti (*general*, *matching* e *calibration*) ciascuna delle quali permette all'utente di impostare la qualità, i formati di *output* e le caratteristiche della trasformazione dei dati a proprio piacere secondo le dovute esigenze.

- “*Point cloud and mesh*” adibito alla generazione della nuvola densa di punti e della *mesh* con *texture*. Suddiviso anch’esso in più sotto finestre (*point cloud*, *3D textured mesh*, *advanced* e *add-ons*) a seconda delle diverse necessità di elaborazione.
- “*DSM, orthomosaic and index*” adibito alla generazione di *DSM*, Ortofoto e indici e suddiviso nelle seguenti sotto - finestre: *DSM and orthomosaic*, *additional outputs* e *index calculator*.

Dovendo però effettuare la collimazione dei *GCP* tra il primo e il secondo passaggio, l’esecuzione contemporanea di tutti e tre non è stata possibile.

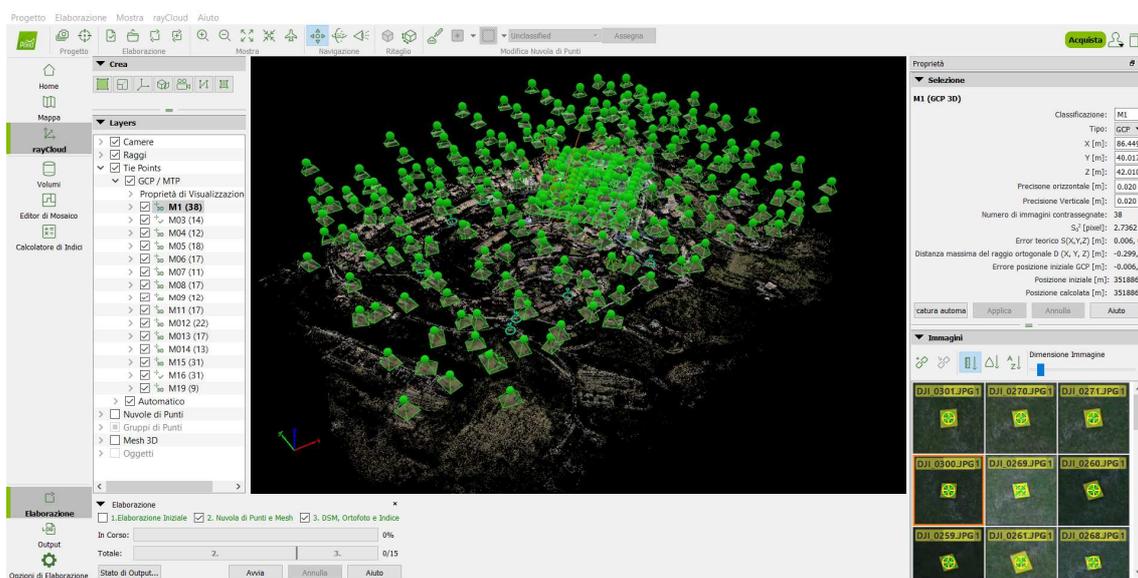


Figura 69: schermata principale di un progetto di lavoro.

In primis è stata dunque effettuata l’elaborazione di “*initial processing*” ovvero l’allineamento dei fotogrammi, previe *feature extraction* e *image matching*, con conseguente produzione della nuvola sparsa di punti (*sparse cloud*) tenendo conto dei seguenti parametri¹⁴²:

- “*keypoints image scale*” in “*general*”: “*full*” che consente di impostare il modo in cui vengono estratti i punti. L’opzione scelta permette di utilizzare le immagini con una risoluzione al 100% (*original image size*) e quindi di estrarre un punto ogni *pixel*.
- “*Matching image pairs*” in “*matching*”: “*free flight or terrestrial*” che consiste in un *mix* di impostazioni *standard* da utilizzare in caso di prese fotogrammetriche aeree o terrestri. In questo caso per effettuare il *match* tra le immagini viene utilizzata una procedura che il programma chiama “*Geometrically Verified*”

¹⁴² Pix4D SA, *Pix4D software manual*, 2015, pp 117 - 142.

Matching” (*GVM*) ovvero un processo di prova per selezionare le corrispondenze geometricamente coerenti tra le immagini, sfruttando il contenuto geometrico dei *match* più chiari tra le immagini.

- “*Targeted number of keypoints*” in “*calibration*”: “*automatic*” che consente all'utente di impostare automaticamente il numero massimo di punti da estrarre. Altrimenti si può impostare un numero specifico di punti da estrarre (tetto massimo come già visto in Photoscan).
- “*Calibration method*” in “*calibration*”: “*standard*” che consente all'utente di selezionare come vengono ricostruiti i parametri esterni e interni della fotocamera. L'opzione *standard* è quella inserita di *default* e gestisce tutti i passaggi in modalità automatica a seconda dei diversi dati inseriti come per esempio diverse tipologie di fotogrammi, o diverse metodologie di presa fotogrammetrica, ecc.
- “*Rematch*” in “*calibration*”: “*automatic*” che consente di aggiungere altri “*match*” dopo la prima parte dell'elaborazione iniziale. Di solito questo processo migliora la qualità della ricostruzione.

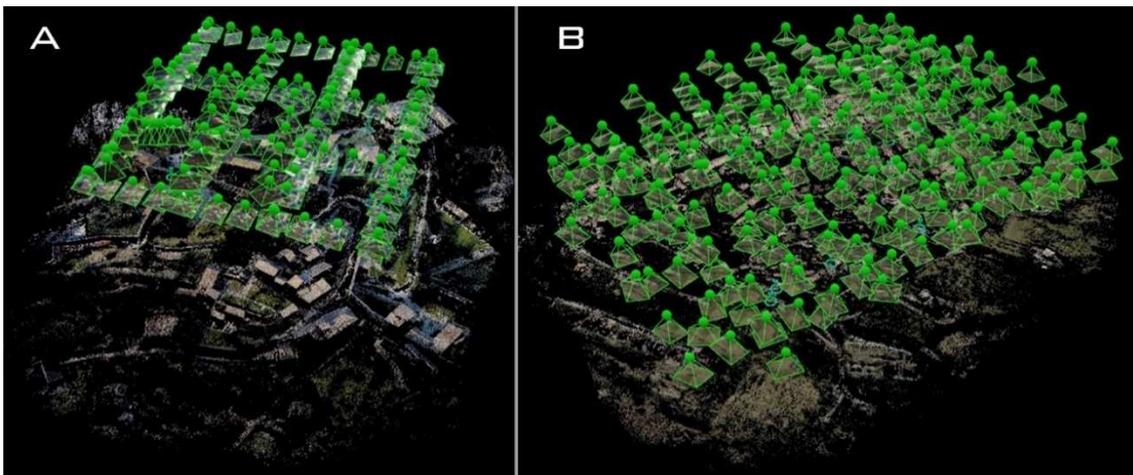


Figura 70: a) nuvola sparsa elaborata nel file di progetto 1, b) nuvola sparsa elaborata nel file di progetto 2. In entrambi le immagini sono ben visibili gli allineamenti dei fotogrammi.

Successivamente sono stati caricati i *marker* con coordinate note, rilevati durante l'acquisizione dati.

La relativa collimazione è stata effettuata in un primo momento attraverso l'utilizzo della finestra di gestione dei *GCP*, luogo in cui è possibile modificare i valori di ciascuna coordinata, l'accuratezza verticale e orizzontale e infine la tipologia dei punti (punti di appoggio 3D, punti di appoggio 2D, *check point*, ecc.) a seconda degli errori che insistono su di essi nelle tre direzioni.

In seguito sono stati collimati dai 4 ai 6 *marker* di coordinate note su almeno 6/8 fotogrammi per poi ripetere il primo *step* “*initial processing*” senza cambiare le impostazioni di elaborazione. Facendo ciò è stato possibile, da parte del programma, destinare su ciascun fotogramma il posizionamento virtuale di tutti i *marker*. In questo modo è stato possibile proseguire la collimazione dalla schermata principale del software, effettuandola *marker* dopo *marker* per l'intero *set* di immagini, diminuendo così i tempi di impiego.

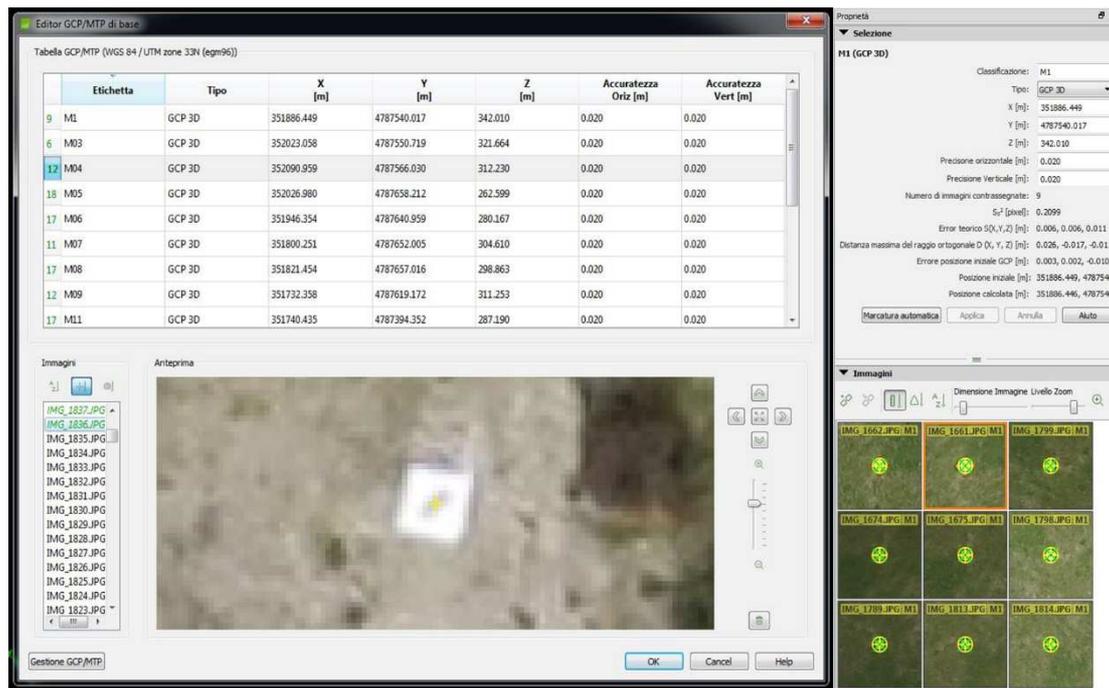


Figura 71: a sinistra la finestra di gestione dei GCP per la collimazione iniziale fotogramma per fotogramma, a destra la finestra di collimazione generale.

Dopo la ripetizione dell'*initial processing*, tramite la finestra di collimazione manuale, man mano che si andava collimando è stato possibile visualizzare in tempo reale gli errori del punto (*marker*) nelle tre direzioni rispetto al posizionamento iniziale sul fotogramma computato dal *software*. Altri valori che sono stati tenuti sotto controllo sono stati la varianza, le coordinate stimate e il numero di collimazioni effettuate.

Conclusasi questa attività, le camere dei modelli ottenuti dai due progetti distinti sono state riallineate e ottimizzate e dopo la produzione di report di qualità, i dati derivanti sono stati elaborati e inseriti in allegato come documentazione. Qui di seguito ne viene presentato un riassunto.

Come si può notare un fotogramma è stato disabilitato in quanto generava problematiche nel processo di allineamento.

DATO	PROGETTO 1 - VOLO DJI PHANTOM4	PROGETTO 2 - VOLO SENSEFLY EBEE
<i>Hardware CPU</i>	Intel Core i7 - 4770 3.40GHz	Intel Core i7 - 4770 3.40GHz
<i>Hardware GPU</i>	NVIDIA GeForce GTX 760	NVIDIA GeForce GTX 760
<i>Sistema operativo</i>	Windows 7 Professional, 64 - bit	Windows 7 Professional, 64 - bit
<i>Numero di immagini caricate</i>	121	227
<i>Numero di immagini allineate</i>	121	226
<i>GSD</i>	0,0230 m/pix	0,0491 m/pix
<i>Modello della camera</i>	FC330_3.6_4000x3000	CanonPowerShotS110_5.2- 26.0mm_5.2_4000x3000
<i>Dimensione del sensore</i>	6,317x4,738 mm	7,440x5,580 mm
<i>Risoluzione</i>	4000x3000	4000x3000
<i>Lunghezza focale</i>	3,2 mm	5,2 mm
<i>Initial processing (time)</i>	25' 00'	11' 20''
<i>Punti (sparse cloud)</i>	784'315	714'964
<i>Numero control point</i>	4	13
<i>Numero check point</i>	0	3
<i>E_{XYZ} medio [m]</i>	0,0198	0,0254
<i>σ_{XYZ} [m]</i>	0,0086	0,0109
<i>RMSE_{XY} [m]</i>	0,0205	0,0218
<i>RMSE_Z [m]</i>	0,0068	0,0196
<i>RMSE_{XYZ} [m]</i>	0,0216	0,0294
<i>Precisione_{XY} [m]</i>	0,0345	0,0731
<i>Precisione_Z [m]</i>	0,0460	0,0982
<i>Precisione scala 1:500 [m]</i>	0,1000	0,1000

Tabella 15: informazioni relative ai fotogrammi e alle elaborazioni compiute dal software Pix4D Mapper per il progetto 1 e progetto 2 fino alla generazione della sparse cloud georeferenziata.

Dunque gli RMSE piano - altimetrici sono inferiori ai valori limite suggeriti dall'EuroSDR. Successivamente si è proseguito alla creazione della una nuvola densa (*dense point cloud*), attraverso la sezione "*point cloud and mesh*" della finestra delle opzioni di

processo, solo per il file di progetto del volo effettuato dal drone *eBee*. I parametri presi in considerazione nella finestra di dialogo sono i seguenti¹⁴³:

- come *“image scale”*, che consente all'utente di definire i parametri per la densificazione della nuvola di punti, è stata scelta *“half image size”* ovvero quella che utilizza immagini a una risoluzione del 50%.
- Come *“point density”*, che consente all'utente di definire la qualità della nuvola, è stata scelta la qualità *“high”*, ovvero la più alta, che permette di calcolare un punto 3D per ogni *pixel*. E' un processo che dura 4 volte in più rispetto alla qualità di *default* chiamata *“optimal”* che ne estrae uno ogni 4 *pixel*. Abbinata al valore dell'*image scale* pari a 0,5 si è potuto estrarre un punto ogni 2 *pixel* (1/0,5).
- Come *“export”* è stato scelto il formato *“las”*, di facile utilizzo in numerosi *software* di analisi dei dati ed è stata consentita l'unione di tutte le *tiles* (mattonelle: ovvero i singoli sottogruppi in cui il programma suddivide il modello per compartimentare il procedimento lavorativo) in una singola.

Il prodotto dell'elaborazione è stata una nuvola densa di 66'611'775 punti processata in 1h 45' 41”.



Figura 72: nuvola densa del file di progetto 1 (volo *eBee*) con in evidenza il posizionamento spaziale dei marker.

Terminate le elaborazioni sui due progetti iniziali se ne è creato un terzo per unificarli. Per effettuare ciò, nella finestra di dialogo di creazione di nuovo progetto è stata scelta la tipologia *“project merged from existing projects”*, all'interno della quale sono stati successivamente caricati i progetti precedentemente elaborati. Il *software* ha effettuato automaticamente l'allineamento tra i due progetti basandosi sulle coordinate dei *marker* collimati in ciascuno di essi.

¹⁴³ ibidem.

Il prodotto finale è stato lo stesso di quello verificatosi con l'utilizzo di *Photoscan*. Anche per il terzo progetto è stato generato un *quality report* i cui dati sono stati elaborati e inseriti in allegato come documentazione. Qui di seguito ne viene presentato un riassunto.

DATO	PROGETTO 3 - UNIONE VOLI DJI PHANTOM4 & SENSEFLY EBEE
<i>Hardware CPU</i>	Intel Core i7 - 4770 3.40GHz
<i>Hardware GPU</i>	NVIDIA GeForce GTX 760
<i>Sistema operativo</i>	Windows 7 Professional, 64 - bit
<i>Numero di immagini caricate</i>	348
<i>Numero di immagini allineate</i>	347
<i>GSD</i>	0,0438 m/pix
<i>Punti (sparse cloud)</i>	1'497'656
<i>Numero control point</i>	13
<i>Numero check point</i>	2
<i>E_{XYZ} medio [m]</i>	0,0255
<i>σ_{XYZ} [m]</i>	0,0096
<i>RMSE_{XY} [m]</i>	0,0234
<i>RMSE_Z [m]</i>	0,0174
<i>RMSE_{XYZ} [m]</i>	0,0292
<i>Precisione_{XY} [m]</i>	0,0657
<i>Precisione_Z [m]</i>	0,0876
<i>Precisione scala 1:500 [m]</i>	0,1000

Tabella 16: informazioni relative ai fotogrammi e alle elaborazioni compiute dal software Pix4D Mapper per il progetto 3 fino alla generazione della sparse cloud georeferenziata.

Anche in questo caso gli *RMSE* sono inferiori alle precisioni stabilite in base al valore del *GSD*.

Obiettivo del progetto 3 è lo stesso attuato per la creazione del terzo *chunk* compiuta con *Photoscan*, ovvero quello di generare un modello *DSM* e un'Ortofoto dell'intera zona del colle Monte Nero avendo a disposizione due tipologie di dati differenti derivanti dai voli effettuati dal drone *eBee* e dal drone *Phantom4*.

Dapprima sono state generate la nuvola densa di punti e la *mesh* con *texture* impostando le seguenti caratteristiche di elaborazione¹⁴⁴:

¹⁴⁴ <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/208194103#label2&gsc.tab=0>. Ultima consultazione 24/09/2017.

- in “*point cloud*”, come “*image scale*” è stata scelta “*half image size*” e come “*point density*” è stata utilizzata la qualità “*high*”, in modo tale da estrarre un punto ogni due *pixel*. Il formato di *output* scelto è *.las*.
- in “*3D textured mesh*” come settaggio di risoluzione è stato scelto il livello “*high resolution*”, che restituisce la *mesh* col più alto livello di dettaglio. La *mesh* viene generata tenendo conto di tre aspetti, la cui modifica determina i differenti livelli di dettaglio:
 - *maximum octree depth*: per creare una *mesh* il progetto viene suddiviso iterativamente in otto regioni (*octree* 1). Ciascuna regione viene suddivisa a sua volta in altre otto sotto regioni e così via, generando una struttura ad albero. Questo parametro perciò indica quante sotto regioni vengono generate. Più alto è il valore dell’*octree*, maggiore è il numero delle regioni e minori sono le rispettive dimensioni, portando a un’elevata risoluzione e a tempi di calcolo maggiori. Per l’*high resolution* viene impostato un livello di *octree* pari a 14 che corrisponde a una suddivisione del progetto in 8^{14} regioni.
 - *Texture size*: è un parametro usato per definire la risoluzione della trama della *mesh* che influenza la dimensione dei pixel.
 - *Decimation Criteria*: durante la creazione della *mesh* vengono creati troppi triangoli, questo parametro indica come scartare quelli in *surplus*. Utilizzando il livello *high resolution* viene impostato automaticamente il criterio qualitativo (*qualitative*) con strategia “*sensitive*” che permette di scartare solo i triangoli che non fanno parte della struttura originale della *mesh*.

Il formato di output è di tipo *.FBX* e *.OBJ*.

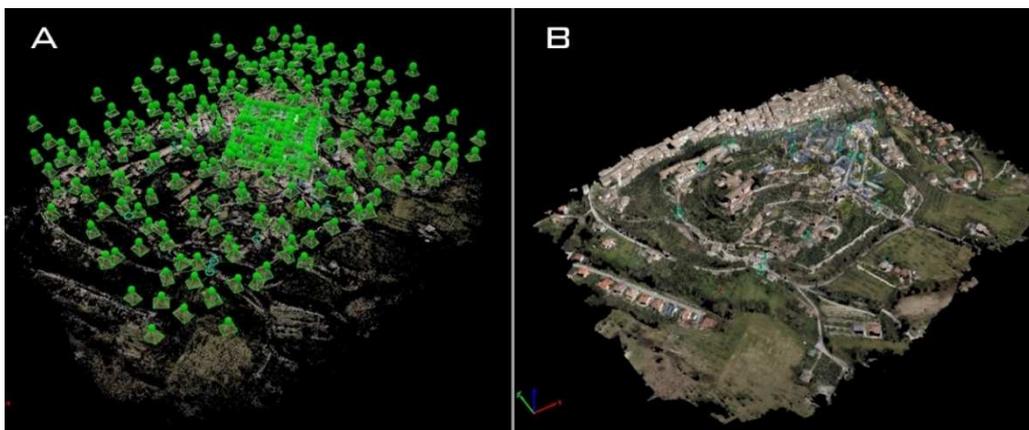


Figura 73: a) nuvola sparsa del file di progetto 3 con fotogrammi calibrati, si nota la diversa distribuzione dei frame dovuta alla differente modalità di presa fotogrammetrica seguita nei due voli, b) nuvola densa del file di progetto 3 con individuazione dei marker.



Figura 74: mesh texturizzata del file di progetto 3 con individuazione dei marker.

Infine sono stati generati il *DSM* e l'Ortofoto con la scelta delle seguenti impostazioni:

- come valore di risoluzione (*resolution*) di entrambi le produzioni è stata effettuata una scelta obbligata pari a il valore del *GSD* (0,0491 m) in quanto il programma al di sotto di questo non permette di impostare alcun valore;
- come "filters DSM", utilizzati per poter definire i parametri di filtraggio del rumore e della levigazione dei punti della nuvola di punti densificata, sono state spuntate le caselle "use noise filtering" per correggere l'altitudine dei punti rumorosi con l'altezza media dei punti vicini e "use surface filtering: sharp" che corregge superfici con asperità erronee appiattendole, preservandone l'orientamento e mantenendo caratteristiche nitide come angoli e spigoli.

Il formato di *output* è di tipo "GeoTIFF".

Dall'analisi del *DSM* e dell'Ortofoto prodotti si nota che il programma *Pix4D* restituisce superfici che nella realtà del caso non esisterebbero, in quanto interpola i dati limitrofi alle zone prive di informazioni, destinando a quest'ultime indicazioni numeriche intermedie diverse da zero.

Anche i contorni dell'area rilevata vengono invalidati da quest'operazione che quasi "smussa e arrotonda" gli spigoli esistenti, riempiendo i vuoti.

Pix4D, a differenza di *Photoscan*, a ogni elaborazione genera automaticamente i documenti di *output* (nuvole di punti sparsa e densa, *DSM* e Ortofoto) nella cartella di salvataggio del file di progetto.



Figura 75: Ortofoto del colle Monte Nero ottenuta col file di progetto 3 relativo all'unione delle due prese aeree effettuate con drone multirottore Phantom 4 e drone ad ala fissa eBee.

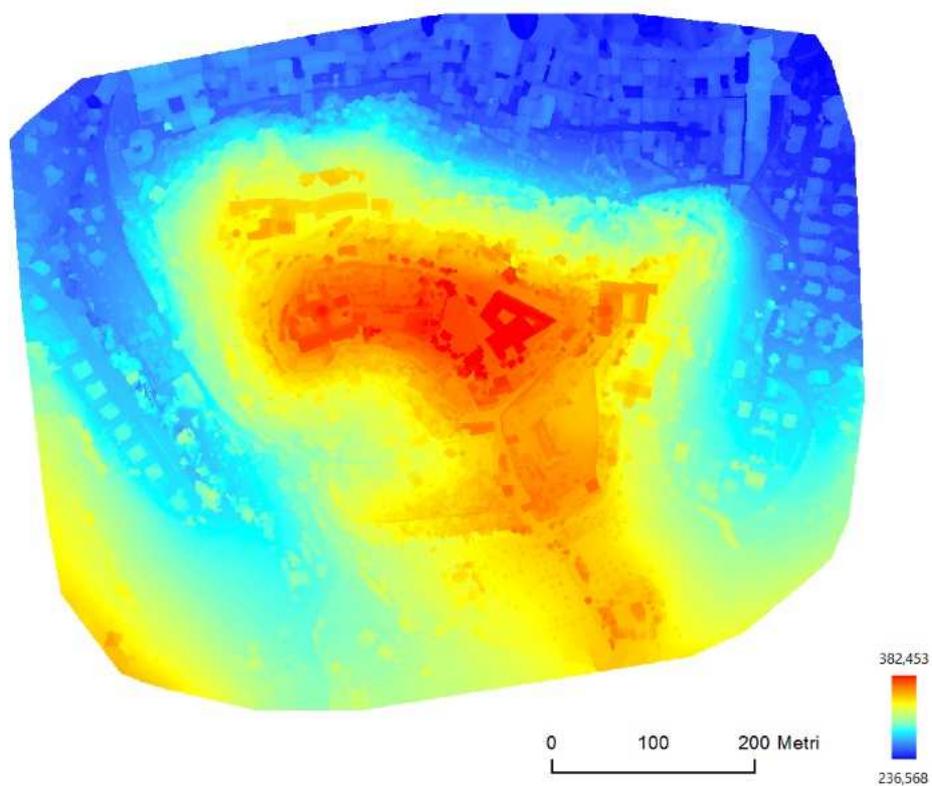


Figura 76: DSM del colle Monte Nero ottenuto col file di progetto 3 relativo all'unione delle due prese aeree effettuate con drone multirottore Phantom 4 e drone ad ala fissa eBee.

Come avvenuto già con l'utilizzo di *Photoscan*, per ciascuno dei tre lavori, sono stati generati i *quality report* contenenti i dati relativi ad ogni passaggio e procedimento effettuato durante l'elaborazione. Da questi sono stati estratti e in seguito analizzati i dati più significativi che vengono inseriti come allegati alla fine della tesi.

Qui di seguito vengono esposti:

- un diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione eseguite sui tre lavori di progetto realizzati col programma *Pix4D*;
- una tabella che analizza le tempistiche totali di elaborazione per ciascun prodotto passo dopo passo;
- una tabella generale di confronto dei dati elaborati nei diversi progetti di lavoro da parte dei programmi *Agisoft Photoscan* e *Pix4D*.

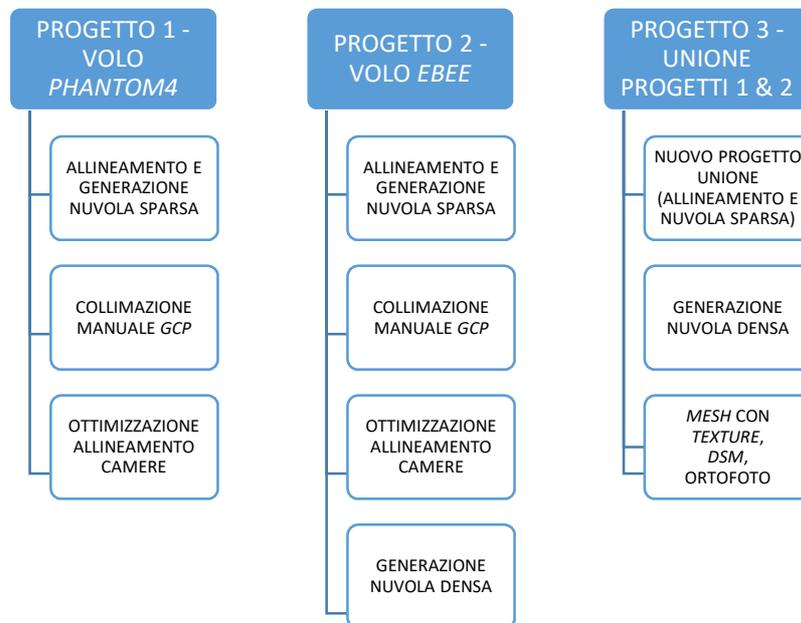


Figura 77: Diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione dei tre file di progetto utilizzati per generare le nuvole dense di punti, la mesh texturizzata, il DSM e l'ortofoto dell'area del colle Monte Nero col software *Pix4D*.

Elaborazione	PROG. 1	Tot. prog.	PROG. 2	Tot. prog.	PROG. 3	Tot. prog.
<i>Initial processing</i>	0h 25' 00"	0h 25' 00"	0h 11' 20"	0h 11' 20"	0h 36' 20"	0h 36' 20"
<i>Collimazione</i>	1h 00' 00"	1h 25' 00"	3h 00' 00"	3h 11' 20"		
<i>Dense cloud</i>	-	-	1h 45' 41"	4h 57' 01"	3h 07' 05"	3h 43' 25"
<i>Mesh texture</i>	-	-	-	-	1h 04' 34"	4h 47' 59"
<i>DSM</i>	-	-	-	-	1h 19' 42"	6h 07' 41"
<i>Ortofoto</i>	-	-	-	-	0h 29' 42"	6h 37' 23"
Totale	-	1h 25'	-	5h 00'	-	6h 40'

Tabella 17: tempistiche di elaborazione dei tre progetti.

	PROGETTO 1 - VOLO DJI PHANTOM4		PROGETTO 2 - VOLO EBEE		PROGETTO 3 - UNIONE	
	Photoscan	Pix4D	Photoscan	Pix4D	Photoscan	Pix4D
<i>NIA/NIC</i>	121/121	121/121	227/227	226/227	348/348	347/348
<i>GSD [m/pix]</i>	0,0260	0,0230	0,0478	0,0491	0,0403	0,0438
<i>Control pts</i>	4	4	13	13	14	13
<i>Check pts</i>	0	0	3	2	3	2
<i>Err [pix]</i>	1,172	1,593	0,199	0,508	0,662	0,552
<i>RMSE_{xyz} [m]</i>	0,0582	0,0216	0,0203	0,0294	0,0209	0,0292
<i>Tempo tot.</i>	2h 25'	1h 25'	3h 50'	5h 00'	7h 30'	6h 40'

Tabella 18: tabella riassuntiva di confronto dei dati elaborati nei diversi progetti di lavoro da parte dei programmi Agisoft Photoscan e Pix4D (NIA/NIC: numero di immagini allineate/numero di immagini caricate).

4.1.3. Elaborazione dati con *Visual SFM*

Visual Structure from Motion è un software gratuito sviluppato da Changchang Wu, ricercatore presso l'*University of Washington*. Il suo impiego copre svariati sistemi operativi da quelli *open source* a quelli commerciali: *Windows*, *MacOS* e *Linux*.

Il programma può essere scaricato gratuitamente digitando l'*url* <http://ccwu.me/vsfm/> e copre le prime fasi della *structure from motion*¹⁴⁵:

- l'estrazione automatica delle *features* eseguita attraverso lo sfruttamento della GPU con tecnologia *CUDA*,
- il *features matching*,
- l'orientamento eseguito mediante *CPU*.

Per quanto riguarda l'estrazione di una nuvola densa dal modello orientato esso si appoggia a due algoritmi *CMVS* e *PMVS* sviluppati da Yasutaka Furukawa e richiamabili dal programma stesso tramite *plug - in*.

Il programma permette di gestire più lavori separatamente per poi riunirli successivamente in un unico *file*.

Nel caso in questione sono stati elaborati solamente i dati inerenti alla presa fotogrammetrica realizzata con il drone ad ala fissa *eBee*.

Dopo aver effettuato il caricamento dei 227 fotogrammi nella sezione "*log window*" (finestra di registro) appaiono per ciascuno di essi, le seguenti informazioni: numero immagine, nome, dimensione in pixel, lunghezza focale e numero di *feature* estratte (tramite algoritmo *SIFT*). Inoltre restituisce il numero totale di fotogrammi caricati e il tempo di impiego.

¹⁴⁵ <http://ccwu.me/vsfm/>. Ultima consultazione 24/09/2017.

Passo successivo è il rilevamento delle *features* in ogni immagine e il conseguente *matching* compiuti entrambi attraverso il singolo comando “*compute missing matching*”.

Il programma divide il processo in due fasi:

- esecuzione dell’algoritmo *SIFT* per l’individuazione delle *feature* in ciascun fotogramma e relativa archiviazione in *file* salvati nella cartella dove sono presenti gli stessi fotogrammi;
- *matching* tra coppie di immagini a due per due.

Il primo procedimento è il più snello mentre il secondo richiede una quantità di tempo maggiore aumentando i fotogrammi inseriti.

Durante l’esecuzione della procedura, tutte le informazioni inerenti ai due processi possono essere visualizzati nella “*log window*” compreso il numero di *match* effettuati per coppie di immagini, il numero di *match* totali e il tempo totale impiegato.

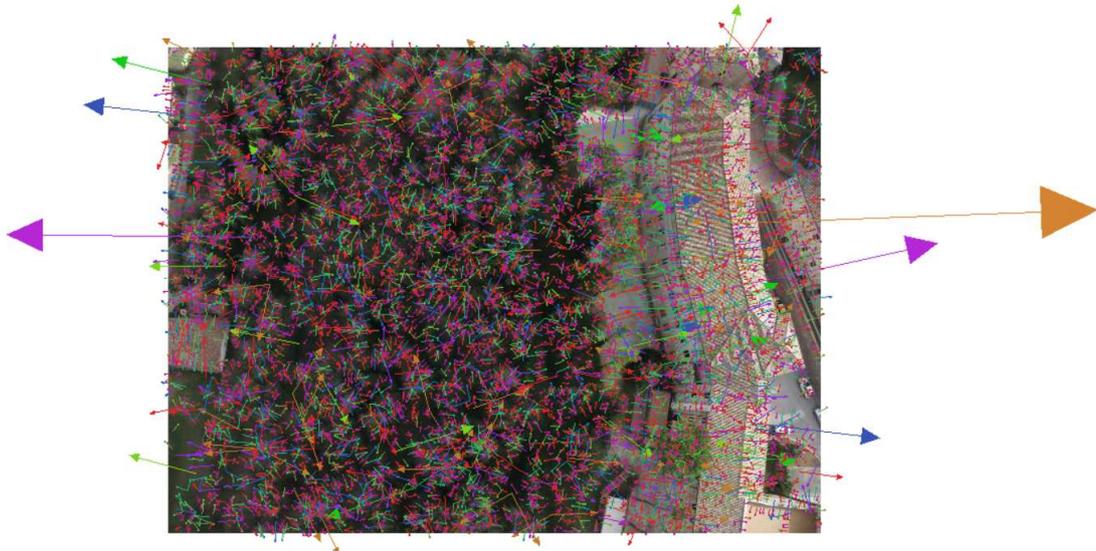


Figura 78: visualizzazione delle *feature* con descrittori che rappresentano le caratteristiche radiometriche dei relativi intorni.

In seguito è stato realizzato l’allineamento dei fotogrammi con conseguente costruzione della nuvola sparsa di punti, utilizzando il comando “*compute 3D reconstruction*”. In questa fase il programma permette di visualizzare dinamicamente l’operazione di orientamento mentre viene eseguita.

Dall’immagine seguente si può facilmente vedere come il numero di punti della nuvola sparsa generati da *Visual SFM* siano nettamente inferiori a quelli generati dai due *software* commerciali *Photoscan* e *Pix4D*. Analisi dettagliate verranno intraprese nel capitolo 5.

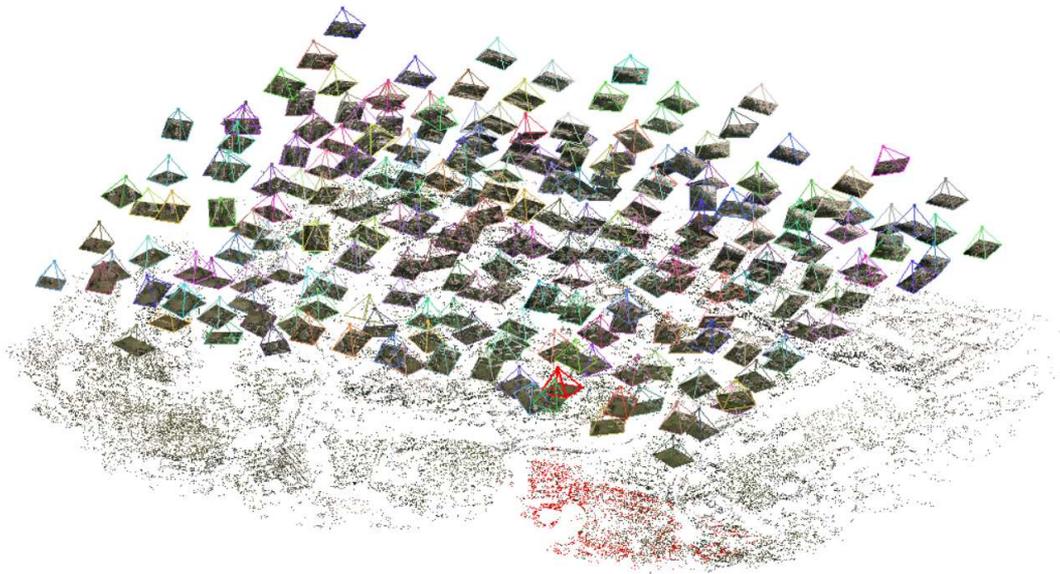


Figura 79: nuvola sparsa di punti elaborata dal programma Visual SFM con identificazione dei fotogrammi allineati nello spazio.

Il processo di ricostruzione 3D (allineamento e generazione nuvola sparsa) generalmente è molto veloce e dura da qualche decina di secondi a qualche minuto a seconda delle dimensioni del progetto di lavoro intrapreso. Durante l'elaborazione, l'algoritmo *PMVS*, utilizzato dal *software*, suddivide il modello compartimentandolo in svariati sotto - modelli. Nel caso in questione ne sono stati generati quattro.

Successivamente il modello tridimensionale creato è stato georeferenziato mediante l'inserimento e la collimazione dei *marker* di coordinate note ottenute durante la fase di acquisizione dati.

Visual SFM permette la sola collimazione manuale precludendo qualsiasi opportunità di visualizzazione in tempo reale dei valori delle coordinate stimate dei *GCP*, i quali non possono essere suddivisi nelle due categorie: *control point* e *check point*. Inoltre le coordinate da inserire devono essere già corrette secondo il sistema di riferimento di *output*: in questo caso *WGS 84/UTM zone 33N*.

La collimazione avviene fotogramma per fotogramma inserendo in ciascuno di essi tutti i *GCP* presenti. L'inserimento dei valori delle coordinate è manuale *marker per marker* e non avviene attraverso l'utilizzo di un *file* esterno, diversamente da come è stato effettuato per gli altri due *software* commerciali.

Per ciascun *marker*, inserito per la prima volta, il sistema tiene in memoria le informazioni relative al nome e ai valori delle tre coordinate, così che la procedura di collimazione si velocizzi nei fotogrammi successivi. Inoltre nella *log window* vengono visualizzate, di collimazione in collimazione, le informazioni relative al posizionamento del punto nel modello locale.

```

-----
Model #0: 156 (out of 156) GCPs can be used
Transformation estimated successfully!
#157: (3370.521, 877.290)          (351732, 4.78762e+006, 311.253)
-----
Model #0: 157 (out of 157) GCPs can be used
Transformation estimated successfully!
#158: (1228.192, 1269.636)       (351655, 4.78754e+006, 303.381)
-----
Model #0: 158 (out of 158) GCPs can be used
Transformation estimated successfully!
#159: (436.434, 325.607)        (351732, 4.78762e+006, 311.253)
-----

```

Figura 80: informazioni, nella log window, della collimazione dei GCP.

Terminata la collimazione dei GCP è stato avviato nuovamente il comando “GCP - based transform” che l’aveva inizialmente attivata, permettendo di fatto al programma di applicare al modello la seguente rototraslazione spaziale con variazione isotropa di scala:

$$X' = S \cdot R \cdot X + T \quad [4.10]$$

dove:

- “S” è il fattore di scala pari a 43,738181931085;
- “R” è la matrice di rotazione:

$$R = \begin{bmatrix} -0,87747927 & -0,01003419 & 0,47950958 \\ 0,47959488 & -0,00930165 & 0,87744073 \\ -0,00434418 & 0,99990639 & 0,01297435 \end{bmatrix} \quad [4.11]$$

- “T” è la matrice di traslazione:

$$T = \begin{pmatrix} 351778,896831575490 \\ 4787373,131568884500 \\ 438,858339210456 \end{pmatrix} \quad [4.12]$$

che ha permesso la restituzione delle coordinate stimate.

I risultati della collimazione con le coordinate iniziali, quelle stimate e gli errori di ciascun GCP e quelli totali sono riassunti in tabelle riportate in allegato.

Conclusasi l’operazione inerente alla georeferenziazione spaziale della nuvola sparsa del colle Monte Nero è stata eseguita l’estrazione della nuvola densa appoggiandosi ai due algoritmi già citati: CMVS e PMVS.

Per poterli avviare è stato necessario scaricare preventivamente il *plug - in* chiamato “CMVS” e inserirlo nella cartella di sistema del *software Virtual SFM*. Nel programma è

apparso dunque il nuovo comando che, una volta selezionato, ha richiamato gli algoritmi in questione consentendo la realizzazione della nuvola densa di punti.

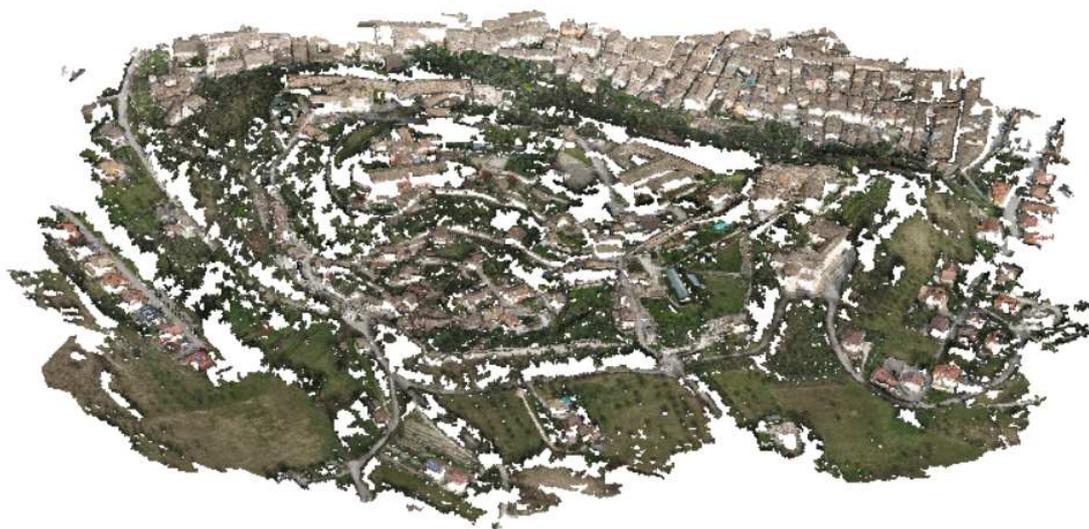


Figura 81: nuvola densa di punti del colle Monte Nero elaborata dal software Visual SFM.

Per ottenere ulteriori *output* quali, modelli di *mesh* *texturizzate*, *DSM* e Ortofoto bisogna esportare la nuvola georeferenziata e adoperare altri *software*. Esistono svariati programmi, sempre di tipo *open source*, che permettono ciò, come per esempio *MeshLab*, *Cloud Compare* o *3D Reshaper*.

Per gli scopi prefissati in questa tesi, ci si è fermati alla singola elaborazione della nuvola densa spazialmente riferita con *software open source*.

Qui di seguito viene esposta una tabella riassuntiva dei dati di *output* frutto dell'elaborazione eseguita con *Visual SFM*.

DATO	PROGETTO 3 - UNIONE VOLI DJI PHANTOM4 & SENSEFLY EBEE
<i>Hardware CPU</i>	<i>Intel Core i7 - 2600 - 3,40GHz</i>
<i>Hardware GPU</i>	<i>NVIDIA GeForce GTX 560 Ti</i>
<i>Sistema operativo</i>	<i>Windows 7 Professional, 64 - bit</i>
<i>Numero di immagini caricate</i>	227
<i>Numero di immagini allineate</i>	227
<i>GSD di progetto</i>	0,0500 m/pix
<i>Tempo caricamento immagini</i>	0h 01' 22"
<i>Tempo feature extraction e matching</i>	1h 13' 54"
<i>Tempo allineamento (sparse cloud)</i>	0h 02' 57"
<i>Tempo di collimazione</i>	3h 00' 00"

<i>Tempo dense reconstruction (dense cloud)</i>	1h 34' 24''
<i>Tempo di elaborazione totale</i>	5h 00'
<i>Punti sparse cloud</i>	114'968
<i>Punti dense cloud</i>	8'627'304
<i>Numero control point</i>	12
<i>Numero check point</i>	0
<i>E_{XYZ} medio [m]</i>	0,3515
<i>σ_{XYZ} [m]</i>	0,2165
<i>$RMSE_{XY}$ [m]</i>	0,3402
<i>$RMSE_z$ [m]</i>	0,2338
<i>$RMSE_{XYZ}$ [m]</i>	0,4128
<i>Precisione_{XY} [m]</i>	0,0750
<i>Precisione_z [m]</i>	0,1000
<i>Precisione scala 1:500 [m]</i>	0,1000

Tabella 19: informazioni riassuntive dei dati di output frutto dell'elaborazione eseguita con Visual SFM.

Come si può vedere dai dati elencati la georeferenziazione effettuata ha restituito valori di RMSE superiori sia alle precisioni ottenute con le formule dell'EuroSDR sia a quelle dettate dalla scala di rappresentazione.

A conclusione dell'elaborazione dei dati acquisiti con drone *eBee* attraverso l'utilizzo del software *Virtual SFM*, e tenute in considerazione quelle effettuate con i due programmi commerciali, vengono restituite le seguenti considerazioni:

Pro:

- Vengono abbattuti i costi relativi all'acquisizione di un software per l'elaborazione dei dati acquisiti con tecniche fotogrammetriche.
- Il processo di allineamento dinamico permette di visualizzare in maniera chiara la procedura eseguita dal software.

Contro:

- Viene preso in considerazione soltanto un parametro "k" per la correzione delle distorsioni; dunque il programma non è adatto all'elaborazione di fotogrammi caratterizzati da distorsioni importanti. Motivo per cui nei capitoli successivi, che interesseranno l'elaborazione dei dati inerenti la Torre degli Smeducci (soprattutto per il caso della tecnica fotogrammetrica terrestre), non si utilizzerà il *software* in questione.
- Il processo di collimazione non viene mantenuto in memoria dal *file* generale di progetto salvato, quindi dev'essere costantemente ripetuto ogni volta che si riapre il documento, risultando essere sempre diverso.

- L'impossibilità di gestire e suddividere i *check points* dai *control points* determina una dilatazione maggiore dei tempi di collimazione. Infatti in caso di errori o di valori non consoni restituiti la collimazione deve essere effettuata nuovamente da capo.
- L'assenza di un manuale con spiegazioni inerenti al settaggio delle opzioni di elaborazione impedisce il miglioramento della qualità dei dati in *output*.
- I calcoli effettuati per la restituzione delle coordinate in output semplificano in maniera eccessiva il modello ricreato.
- Necessità di ulteriori *software* per concludere l'elaborazione *standard* dei dati.

Si può concludere riassumendo che il programma è un discreto strumento di studio di modelli fotogrammetrici nel caso di piccoli rilievi, non richiedenti un'elevata precisione. Il suo punto forte risulta essere quello inerente alle tecniche di *features extraction*, *matching* e allineamento. Stando a quanto richiesto oggi dal mercato, nonostante l'abbattimento delle spese per l'utilizzo lavorativo, se ne propone l'impiego in fase di studio preliminare di elaborazione dati, evitandone l'utilizzo per la creazione di modelli georeferenziati.

Di seguito viene esposta una matrice di qualità che analizza le diversità tra i tre *software* utilizzati.

	Agisoft Photoscan	Pix4D	Visual SFM
<i>Economicità</i>	+	++	+++++
<i>Interfaccia utente</i>	++++	+++	+
<i>Gestione dei lavori</i>	++++	+++	++
<i>Gestione dei fotogrammi</i>	++++	+++	/
<i>Gestione dell'elaborazione</i>	++++	+++	?
<i>Rapidità di elaborazione</i>	+++	++++	+++
<i>Estrazione features, matching, allineamento</i>	++++	++++	+++
<i>Georeferenziazione</i>	++++	++++	+
<i>Creazione nuvole di punti</i>	+++	++++	++
<i>Ortofoto, DSM</i>	++++	++	/

Tabella 20: matrice di qualità dei programmi utilizzati. La scala di valutazione va da un valore minimo "+" assunto come scarsa qualità, ad un massimo di "+++++" assunto come massima qualità. Per "/" si intende l'assenza di quella funzionalità, per "?" si intende la non completa conoscenza della funzionalità.

4.2. Scala architettonica: elaborazioni fotogrammetriche dei dati acquisiti da UAV della Torre degli Smeducci

I dati della Torre degli Smeducci, acquisiti tramite tecnica fotogrammetrica aerea con il drone *Phantom4* della *Dji*, sono stati elaborati con due differenti *software* commerciali: *Agisoft Photoscan* e *Pix4D*. La scelta di adoperare due *software* diversi è stata effettuata in modo da avere dati sufficienti per compiere analisi qualitative e quantitative esaustive per quanto concerne il differente sviluppo informatico nel mondo delle *software house* commerciali.

Si è abbandonato l'utilizzo del *software* commerciale *Visual SFM* a causa delle difficoltà riscontrate nella georeferenziazione dei dati. Infatti per elaborazioni più complesse il suo impiego risulta essere inattuabile.

4.2.1. Elaborazione dati con *Agisoft Photoscan*

I dati acquisiti mediante UAV della Torre degli Smeducci ed elaborati con il programma *Agisoft Photoscan* sono serviti a generare i seguenti prodotti con differenti finalità:

- nuvola densa di punti per successivi confronti e analisi con le altre nuvole prodotte con distinte tecniche di rilievo e differenti *software* computazionali;
- Ortofoto dei fronti della torre.

4.2.1.1. Determinazione della nuvola densa di punti

Sono stati seguiti gli stessi procedimenti attuati per la determinazione della nuvola densa di punti del colle Monte Nero. Il significato dei parametri utilizzati è stato già esposto nei paragrafi precedenti, pertanto qui di seguito vengono riportati solamente i passaggi salienti che si sono susseguiti per creare la nuvola densa della Torre:

- caricamento dei 172 fotogrammi derivanti dalla presa fotogrammetrica effettuata dal drone *Dji Phantom4*;
- allineamento dei fotogrammi e generazione della nuvola sparsa di punti:
 - *accuracy: high*,
 - *pair selection: disabled.*;
- definizione del sistema di riferimento *WGS 84/UTM zone 33N*;
- collimazione manuale e gestione dei *GCP* scegliendo quali non collimare a causa della scarsa visibilità di questi e quali destinare come *control points* o *check points*;
- ottimizzazione dell'allineamento delle camere, tenendo conto dei parametri f , c_x , c_y , b_1 , b_2 , k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2 , p_3 . Questa operazione ha restituito determinati valori finali di errori residui e proiezioni sui *marker* ricavati dal *quality report*

prodotto a fine elaborazione e introdotti in tabelle che vengono inserite come allegati alla presente tesi.

- Realizzazione della nuvola densa di punti:
 - *quality: high,*
 - *depth filtering: moderate.*

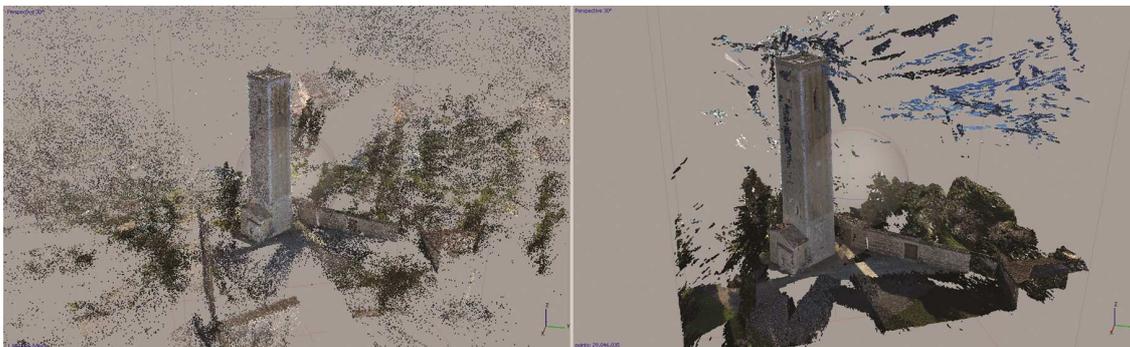


Figura 82: a sinistra la nuvola sparsa di punti della Torre degli Smeducci, a destra la nuvola densa di punti.

I risultati delle procedure compiute fino ad ora sono riassunti nella tabella che segue.

DATO	CHUNK 1 - VOLO DJI PHANTOM4 - TORRE DEGLI SMEDUCCI
<i>Hardware CPU</i>	<i>Intel Core i7 - 6850K - 3,60GHz</i>
<i>Hardware GPU</i>	<i>NVIDIA Quadro M2000</i>
<i>Sistema operativo</i>	<i>Windows 7 Professional, 64 - bit</i>
<i>Numero di immagini allineate/caricate</i>	<i>172/172</i>
<i>GSD</i>	<i>0,00451 m/pix</i>
<i>Modello della camera</i>	<i>FC330</i>
<i>Dimensione del pixel e risoluzione</i>	<i>1,56x1,56 µm (4000x3000)</i>
<i>Lunghezza focale</i>	<i>3,61 mm</i>
<i>Matching time</i>	<i>3h 38' 00''</i>
<i>Alignment time</i>	<i>0h 15' 45''</i>
<i>Collimation time</i>	<i>4h 00' 00''</i>
<i>Optimization time</i>	<i>0h 01' 14''</i>
<i>Densification time</i>	<i>0h 44' 04''</i>
<i>Tempo totale (approssimato)</i>	<i>8h 40'</i>
<i>Punti sparse cloud</i>	<i>1'057'796</i>
<i>Punti dense cloud</i>	<i>29'046'035</i>
<i>Numero control point</i>	<i>33</i>

<i>Numero check point</i>	3
<i>E_{XYZ} medio [m]</i>	0,0163
<i>σ_{XYZ} [m]</i>	0,0054
<i>RMSE_{XY} [m]</i>	0,0119
<i>RMSE_Z [m]</i>	0,0124
<i>RMSE_{XYZ} [m]</i>	0,0172
<i>Precisione_{XY} e tolleranza_{XY}[m]</i>	0,0068 - 0,0136
<i>Precisione_Z e tolleranza_Z[m]</i>	0,0090 - 0,0180
<i>Precisione e tolleranza scala 1:50 [m]</i>	0,0100 - 0,0200

Tabella 21: informazioni relative ai fotogrammi acquisiti con il drone *Phantom4* interessanti la Torre degli Smeducci e alle successive elaborazioni compiute dal software *Agisoft Photoscan*.

Gli *RMSE* piano - altimetrici non rientrano né nella precisione calcolata secondo le formule consigliate dall'*EuroSDR*, né in quella della scala di rappresentazione. Rientrano però nelle relative tolleranze, rendendo accettabili i risultati ottenuti.

4.2.1.2. Realizzazione delle Ortofoto dei fronti della Torre degli Smeducci

Il volo aereo effettuato con il drone *Phantom4* non ha permesso una completa acquisizione del lato sud della Torre a causa della presenza di vegetazione ad alto fusto. Infatti la nuvola densa generata dalla procedura di *structure from motion* presenta lacune di punti in prossimità della parte bassa del lato sopracitato.

Per ovviare a questa problematica è stato creato un *chunk* (*chunk 2*) apposito con i fotogrammi, acquisiti mediante tecnica fotogrammetrica terrestre, inquadranti la porzione di facciata mancante.

Il procedimento per la realizzazione delle Ortofoto è stato il seguente:

- caricamento di 10 fotogrammi selezionati dalla presa fotogrammetrica terrestre, dei quali:
 - 8 inquadrano la parte inferiore del prospetto sud della torre,
 - 2 inquadrano in parte la facciata sud della torre e in parte quella est, per poter avere una corrispondenza tra i due *chunk*, data dai *marker* presenti proprio sulla facciata est;
- allineamento dei fotogrammi e generazione della nuvola sparsa di punti:
 - *accuracy: high*,
 - *pair selection: disabled*;
- determinazione del sistema di riferimento *WGS 84/UTM zone 33N*;
- collimazione manuale e gestione dei *GCP*;
- ottimizzazione dell'allineamento delle camere e presa visione dei risultati delle procedure relative al *chunk 2*:

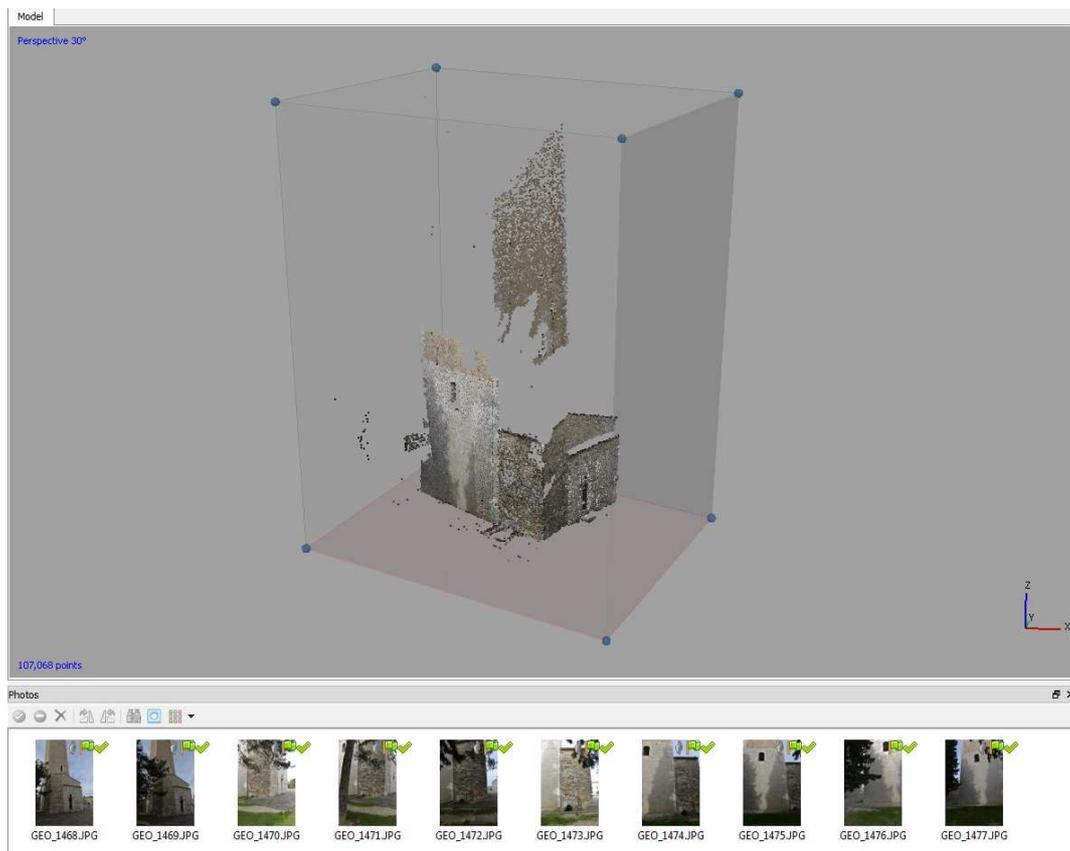


Figura 83: nuvola sparsa di punti elaborata dal software Agisoft Photoscan a partire dai 10 fotogrammi estrapolati dalla presa fotogrammetrica terrestre.

DATO

**CHUNK 2 - 10 FOTOGRAMMI PRESA
TERRESTRE CAMERA NIKON**

Hardware CPU	Intel Core i7 - 6850K - 3,60GHz
Hardware GPU	NVIDIA Quadro M2000
Sistema operativo	Windows 7 Professional, 64-bit
Numero di immagini caricate	10
Numero di immagini allineate	10
GSD	0,00174 m/pix
Modello della camera	NIKON D800E
Dimensione del pixel	4,89x4,89 μm
Risoluzione	7360x4912
Lunghezza focale	3,61 mm
Matching time	01' 49"
Alignment time	00' 57"
Collimation time	05' 00"
Optimization time	00' 11"
Tempo totale (approssimato)	08'

<i>Punti sparse cloud</i>	107'068
<i>Numero control point</i>	8
<i>Numero check point</i>	0
<i>E_{XYZ} medio [m]</i>	0,0123
<i>σ_{XYZ} [m]</i>	0,0066
<i>RMSE_{XY} [m]</i>	0,0098
<i>RMSE_Z [m]</i>	0,0099
<i>RMSE_{XYZ} [m]</i>	0,0139
<i>Precisione_{XY} e tolleranza_{XY}[m]</i>	0,0026 - 0,0052
<i>Precisione_Z e tolleranza_Z[m]</i>	0,0035 - 0,0070
<i>Precisione e tolleranza scala 1:50 [m]</i>	0,0100 - 0,0200

Tabella 22: informazioni relative ai 10 fotogrammi acquisiti con la camera Nikon interessanti la Torre degli Smeducci e alle successive elaborazioni compiute dal software Agisoft Photoscan.

dove gli *RMSE* piano - altimetrici non rientrano né nella precisione calcolata secondo le formule consigliate dall'*EuroSDR*, né in quella della scala di rappresentazione. Rientrano però nella tolleranza della scala di rappresentazione, rendendo accettabili i risultati ottenuti.

- Allineamento dei due *chunk*: volo *Dji Phantom4* e presa terrestre camera *Nikon* - 10 fotogrammi.
- Unione delle due nuvole sparse di punti, facenti parte dei due *chunk*, tramite il metodo basato sulla localizzazione spaziale dei *marker*.
- Ottimizzazione dell'allineamento delle camere.
- Generazione della nuvola densa di punti:
 - *quality: high*,
 - *depth filtering: moderate*.
- Pulizia manuale della nuvola densa di punti per eliminare il rumore di fondo.
- Generazione della *mesh*:
 - *surface type: "arbitrary"* caratteristica per ottenere un modello tridimensionale di manufatti puntuali e non a scala territoriale;
 - *data source*: nuvola densa;
 - *face count: high*;
 - *interpolation: disabled*.
- Generazione della *mesh* con *texture*:
 - *mapping mode: adaptive orthophoto* consigliata dallo sviluppatore per generare prospetti;
 - *blending mode: mosaic*;
 - disabilitazione della "*color correction*".

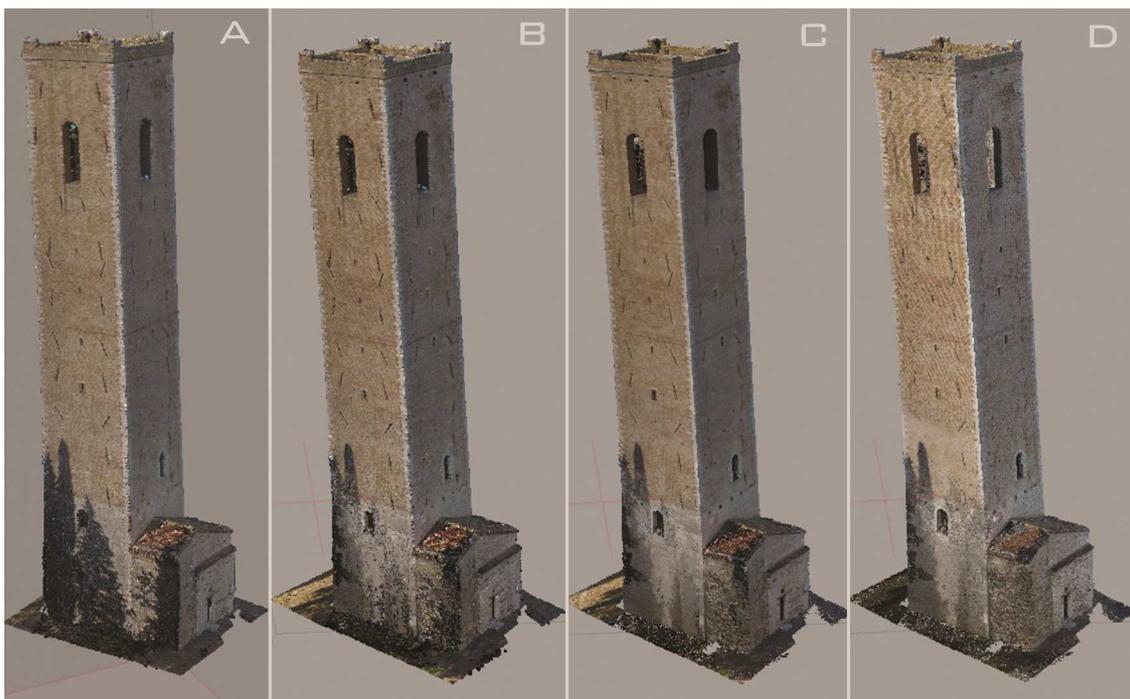


Figura 84: a) nuvola sparsa elaborata dai fotogrammi acquisiti con la presa fotogrammetrica aerea, b) nuvola sparsa elaborata dall'unione dei fotogrammi acquisiti con le prese fotogrammetriche aerea e terrestre per il solo lato Sud, c) mesh, d) mesh con texture.

- Produzione di 4 Ortofoto attraverso il comando “*orthomosaic*” che prevede invece le seguenti specifiche di *input*:
 - *projection type: planar* ovvero l'orientamento dell'Ortofoto basato sulla proiezione dei dati rispetto ad un piano predefinito;
 - *projection plane*: basato sui *marker*, per ciascun fronte è stata creata una terna virtuale di punti di appoggio in modo tale da definirne il piano parallelo di proiezione;
 - *coordinate system: WGS 84/UTM zone 33N*;
 - *surface: mesh*;
 - *pixel size: 0,004 m* per poter ottenere le Ortofoto in scala 1:50;
 - *blending mode: mosaic*;
 - disabilitazione della “*color correction*”.

DATO	CHUNK 3 - UNIONE CHUNK 1 E CHUNK 2
<i>Hardware CPU</i>	<i>Intel Core i7 - 6850K - 3,60GHz</i>
<i>Hardware GPU</i>	<i>NVIDIA Quadro M2000</i>
<i>Sistema operativo</i>	<i>Windows 7 Professional, 64 - bit</i>
<i>Numero di immagini caricate</i>	182
<i>Numero di immagini allineate</i>	182
<i>GSD</i>	0,0038 m/pix
<i>Elaborazioni precedenti chunk 1 & 2 (time)</i>	8h 04' 00''
<i>Optimization time</i>	0h 01' 00''
<i>Densification time</i>	0h 27' 43''
<i>Pulizia (time)</i>	0h 20' 00''
<i>Mesh (time)</i>	0h 33' 36''
<i>Textured mesh (time)</i>	0h 02' 28''
<i>Ortofoto x4 (time)</i>	0h 15' 00''
<i>Tempo totale (approssimato)</i>	9h 20'
<i>Punti sparse cloud</i>	1'164'864
<i>Punti dense cloud</i>	30'270'426
<i>Numero di facce della mesh</i>	6'054'084
<i>Numero di vertici della mesh</i>	3'472'532
<i>Numero control point</i>	33
<i>Numero check point</i>	6
<i>E_{XYZ} medio [m]</i>	0,0162
<i>σ_{XYZ} [m]</i>	0,0055
<i>$RMSE_{XY}$ [m]</i>	0,0119
<i>$RMSE_z$ [m]</i>	0,0124
<i>$RMSE_{XYZ}$ [m]</i>	0,0171
<i>Precisione_{xy} e tolleranza_{xy}[m]</i>	0,0057 - 0,0114
<i>Precisione_z e tolleranza_z[m]</i>	0,0076 - 0,0152
<i>Precisione e tolleranza scala 1:50 [m]</i>	0,0100 - 0,0200

Tabella 23: informazioni relative al chunk unione interessante la Torre degli Smeducci e alle successive elaborazioni compiute dal software Agisoft Photoscan.

Gli $RMSE$ piano - altimetrici non rientrano né nella precisione calcolata secondo le formule consigliate dall'*EuroSDR*, né in quella della scala di rappresentazione. Rientrano però nelle relative tolleranze, rendendo accettabili i risultati ottenuti.

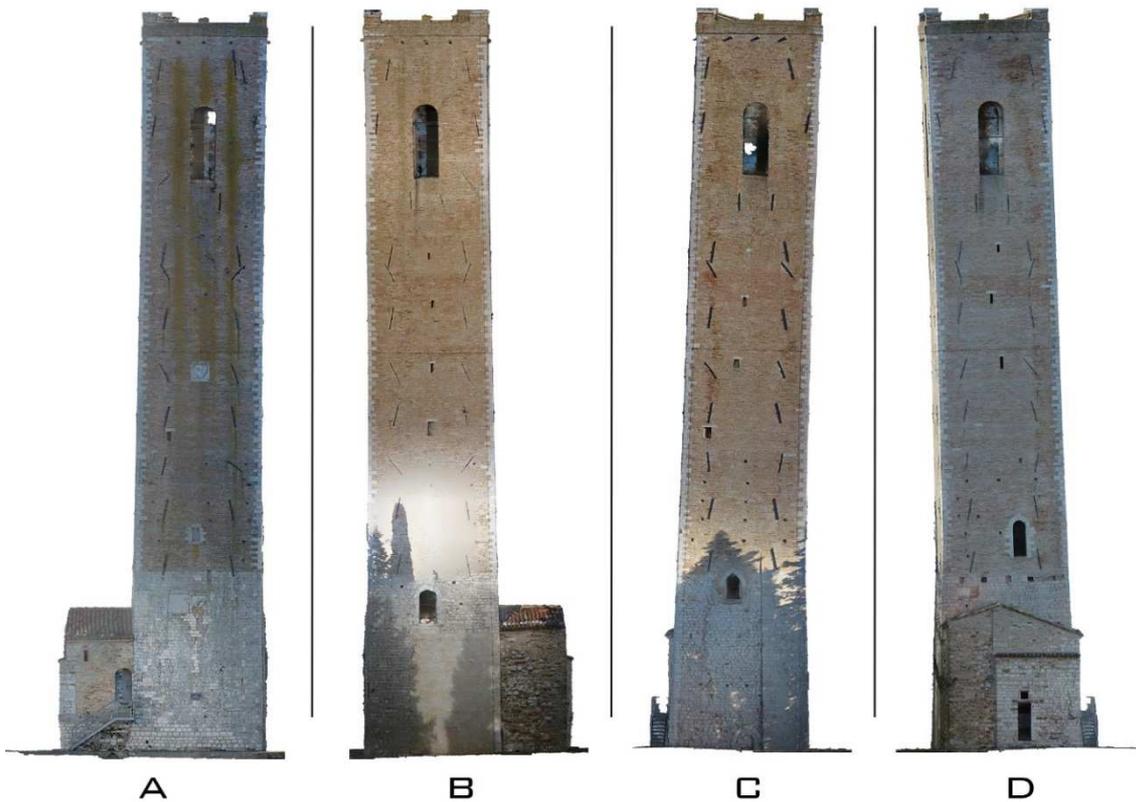


Figura 85: a) prospetto Nord, b) prospetto Sud, c) prospetto Ovest, d) prospetto Est.

Successivamente alla realizzazione delle Ortofoto dei quattro fronti della Torre, si è voluto effettuare un confronto tra l'Ortofoto del fronte sud appena ottenuta e quella ottenibile dalla nuvola densa di punti elaborata a partire dai fotogrammi acquisiti solo col drone *Phantom4*. Le elaborazioni eseguite sono state identiche a quelle appena esposte. E' stata quindi generata in un primo momento la *mesh*, successivamente la *mesh texturizzata* ed infine la singola Ortofoto del fronte sud. Il risultato tra le due elaborazioni messe a confronto è rappresentato nella seguente figura.

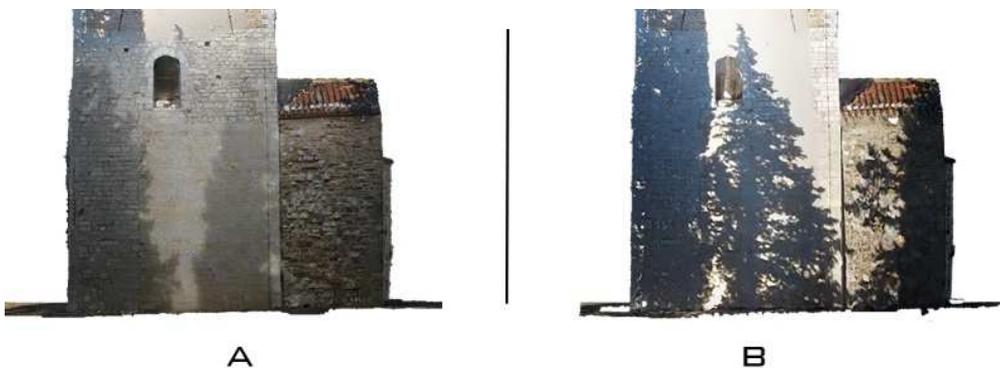


Figura 86: parte inferiore del prospetto Sud ricavata a) mediante l'aggiunta dei 10 fotogrammi acquisiti con tecnica fotogrammetrica terrestre, b) con il solo utilizzo dei fotogrammi acquisiti con tecnica fotogrammetrica aerea da drone *Phantom4*.

Nel caso B della figura sopra esposta risulta evidente come l'Ortofoto del fronte sud non sia definita in maniera completa. Quindi è difficilmente utilizzabile per eseguire analisi e/o restituzioni grafiche.

Qui di seguito viene esposto un diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione eseguite sui tre *chunk*.

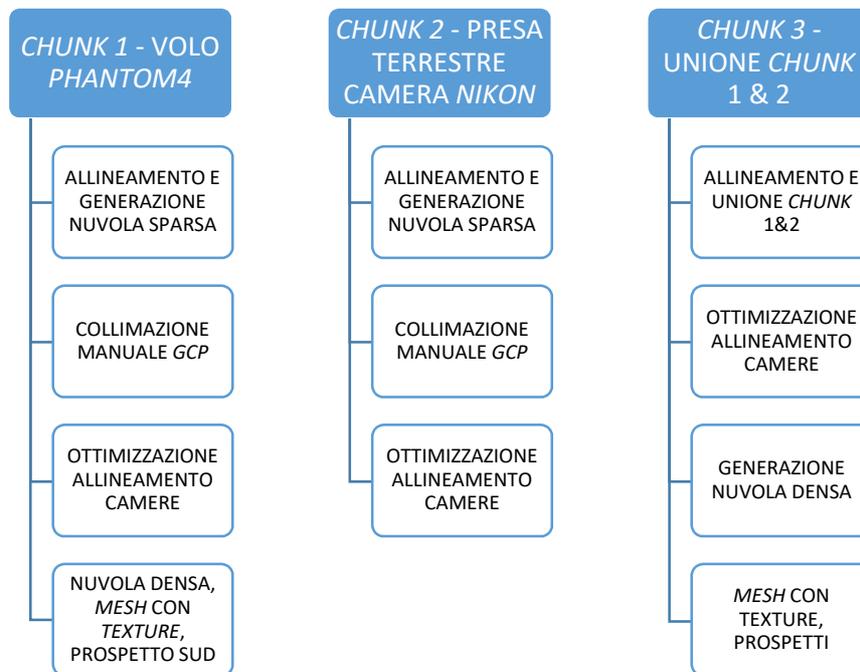


Figura 87: Diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione dei tre chunk utilizzati per generare la nuvola densa di punti mediante tecnica fotogrammetrica aerea e i quattro prospetti della Torre degli Smeducci con l'utilizzo del software Agisoft Photoscan.

4.2.2. Elaborazione dati con *Pix4D Mapper*

I dati acquisiti mediante *UAV* della Torre degli Smeducci ed elaborati con il programma *Pix4D Mapper* sono serviti a generare gli stessi prodotti ricavati dall'utilizzo di *Photoscan*:

- nuvola densa di punti per successivi confronti e analisi con le altre nuvole prodotte con distinte tecniche di rilievo e differenti *software* computazionali;
- Ortofoto dei fronti della torre.

4.2.2.1. Determinazione della nuvola densa di punti

I parametri impostati e le relative specifiche sono state le stesse utilizzate per la determinazione della nuvola densa di punti del colle Monte Nero (*software Pix4D*). Di seguito vengono riportati i passaggi salienti, tralasciando gli aspetti dovuti all'utilizzo del programma, i quali sono stati già esposti precedentemente:

- creazione progetto di lavoro *standard* con scelta della tipologia “3D models” adatta alla generazione di nuvole di punti e modelli di *mesh texturizzate* a partire da prese aeree oblique o prese terrestri;
- caricamento dei 172 fotogrammi derivanti dalla presa fotogrammetrica effettuata col drone *Dji Phantom4*;
- determinazione del sistema di coordinate *WGS 84/UTM zone 33N* in input e in output;
- allineamento dei fotogrammi e generazione della nuvola sparsa di punti tramite l’esecuzione dell’*initial processing* con le seguenti impostazioni:
 - *keypoints image scale: full*,
 - *matching image pairs: free flight or terrestrial*,
 - *targeted number of keypoints: automatic*,
 - *calibration method: standard*,
 - *rematch: automatic*;
- caricamento di tutti i *marker* e collimazione manuale iniziale solo di 6 di essi, equamente distribuiti lungo i quattro lati della torre, su 6 - 8 fotogrammi circa e riprocessamento dell’allineamento;
- collimazione manuale di tutti i *marker*;
- gestione dei *GCP* scegliendo quali non collimare a causa della loro scarsa visibilità e quali destinare come *control points 3D*, *control points 2D* o *check points*;
- ottimizzazione e riallineamento delle camere e generazione del *quality report*. Questa operazione ha restituito determinati valori finali di errori residui sui *marker* ricavati dal *quality report* prodotto a fine elaborazione e introdotti in tabelle che vengono inserite come allegati alla presente tesi. Si nota che un fotogramma non è stato allineato dal processo iniziale.
- realizzazione della nuvola densa (*dense point cloud*) attraverso la sezione “*point cloud and mesh*”. I parametri presi in considerazione nella finestra di dialogo sono i seguenti:
 - *image scale: half image size” (default)*,
 - *point density: high”*,
 - *export: formato .las e unione di tutte le tiles in una singola*.

4.2.2.2. Realizzazione delle Ortofoto dei fronti della Torre degli Smeducci

La produzione delle Ortofoto mediante il *software Pix4D* ha previsto il solo utilizzo dei fotogrammi acquisiti col volo del drone *Dji Phantom4*. Le motivazioni verranno espone successivamente in quanto sono frutto del risultato finale dell’elaborazione.

Partendo dalla nuvola densa di punti precedentemente ottenuta, il procedimento per la definizione degli elaborati sopra citati è stato il seguente:

- pulizia manuale della nuvola densa presente nel *file* di progetto (tale pulizia però non può essere esportata nelle cartelle di salvataggio) per eliminare il rumore di fondo;
- generazione della *mesh* con *texture*:
 - *resolution: high resolution*,
 - *export: .FBX e .OBJ*;
- realizzazione delle 4 Ortofoto generando rispettivamente 4 piani ortogonali rispetto a quello di riferimento, definito dagli assi “x,y”, e paralleli alle superfici in questione, il tutto è possibile mediante il comando “*orthoplane*” che prevede il settaggio delle coordinate dei piani e l’avvio dell’elaborazione.

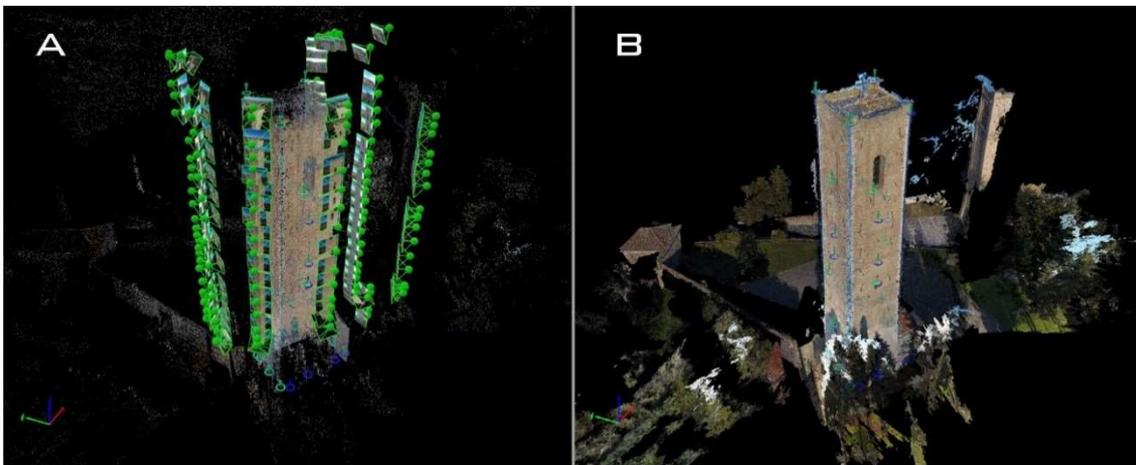


Figura 88: a) nuvola sparsa della Torre degli Smeducci con identificazione dei fotogrammi allineati e dei marker collimati; b) nuvola densa della Torre degli Smeducci con identificazione dei marker collimati.

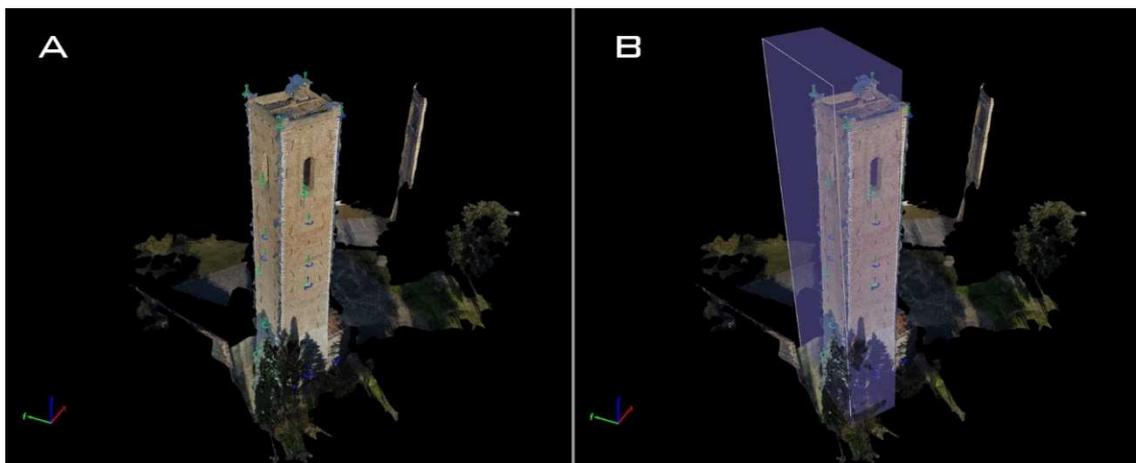


Figura 89: a) mesh texturizzata della Torre degli Smeducci con identificazione dei marker collimati; b) identificazione su mesh texturizzata dell’ortopiano creato per generare il prospetto Ovest.

DATO**PROGETTO 1 - VOLO DJI PHANTOM4 -
TORRE DEGLI SMEDUCCI**

Hardware CPU	Intel Core i7 - 4770 3.40GHz
Hardware GPU	NVIDIA GeForce GTX 760
Sistema operativo	Windows 7 Professional, 64 - bit
Numero di immagini caricate	172
Numero di immagini allineate	171
GSD	0,0084 m/pix
Modello della camera	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)
Dimensione del pixel	6,317x4,738 mm
Risoluzione	4000x3000
Lunghezza focale	3,6 mm
Initial processing (time)	0h 20' 00"
Collimation time	4h 00' 00"
Densification time	0h 50' 35"
Textured mesh (time)	0h 24' 46"
Ortofoto x4 (time)	5h 20' 00"
Tempo totale (approssimato)	10h 55'
Punti sparse cloud	1'089'385
Punti dense cloud	30'293'553
Numero control point	33
Numero check point	2
E_{XYZ} medio [m]	0,0137
σ_{XYZ} [m]	0,0060
$RMSE_{XY}$ [m]	0,0100
$RMSE_z$ [m]	0,0112
$RMSE_{XYZ}$ [m]	0,0150
Precisione _{XY} e tolleranza _{XY} [m]	0,0126 - 0,0252
Precisione _z e tolleranza _z [m]	0,0168 - 0,0336
Precisione e tolleranza scala 1:50 [m]	0,0100 - 0,0200

Tabella 24: informazioni relative ai fotogrammi acquisiti con il drone Phantom4 interessanti la Torre degli Smeducci e alle successive elaborazioni compiute dal software Pix4D.

Gli $RMSE$ piano - altimetrici rientrano nella precisione calcolata secondo le formule consigliate dall'EuroSDR.

Il risultato grafico dell'elaborazione delle Ortofoto viene illustrato nell'immagine seguente.

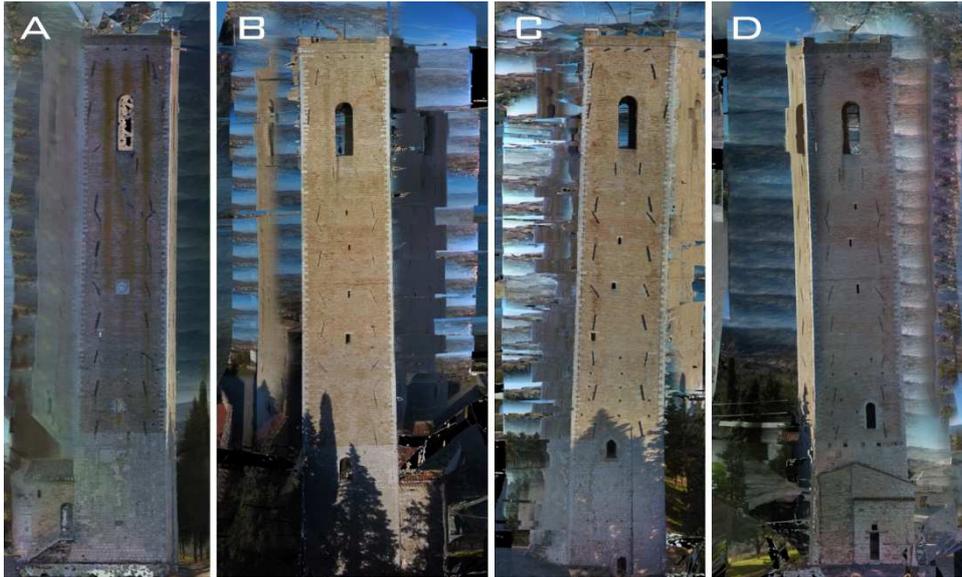


Figura 90: a) prospetto Nord; b) prospetto Sud; c) prospetto Ovest; d) prospetto Est.

Si può notare come il risultato ottenuto sia disturbato dalla presenza di rumore. Questi non è altro che un riempimento erroneo degli spazi vuoti, i quali dal punto di vista computativo dovrebbero vedersi assegnare un valore numerico nullo inerente sia alle informazioni *RGB* sia a quelle del modello altimetrico. Gli spazi in questo caso sono però “colmati” da dati derivanti dalle parti di sfondo dei fotogrammi, per quanto riguarda il contenuto *RGB*, e da un valore diverso da zero, per quanto riguarda le informazioni del modello altimetrico.

Non è stato compreso fino in fondo il motivo dell’errata restituzione da parte del programma, la quale può essere però risolta applicando delle maschere in ciascun fotogramma per non far considerare determinate zone (generanti rumore) durante la *feature extraction*, come per esempio il cielo. Oppure intraprendendo un’azione di *image editing* direttamente con programmi esterni a *Pix4D Mapper* (per esempio *Adobe Photoshop*), poichè la prima procedura risulta essere notevolmente lunga rispetto a quella che si può effettuare con *Photoscan*.

Sta di fatto che, a causa di queste problematiche dovute alla produzione delle Ortofoto in *Pix4D*, non è stata eseguita l’elaborazione dei dati inerenti ai 10 fotogrammi acquisiti con presa terrestre, da unire a quelli appena elaborati in un unico *file* di progetto e poter definire meglio la parte bassa del fronte sud della Torre.

Quindi la restituzione grafica, che verrà intrapresa nei capitoli 6 e 7, come supporto ha preso in considerazione soltanto le Ortofoto generate con il software *Agisoft Photoscan*. Qui di seguito viene esposto un diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione eseguite col programma *Pix4D* e una tabella generale di confronto dei dati elaborati nei diversi progetti di lavoro da parte dei programmi *Agisoft Photoscan* e *Pix4D*.



Figura 91: Diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione del file di progetto utilizzato per generare la nuvole densa di punti, la mesh texturizzata, e i prospetti della Torre degli Smeducci col software Pix4D.

	PROGETTO 1 - VOLO DJI PHANTOM4		PROGETTO 2 - PRESA TERRESTRE		PROGETTO 3 - UNIONE	
	Photoscan	Pix4D	Photoscan	Pix4D	Photoscan	Pix4D
NIA/NIC	172/172	171/172	10/10	-	182/182	-
GSD [m/pix]	0,00451	0,0084	0,00174	-	0,0038	-
Control pts	33	33	8	-	33	-
Check pts	3	2	0	-	6	-
Err [pix]	0,688	0,673	0,413	-	0,681	-
RMSE [m]	0,0172	0,0150	0,0139	-	0,0171	-
Tempo tot.	8h 40'	10h 55'	0h 08'	-	9h 20'	-

Tabella 25: tabella riassuntiva di confronto dei dati elaborati nei diversi progetti di lavoro da parte dei programmi Agisoft Photoscan e Pix4D Mapper (NIA/NIC: numero di immagini allineate/numero di immagini caricate).

4.3. Scala architettonica: elaborazioni fotogrammetriche dei dati acquisiti con tecnica terrestre della Torre degli Smeducci

I dati della Torre degli Smeducci, acquisiti tramite tecnica fotogrammetrica terrestre con la camera fotografica *Nikon D800E*, sono stati elaborati con due differenti *software* commerciali: *Agisoft Photoscan* e *Pix4D*. Come per il caso del rilievo della torre con tecnica fotogrammetrica da *UAV*, la scelta di adoperare due *software* di case sviluppatrici differenti è da imputarsi alla mera intenzione di raffronto dati.

4.3.1. Elaborazione dati con *Agisoft Photoscan*

I dati acquisiti mediante fotogrammetria terrestre ed elaborati con il programma *Agisoft Photoscan* sono serviti a generare la nuvola densa di punti per poterla analizzare e confrontare con le nuvole dense prodotte con le altre tecniche di rilievo e in *primis* con quella elaborata dal *software Pix4D*.

Il primo passo compiuto è stato come di consueto il caricamento delle immagini nel *chunk* adibito allo svolgimento delle elaborazioni necessarie alla determinazione della nuvola densa di punti.

Il secondo invece ha previsto l'allineamento e conseguente produzione della nuvola sparsa. A questo punto è sorta una problematica inerente all'allineamento di 8

fotogrammi, quelli insistenti lungo il lato Sud della torre, rispetto all'intero set di 165 immagini.

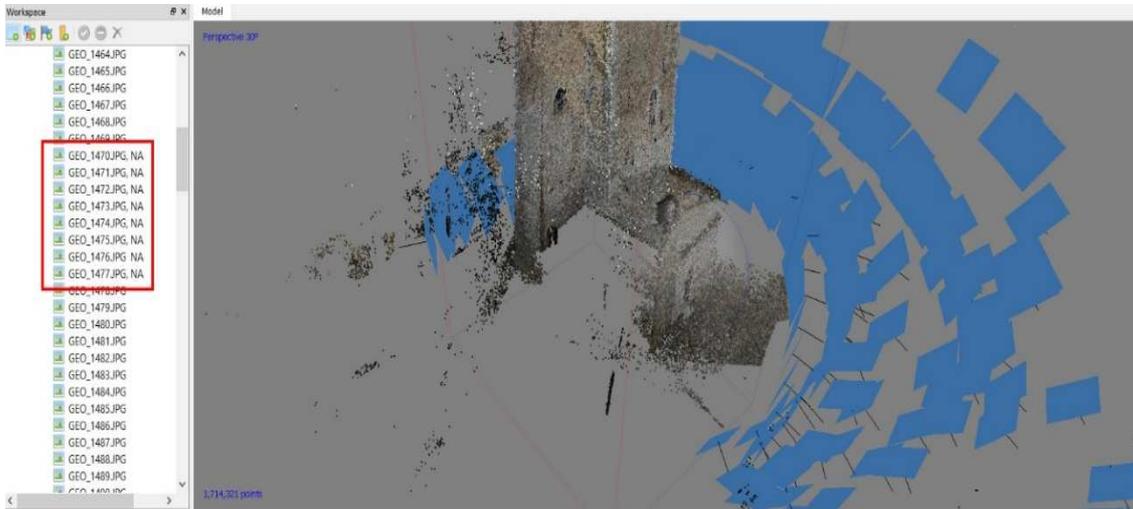


Figura 92: mancato allineamento di 8 fotogrammi identificati col riquadro rosso a sinistra nella finestra del workspace.

Dunque, il singolo lavoro è stato suddiviso in due *chunk* differenti (*chunk 1* e *chunk 2*) per cercare di processare con successo l'allineamento per ciascuno di essi e riunificarli una volta effettuata la collimazione manuale dei GCP.

Nel *chunk 1* sono stati inseriti gli 8 fotogrammi del fronte sud, mentre nel *chunk 2* i restanti 157.

Di seguito vengono riportati i passaggi effettuati dal programma, i quali sono risultati comuni ad entrambi i *chunk*:

- caricamento dei sotto - set di immagini in ciascun *chunk*;
- allineamento e successiva generazione della nuvola sparsa di punti:
 - *accuracy: high*,
 - *pair selection: disabled*;
- determinazione del sistema di coordinate *WGS 84/UTM zone 33N*;
- collimazione manuale e gestione dei GCP;
- ottimizzazione dell'allineamento delle camere, tenendo conto dei parametri f , c_x , c_y , b_1 , b_2 , k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2 , p_3 . Questa operazione ha restituito determinati valori finali di errori residui e proiezioni sui *marker* ricavati dai *quality report* prodotti a fine elaborazione e introdotti in tabelle che vengono inserite come allegati alla presente tesi.

I risultati delle procedure compiute fino ad ora, di entrambi i *chunk*, sono riassunti nella seguente tabella.

DATO	CHUNK 1 - 8 FOTOGRAMMI	CHUNK 2 - 157 FOTOGRAMMI
Hardware CPU	Intel Core i7 - 2600 - 3,40GHz	Intel Core i7 - 2600 - 3,40GHz
Hardware GPU	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti	NVIDIA GeForce GTX 560 Ti
Sistema operativo	Windows 7 Professional, 64 - bit	Windows 7 Professional, 64 - bit
Numero di immagini caricate	8	157
Numero di immagini allineate	8	157
GSD	0,00157 m/pix	0,0020 m/pix
Modello della camera	NIKON D800E	NIKON D800E
Dimensione del pixel	4,89x4,89 μ m	4,89x4,89 μ m
Risoluzione	7360x4912	7360x4912
Lunghezza focale	24 mm	Varia
Matching time	0h 02' 33''	10h 04' 00''
Alignment time	0h 00' 13''	0h 40' 55''
Collimation time	0h 05' 00'' ca.	4h 00' 00'' ca.
Optimization time	0h 00' 02''	0h 09' 48''
Tempo totale (approssimato)	0h 08'	14h 55'
Punti (sparse cloud)	87'270	1'686'786
Numero control point	6	36
Numero check point	0	10
E_{XYZ} medio [m]	0,0095	0,0200
σ_{XYZ} [m]	0,0045	0,0091
RMSE _{XY} [m]	0,0105	0,0145
RMSE _Z [m]	0,0010	0,0164
RMSE _{XYZ} [m]	0,0105	0,0219
Precisione _{XY} e Tolleranza _{XY} [m]	0,0024	0,0030
Precisione _Z e Tolleranza _Z [m]	0,0031	0,0040
Precisione scala 1:50 [m]	0,0100	0,0100
Tolleranza scala 1:50 [m]	0,0200	0,0200

Tabella 26: informazioni relative ai fotogrammi e alle elaborazioni compiute dal software Agisoft Photoscan per il chunk 1 e chunk 2 fino alla generazione delle sparse cloud georeferenziate.

Gli RMSE piano - altimetrici non rientrano né nella precisione calcolata secondo le formule consigliate dall'EuroSDR, né in quella della scala di rappresentazione. Rientrano però nelle relative tolleranze, rendendo accettabili i risultati ottenuti.

- Allineamento dei due *chunk*.
- Unione delle due nuvole sparse di punti, facenti parte dei due *chunk*, tramite il metodo basato sulla localizzazione spaziale dei *marker*.
- Ottimizzazione dell'allineamento delle camere del nuovo *chunk* generato tenendo conto dei parametri $f, c_x, c_y, b_1, b_2, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, p_3$. Questa operazione ha restituito determinati valori finali di errori residui e proiezioni sui *marker* ricavati dal *quality report* prodotto a fine elaborazione, essi sono stati introdotti in tabelle le quali vengono inserite come allegati alla presente tesi.
- Generazione della nuvola densa di punti:
 - *quality: high*,
 - *depth filtering: moderate*.

I risultati delle procedure compiute fino ad ora, di entrambi i *chunk*, sono riassunti nella seguente tabella.

DATO	CHUNK 3 - 165 FOTOGRAMMI
<i>Hardware CPU</i>	<i>Intel Core i7 - 2600 - 3,40GHz</i>
<i>Hardware GPU</i>	<i>NVIDIA GeForce GTX 560 Ti</i>
<i>Sistema operativo</i>	<i>Windows 7 Professional, 64 - bit</i>
<i>Numero di immagini caricate</i>	165
<i>Numero di immagini allineate</i>	165
<i>GSD</i>	0,0020 m/pix
<i>Modello della camera</i>	NIKON D800E
<i>Dimensione del pixel</i>	4,89x4,89 μm
<i>Risoluzione</i>	7360x4912
<i>Lunghezza focale</i>	Varia
<i>Elaborazioni precedenti chunk 1 & 2 (time)</i>	15h 03' 00''
<i>Optimization time</i>	0h 08' 43''
<i>Densification time</i>	33h 11' 00''
<i>Tempo totale (approssimato)</i>	48h 20'
<i>Punti sparse cloud</i>	1'774'056
<i>Punti dense cloud</i>	88'261'967
<i>Numero control point</i>	36
<i>Numero check point</i>	10
<i>E_{XYZ} medio [m]</i>	0,0198
<i>σ_{XYZ} [m]</i>	0,0091
<i>$RMSE_{XY}$ [m]</i>	0,0187
<i>$RMSE_z$ [m]</i>	0,0093

$RMSE_{XYZ}$ [m]	0,0218
Precisione _{XY} e Tolleranza _{XY} [m]	0,0030
Precisione _Z e Tolleranza _Z [m]	0,0040
Precisione scala 1:50 [m]	0,0100
Tolleranza scala 1:50 [m]	0,0200

Tabella 27: informazioni relative ai fotogrammi e alle elaborazioni compiute dal software Agisoft Photoscan per il chunk 3 fino alla generazione della sparse cloud georeferenziata.

Gli $RMSE$ piano - altimetrici non rientrano né nella precisione calcolata secondo le formule consigliate dall'*EuroSDR*, né in quella della scala di rappresentazione. Rientrano però nelle relative tolleranze, rendendo accettabili i risultati ottenuti.



Figura 93: a) nuvola sparsa del chunk 1, b) nuvola sparsa del chunk 2, c) nuvola sparsa del chunk unione, d) nuvola densa del chunk unione.

Qui di seguito viene esposto un diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione eseguite sui tre *chunk* realizzati.

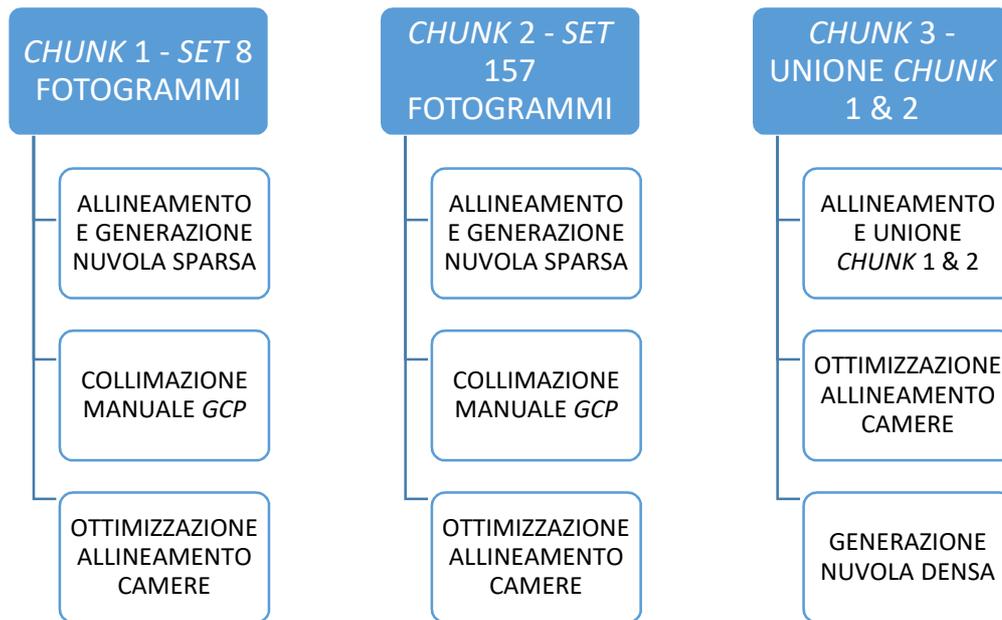


Figura 94: diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione dei tre chunk utilizzati per generare la nuvola densa di punti mediante tecnica fotogrammetrica terrestre con camera Nikon attraverso l'utilizzo del software Agisoft Photoscan.

4.3.2. Elaborazione dati con Pix4D Mapper

I dati acquisiti mediante fotogrammetria terrestre della Torre degli Smeducci ed elaborati con il programma *Pix4D* sono serviti anch'essi a generare la nuvola densa di punti per poterla analizzare e confrontare con le nuvole dense prodotte con le altre tecniche di rilievo e in *primis* con quella elaborata dal software *Agisoft Photoscan*.

I primi passi seguiti sono stati come di consueto:

- scelta della tipologia di progetto "3D models";
- caricamento dei 165 fotogrammi;
- determinazione del sistema di coordinate *WGS 84/UTM zone 33N* in *input* e *output*;
- allineamento dei fotogrammi e generazione della nuvola sparsa di punti tramite l'esecuzione del "initial processing" con le seguenti impostazioni:
 - *keypoints image scale: full*,
 - *matching image pairs: free flight or terrestrial*,
 - *targeted number of keypoints: automatic*,
 - *calibration method: standard*,
 - *rematch: automatic*.

A questo punto anche con l'utilizzo del programma *Pix4D Mapper* è sorta una problematica riguardante l'allineamento degli 8 fotogrammi insistenti lungo il lato sud della torre, rispetto all'intero set di 165 immagini.

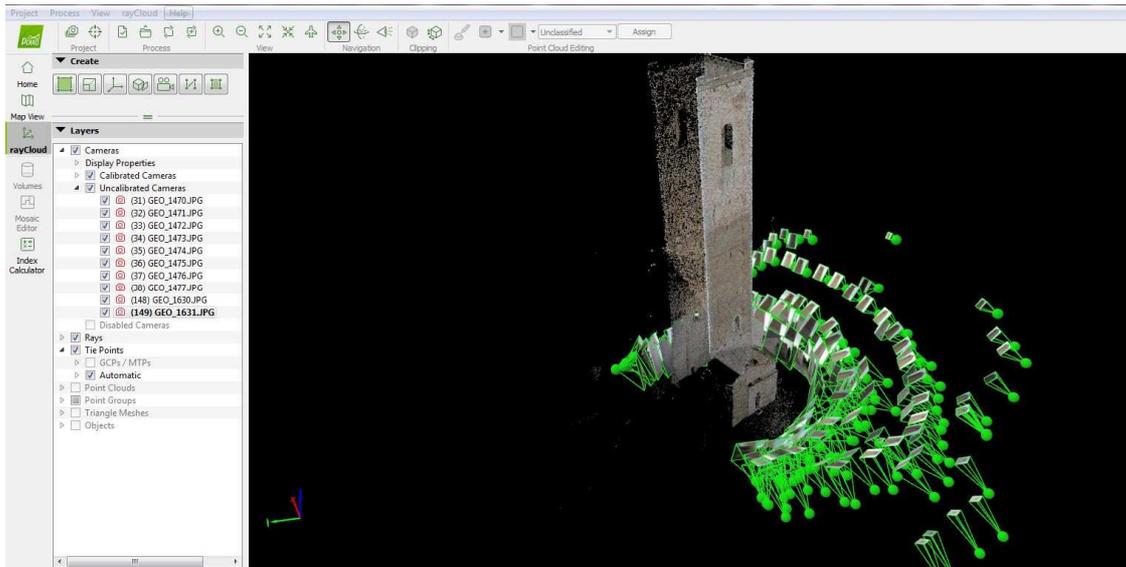


Figura 95: mancato allineamento degli 8 fotogrammi identificati come “uncalibrated cameras” nel riquadro a sinistra.

Come già detto precedentemente, il singolo progetto di lavoro è stato suddiviso in due differenti *file* per cercare di processare con successo l’allineamento per ciascuno di essi e riunificarli una volta effettuata la collimazione manuale dei *GCP*.

Nel primo progetto sono stati inseriti gli 8 fotogrammi del fronte sud, mentre nel secondo i restanti 157.

Di seguito vengono riportati i passaggi effettuati dal programma, i quali sono risultati comuni ad entrambi:

- caricamento dei due differenti set di immagini in ciascun file di progetto sempre di tipologia “3D models”;
- Determinazione del sistema di coordinate *WGS 84/UTM zone 33N* in *input* e *output*;
- allineamento dei fotogrammi e generazione della nuvola sparsa di punti tramite l’esecuzione del “*initial processing*” con le impostazioni elencate in precedenza;
- collimazione manuale già visionata nei paragrafi precedenti e gestione dei *GCP* scegliendo quali non collimare a causa della propria scarsa visibilità e quali destinare come *control points 3D*, *control points 2D* o *check points*;
- ottimizzazione e riallineamento delle camere. Questa operazione ha restituito determinati valori finali di errori residui e proiezioni sui *marker* ricavati dai *quality report* prodotti a fine elaborazione e introdotti in tabelle che vengono inserite come allegati alla presente tesi.

I risultati delle procedure compiute fino ad ora, di entrambi i *chunk*, sono riassunti nella seguente tabella.

DATO	PROGETTO 1 - 8 FOTOGRAMMI	PROGETTO 2 - 157 FOTOGRAMMI
<i>Hardware CPU</i>	<i>Intel Core i7 - 4770 3.40GHz</i>	<i>Intel Core i7 - 4770 3.40GHz</i>
<i>Hardware GPU</i>	<i>NVIDIA GeForce GTX 760</i>	<i>NVIDIA GeForce GTX 760</i>
<i>Sistema operativo</i>	<i>Windows 7 Professional, 64 - bit</i>	<i>Windows 7 Professional, 64 - bit</i>
<i>Numero di immagini caricate</i>	8	157
<i>Numero di immagini allineate</i>	8	155
<i>GSD</i>	0,0015 m/pix	0,0023 m/pix
<i>Modello della camera</i>	<i>NIKOND800E_24.0_736 0x4912</i>	<i>NIKOND800E_7360x49 12 (RGB)</i>
<i>Dimensioni del sensore</i>	35,000x23,359 mm	35,000x23,359 mm
<i>Risoluzione</i>	7360x4912	7360x4912
<i>Lunghezza focale</i>	24,0 mm	Varia
<i>Initial processing (time)</i>	0h 00' 21''	0h 32' 06''
<i>Collimation time</i>	0h 05' 00'' ca.	4h 00' 00'' ca.
<i>Tempo totale (approssimato)</i>	0h 06'	4h 32'
<i>Punti (sparse cloud)</i>	42'347	1'342'226
<i>Numero control point</i>	6	31
<i>Numero check point</i>	0	10
<i>E_{XYZ} medio [m]</i>	0,0098	0,0123
<i>σ_{XYZ} [m]</i>	0,0055	0,0053
<i>$RMSE_{XY}$ [m]</i>	0,0111	0,0104
<i>$RMSE_z$ [m]</i>	0,0024	0,0088
<i>$RMSE_{XYZ}$ [m]</i>	0,0114	0,0137
<i>Precisione_{XY} e Tolleranza_{XY} [m]</i>	0,0023	0,0035
<i>Precisione_z e Tolleranza_z [m]</i>	0,0030	0,0046
<i>Precisione scala 1:50 [m]</i>	0,0100	0,0100
<i>Tolleranza scala 1:50 [m]</i>	0,0200	0,0200

Tabella 28: informazioni relative ai fotogrammi e alle elaborazioni compiute dal software Pix4D Mapper per il progetto 1 e progetto 2 fino alla generazione delle sparse cloud georeferenziate.

Gli RMSE piano - altimetrici non rientrano né nella precisione calcolata secondo le formule consigliate dall'*EuroSDR*, né in quella della scala di rappresentazione. Rientrano però nelle relative tolleranze, rendendo accettabili i risultati ottenuti.

- Unione dei due *file* di progetto in un unico scegliendo la tipologia “*project merged from existing projects*”. All’interno del nuovo file sono stati caricati i progetti precedentemente elaborati. Il *software* ha compiuto automaticamente l’allineamento tra i due progetti basandosi sulle coordinate dei *marker* collimati in ciascuno di essi. Il prodotto finale è risultato uguale a quello ottenuto con l’utilizzo di *Photoscan*. Anche per il terzo progetto sono stati eseguiti l’ottimizzazione e il riallineamento delle camere. Questa operazione hanno restituito determinati valori finali di errori residui e proiezioni sui *marker* ricavati dai *quality report* prodotti a fine elaborazione e introdotti in tabelle che vengono inserite come allegati alla presente tesi.
- Generazione della nuvola densa (*dense point cloud*). I parametri presi in considerazione nella finestra di dialogo sono i seguenti:
 - *image scale: half image size (default)*,
 - *point density: high*,
 - *export: formato .las e unione di tutte le tiles in una singola.*

I risultati delle procedure compiute fino ad ora, di entrambi i *chunk*, sono riassunti nella tabella qui di seguito.

DATO	PROGETTO 3 - 165 FOTOGRAMMI
<i>Hardware CPU</i>	Intel Core i7 - 4770 3.40GHz
<i>Hardware GPU</i>	NVIDIA GeForce GTX 760
<i>Sistema operativo</i>	Windows 7 Professional, 64 - bit
<i>Numero di immagini caricate</i>	165
<i>Numero di immagini allineate</i>	163
<i>GSD</i>	0,0023 m/pix
<i>Modello della camera</i>	NIKOND800E_7360x4912
<i>Dimensione del pixel</i>	35,000x23,359 mm
<i>Risoluzione</i>	7360x4912
<i>Lunghezza focale</i>	Varia (vedere allegato)
<i>Elaborazioni precedenti progetti 1 & 2 (time)</i>	4h 37' 27"
<i>Densification time</i>	4h 34' 50"
<i>Tempo totale (approssimato)</i>	9h 10'
<i>Punti sparse cloud</i>	1'384'282
<i>Punti dense cloud</i>	94'024'351
<i>Numero control point</i>	34
<i>Numero check point</i>	10
<i>E_{XYZ} medio [m]</i>	0,0125

σ_{XYZ} [m]	0,0053
$RMSE_{XY}$ [m]	0,0107
$RMSE_Z$ [m]	0,0088
$RMSE_{XYZ}$ [m]	0,0139
Precisione _{XY} e Tolleranza _{XY} [m]	0,0035
Precisione _Z e Tolleranza _Z [m]	0,0046
Precisione scala 1:50 [m]	0,0100
Tolleranza scala 1:50 [m]	0,0200

Tabella 29: informazioni relative ai fotogrammi e alle elaborazioni compiute dal software Pix4D Mapper per il chunk 3 fino alla generazione della sparse cloud georeferenziata.

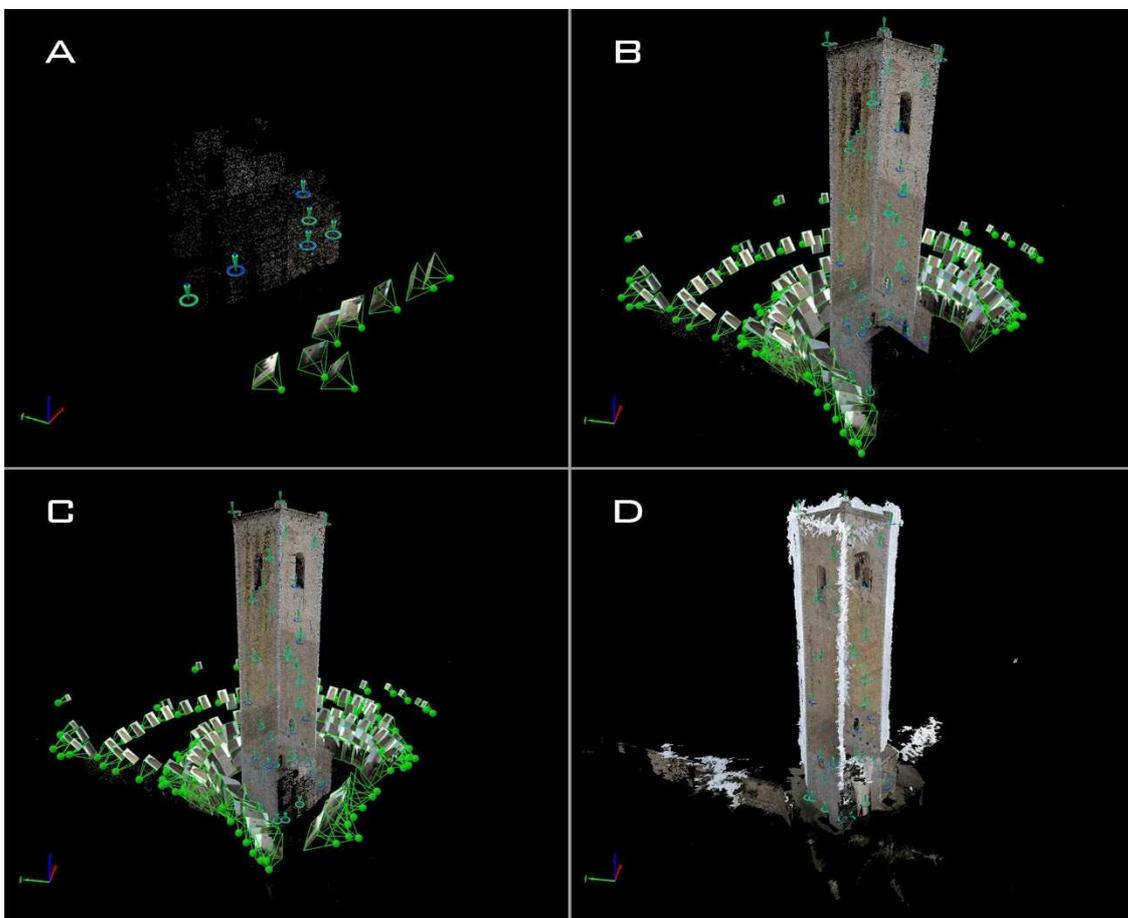


Figura 96: a) nuvola sparsa del progetto 1, b) nuvola sparsa del progetto 2, c) nuvola sparsa del progetto unione, d) nuvola densa del progetto unione.

Appresso viene esposto un diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione eseguite sui tre lavori di progetto realizzati col programma Pix4D e una tabella generale di confronto dei dati elaborati nei diversi progetti di lavoro da parte dei programmi Agisoft Photoscan e Pix4D Mapper.

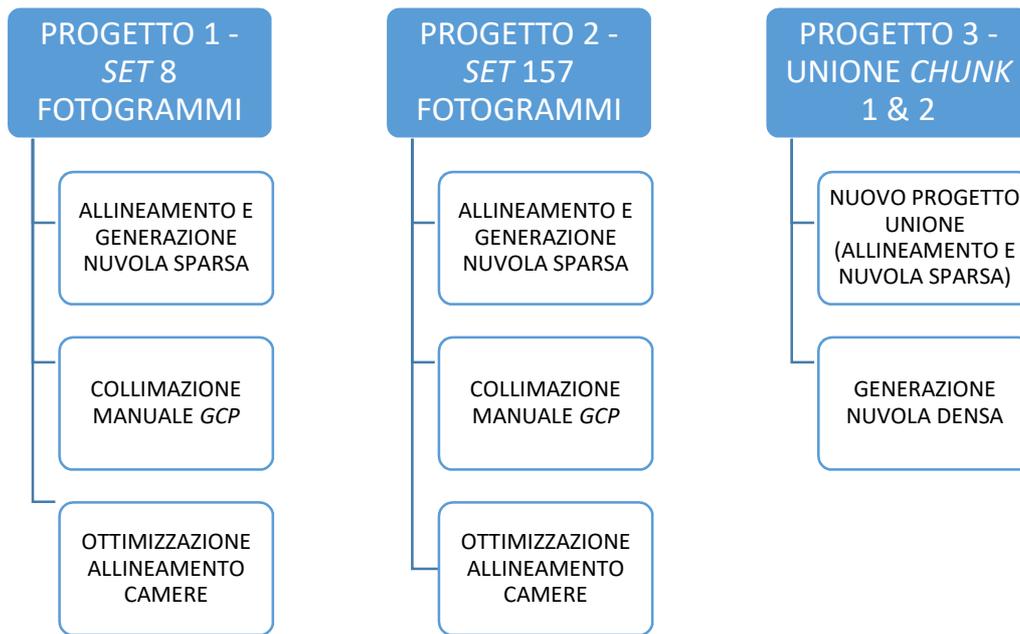


Figura 97: diagramma riassuntivo delle procedure di elaborazione dei tre file di progetto utilizzati per generare la nuvola densa di punti mediante tecnica fotogrammetrica terrestre con camera Nikon attraverso l'utilizzo del software Pix4D.

	PROGETTO 1 – SET 8 FOTOGRAMMI		PROGETTO 2 – SET 157 FOTOGRAMMI		PROGETTO 3 - UNIONE	
	Photoscan	Pix4D	Photoscan	Pix4D	Photoscan	Pix4D
NIA/NIC	8/8	8/8	157/157	155/157	165/165	163/165
GSD [m/pix]	0,00157	0,00150	0,00200	0,00230	0,00200	0,00230
Control pts	6	6	36	31	36	34
Check pts	0	0	10	10	10	10
Err [pix]	0,159	0,246	1,869	1,180	1,873	1,129
RMSE [m]	0,0105	0,0114	0,0219	0,137	0,0218	0,0139
Tempo tot.	0h 08'	0h 06'	14h 55'	4h 32'	48' 20'	9h 10'

Tabella 30: tabella riassuntiva di confronto dei dati elaborati nei diversi progetti di lavoro da parte dei programmi Agisoft Photoscan e Pix4D Mapper (NIA/NIC: numero di immagini allineate/numero di immagini caricate).

4.4. Scala architettonica: elaborazione dei dati acquisiti con *Laser Scanner*

I dati dell'area del colle Monte Nero, acquisiti tramite tecnica *laser scanner* terrestre con lo strumento *Faro CAM2*, sono stati elaborati con il software *Faro SCENE*.

Faro SCENE è stato l'unico programma utilizzato per questa tipologia di elaborazione dati in quanto l'obiettivo non è stato analizzare diversi software che affiancano la tecnica *TLS*, bensì produrre una nuvola densa di punti da analizzare e confrontare con quelle estratte dalla tecnica fotogrammetrica.

4.4.1. Elaborazione dati con *Faro SCENE*

Il software *Faro SCENE*, o più comunemente chiamato solo *SCENE*, è un programma ideato in specifico dalla casa madre *Faro* come strumento di interoperabilità tra i propri differenti settori applicativi. Esso si occupa dell'elaborazione e gestione dei dati scansionati in modo semplice e intuitivo utilizzando il riconoscimento dei *target*, la registrazione delle scansioni, la colorazione e il posizionamento spaziale delle singole parti o dell'elaborato finale. Le azioni sopra citate permettono la restituzione di nuvole dense di punti dell'oggetto rilevato georeferite, la misurazione di parti di esse, la navigazione 3D, la generazione di *mesh*, ecc.

Nel caso in questione è stata esportata la singola nuvola di punti georeferenziata e colorata, registrata a partire dalle scansioni acquisite in loco.



Figura 98: localizzazione delle scansioni acquisite in loco. In blu quelle rilevate dalla stazione del DAD, in rosso quelle rilevate dalla stazione del DIATI.

4.4.2. Caricamento delle scansioni

Il caricamento delle scansioni può essere effettuato in due differenti modi, l'uno di pari grado rispetto all'altro: o mediante drag and drop di tutte quelle che si vogliono inserire nel lavoro, dalla cartella dove sono salvate alla schermata principale del programma, o tramite l'utilizzo dell'apposito comando che si trova nella barra di stato. Appariranno

dunque tutte quante in una sottocartella del box principale chiamato “workspace”¹⁴⁶, ciascuna sotto forma di “cloud”.

Questa procedura consiste però nell’importazione primaria dei dati acquisiti in ciascuna scansione; per terminare il caricamento bisogna far apparire dei quadrati verdi affianco a ciascuna di esse. Il procedimento per attuare ciò è duplice anche in questo caso, si può aprire da *workspace* la vista “corrispondenza” che comprende tutte le scansioni importate, oppure aprire la vista “piana” riferita a una singola scansione.

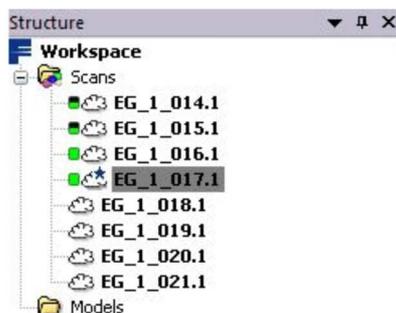


Figura 99: esempio di caricamento in corso di scansioni.

Terminato il caricamento delle scansioni, una di esse viene contrassegnata da una stella blu, questo significa che quella scansione servirà da riferimento per tutte le altre ogni qualvolta si debbano effettuare dei procedimenti di referenziazione o registrazione.

4.4.3. Collimazione dei *marker*

Il procedimento è stato portato avanti eseguendo una collimazione manuale dei *marker* rilevati durante la campagna di acquisizione.

Per effettuare ciò è stato necessario aprire la vista piana di ciascuna scansione, la quale permette di prendere in esame la visuale di acquisizione del *laser scanner* durante la fase di rilievo dati; apparirà perciò nella schermata principale un’immagine panoramica sviluppata in orizzontale per ogni vista selezionata.

Innanzitutto bisogna specificare che le scansioni acquisite e successivamente caricate in *SCENE* sono di tipologia terrestre e quindi per la conformazione dello strumento utilizzato, le parti della Torre degli Smeducci rilevate in maniera più accurata sono quelle interessanti la parte inferiore. Infatti nella vista piana le parti superiori non appaiono nell’immagine caricata dal *software*, non consentendo all’operatore la collimazione dei punti che si trovano in quelle zone.

¹⁴⁶ Il workspace è una finestra che si trova di default alla sinistra della schermata principale del programma *SCENE*. Permette la gestione delle impostazioni relative alle scansioni e ai *target (marker)* caricati al proprio interno, l’impostazione delle elaborazioni da effettuare e infine la scelta delle diverse tipologie di vista da intraprendere.

Inoltre per garantire una corretta registrazione delle scansioni, in ciascuna di esse devono essere presenti almeno tre punti collimati.

Nonostante questi impedimenti pratici dovuti dalla circostanza, l'elevato numero di *target* affissi alle pareti della Torre e ad altri manufatti presenti nelle vicinanze (come per esempio panchine, staccionate, il muraglione, ecc.), ha permesso di non dover collimare anche i punti naturali di coordinate note.

Questa peculiarità ha portato ad un affinamento del risultato finale dell'errore di georeferenziazione del dato esportato, in quanto la collimazione dei soli *target* prestabiliti è risultata essere nettamente migliore rispetto a quella comprendente i punti naturali.

La collimazione dei punti nella vista piana di ogni singola scansione è avvenuta manualmente con l'inserimento di punti caratterizzati da una propria posizione e un proprio nome identificativo progressivo con l'avanzare della collocazione.

La collimazione automatica, che si basa su un metodo di individuazione automatica dei *target* a scacchiera, analizzando il contenuto radiometrico dell'immagine della vista piana, è stata scartata a priori per due motivi. Il primo riguarda la necessità di comparare questa elaborazione con quelle della tecnica fotogrammetrica che in tal caso erano state eseguite mediante collimazioni manuali. Il secondo, nel caso in questione, riguarda l'inadeguatezza della collimazione automatica a causa delle imperfette caratteristiche geometriche e radiometriche della maggior parte dei *target* presenti nelle immagini panoramiche di ciascuna scansione, derivanti da un'eccessiva distanza dalla Torre di alcune di esse.

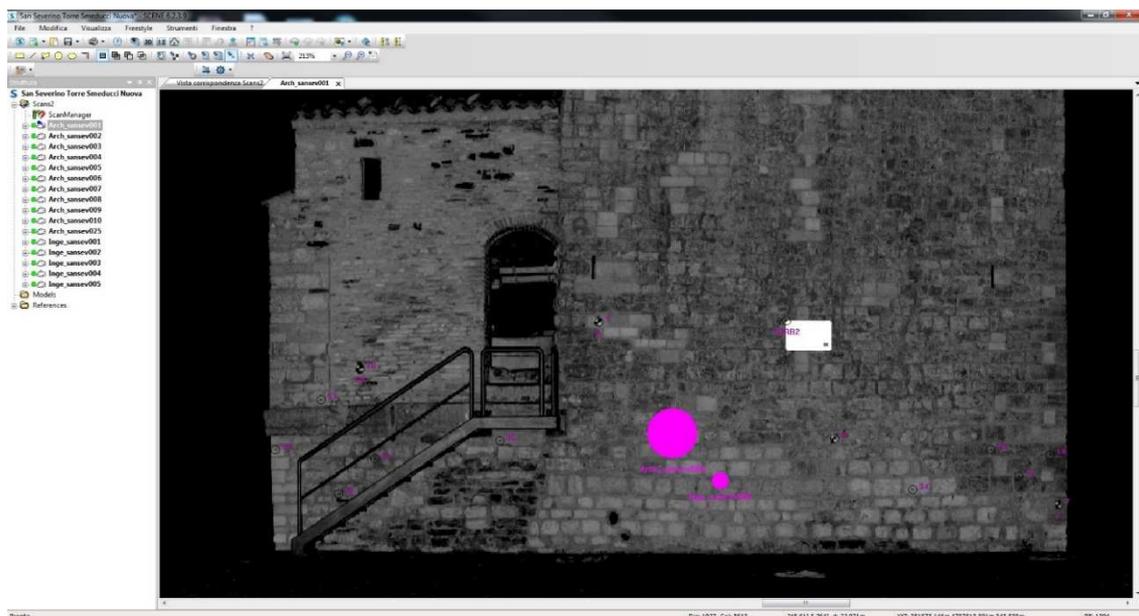


Figura 100: vista piana della scansione "Arch_sansev001": collimazione del marker 10.

Ogni punto viene identificato sull'immagine panoramica della vista piana della scansione esaminata ed ha una precisione di un lato di *pixel*. Infatti collimazioni *sub - pixel* non possono essere compiute.

Successivamente, a ciascun punto collimato, è stato cambiato il nome progressivo con quello del *marker* rappresentante per poterne ricostruire una corrispondenza biunivoca.

4.4.4. Inserimento delle coordinate dei *marker*

Altra tipologia di dati da dover importare, per georeferenziare le scansioni caricate e unificarle sotto un unico modello generante una nuvola densa di punti, sono i *marker* rilevati durante la campagna di acquisizione.

Infatti il posizionamento dei punti precedentemente collimati viene registrato rispetto ad un sistema di coordinate interno allo *scanner* con origine $x = 0, y = 0, z = 0$. Solo in seguito alla registrazione e collocazione delle scansioni, o gruppi di esse, relazionate ad un sistema di riferimento è possibile ottenere la relativa georeferenziazione.

Due sono le strade che si possono seguire per creare un *database* interno, relativo alle coordinate dei *marker*. La prima è quella manuale, la seconda è quella che si attua caricando un *file .csv*¹⁴⁷ contenente le informazioni necessarie.

I dati ai nomi e ai valori delle coordinate dei *marker* contenuti nel *file .csv* vengono inseriti in una nuova sotto - cartella, chiamata "*references*", nel *workspace*, dello stesso livello gerarchico di quella contenente tutte le scansioni.

Il passo seguente è stato quello di collocare le scansioni, ovvero di disporle ordinatamente nello spazio in maniera tale da ricomporre la nuvola densa di punti dell'oggetto rilevato.

4.4.5. Registrazione delle scansioni

La registrazione delle scansioni può essere eseguita mediante collocazione in tre modi differenti¹⁴⁸: da nuvola a nuvola, basandosi sul posizionamento spaziale dei *target* oppure basandosi sulla vista dall'alto.

In questo lavoro sono state intraprese la prima e la seconda metodologia per constatare quale delle due potesse restituire il risultato migliore.

¹⁴⁷ Il formato *.csv* è una delle possibili estensioni di salvataggio dei file excel. Il programma SCENE accetta solo documenti appartenenti a questa tipologia di formato, perciò è stato necessario convertire il file *.txt* a propria disposizione per garantire la leggibilità delle coordinate.

¹⁴⁸ Faro SCENE, *SCENE 5.1 - User manual*, 2012.

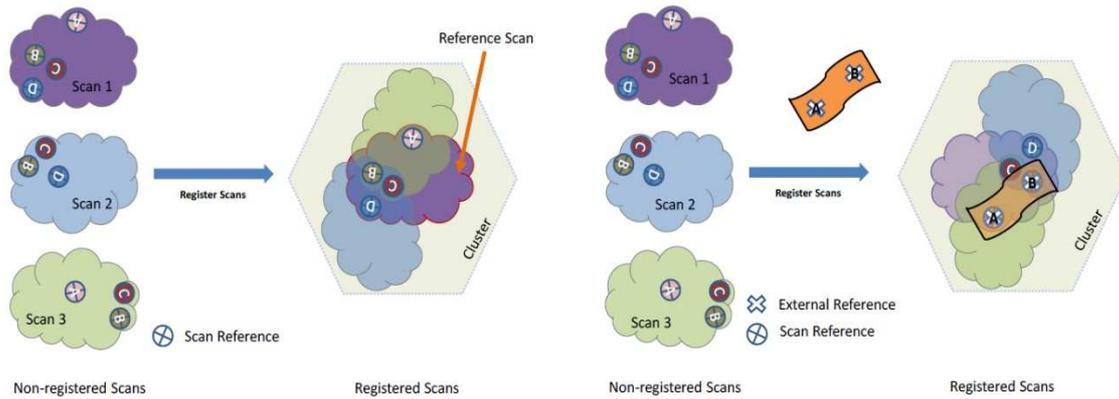


Figura 101: a sinistra lo schema di posizionamento delle scansioni mediante una registrazione effettuata senza l'utilizzo delle coordinate dei marker collimati, a destra l'esatto opposto.

4.4.5.1. Collocazione da nuvola a nuvola

Per la registrazione dell'intero set di scansioni con la metodologia di collocazione "da nuvola a nuvola", è stata creata una nuova cartella di pari livello gerarchico di quella dei *references*, all'interno della quale è stata inserita la cartella contenente tutte le scansioni del *file* di progetto inerenti al rilievo del caso studio.

Successivamente è stata effettuata la collocazione attraverso il comando "operazioni: registrazione: colloca scansioni" scegliendo come opzione quella "da nuvola a nuvola" senza modificare alcun *standard* di elaborazione.

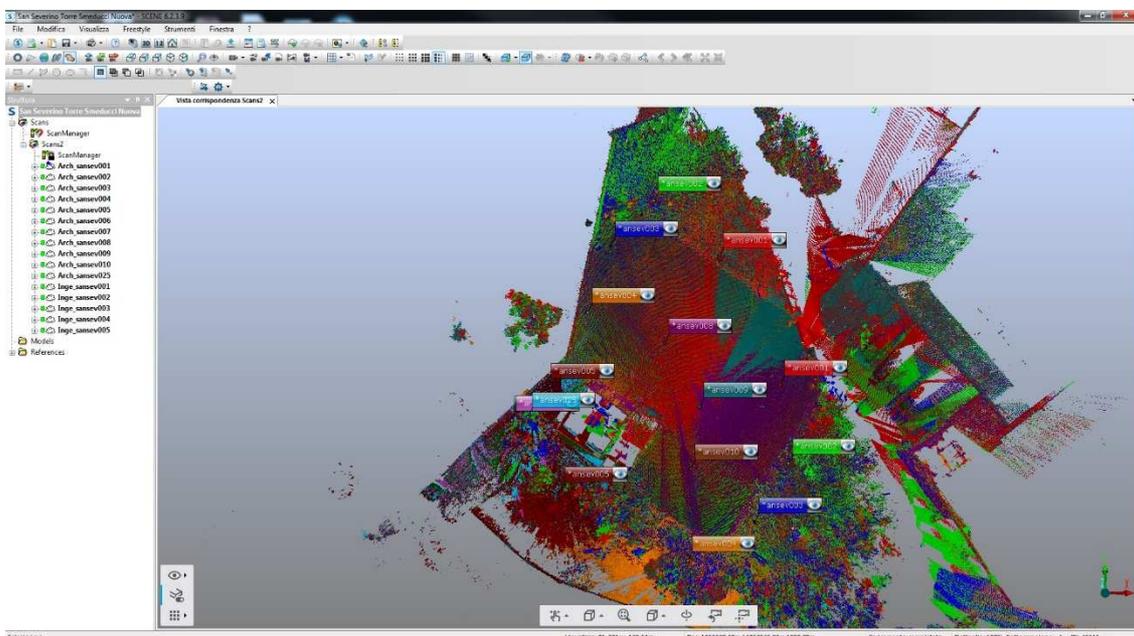


Figura 102: vista corrispondenza delle scansioni collocate con la modalità "da nuvola a nuvola".

Attraverso lo scan manager¹⁴⁹ è stata presa visione delle tensioni dei punti di scansione che intercorrono tra coppie di scansioni.

In questa fase i *target* non sono ancora stati utilizzati come riferimento spaziale, infatti gli errori ricavati sono da intendersi riferiti al sistema interno strumentale.

Gruppo/Scansi...	Gruppo/Scansi...	Medio [mm]	< 4 mm [%]	Sovrapposizi...	Punti utilizzati	Dettagli
Arch_sansev...	Arch_sansev003	28.512	15.2	61.2	29774	[Info]
Arch_sansev...	Arch_sansev004	13.006	9.4	41.3	16347	[Info]
Arch_sansev...	Arch_sansev003	11.881	11.5	54.3	21402	[Info]
Inge_sansev...	Inge_sansev004	11.626	18.8	28.2	12345	[Info]
Arch_sansev...	Arch_sansev001	10.525	21.4	80.4	39496	[Info]
Arch_sansev...	Arch_sansev002	9.28	23.4	85.3	39492	[Info]

Statistiche complessive

Medio: 6.5072 [mm]

< 4 mm: 39.9 [%]

Figura 103: visualizzazione delle tensioni dei punti di scansione nello scan manager della cartella contenente tutte le scansioni collocate con la metodologia da nuvola a nuvola.

Il livello di qualità della registrazione ottenuta è risultato essere discreto sia per la scansione “Arch_sansev003” sia per quella “Arch_sansev009” (così come indicato anche dal semaforo giallo¹⁵⁰ accanto a ciascuna di esse). Per cercare di migliorare il livello di qualità sono stati effettuati altre tre cicli di registrazione delle scansioni con metodologia di collocazione “da nuvola a nuvola” senza però ottenere miglioramenti.

Infine per georeferenziare il modello ottenuto, è stata effettuata una collocazione basata sui target. Ciò è stato compiuto solo dopo aver bloccato il posizionamento spaziale raggiunto da ciascuna scansione dopo la collocazione da nuvola a nuvola.

¹⁴⁹ Lo *scan manager* aiuta l’operatore a mantenere una chiara panoramica delle scansioni già registrate andandone a evidenziare gli aspetti qualitativi. Di fatto visualizza lo stato corrente della registrazione e indica i risultati del posizionamento. Viene creato automaticamente all’interno di ciascuna cartella di scansione o di un gruppo di esse dopo ogni collocazione.

¹⁵⁰ Il semaforo è uno strumento utile per la valutare la qualità della registrazione effettuata. Il colore giallo consiglia l’affinamento delle tecniche utilizzate).

Anche in questo caso è stato generato automaticamente uno *scan manager* contenente le informazioni sugli errori derivanti dalla georeferenziazione ultimata. Qui di seguito viene esposto un estratto della tabella estrapolata dal programma comprendente i più alti valori delle tensioni dei *target* tenuti in considerazione.

Target	Elemento 1	Elemento 2	Errore [mm]
51	Arch_sansev010	References	29,45
52	Inge_sansev004	References	24,27
52	Inge_sansev003	References	24,03
53	Inge_sansev003	References	23,91
51	Inge_sansev004	References	23,63
54	Inge_sansev003	References	22,26
52	Arch_sansev010	References	20,66
4	Arch_sansev001	References	20,62
36	Inge_sansev004	References	20,39
53	Arch_sansev010	References	20,39

Tabella 31: estratto della tabella estrapolata dal programma contenente le maggiori tensioni di ogni punto collimato rispetto alle coordinate inserite: *references*.

La media tra tutti gli errori di posizionamento di ciascun *target* collimato in ognuna scansione è di 15,48 mm con una deviazione *standard* di 5,29 mm.

4.4.5.2. Collocazione basata sul target

Per la registrazione dell'intero *set* di scansioni con la metodologia di collocazione basata sul target, dopo aver avviato il comando e aver atteso il completarsi dell'elaborazione, attraverso lo *scan manager* è stata presa visione:

- dei risultati delle scansioni, ovvero degli errori medi generali di ogni singola scansione;
- delle tensioni dei *target* che intercorrono tra coppie di scansioni o tra singole scansioni e i *references*.

Scansione	Errore [mm]	Scansione	Errore [mm]
Arch_sansev003	7,89	Arch_sansev008	5,83
Inge_sansev001	7,28	Arch_sansev007	5,76
Arch_sansev002	7,21	Arch_sansev009	5,67
Arch_sansev001	7,12	Arch_sansev005	5,28
Arch_sansev025	6,95	Inge_sansev003	4,56
Arch_sansev006	6,46	Inge_sansev004	4,42
Arch_sansev004	6,28	Arch_sansev010	4,12
Inge_sansev005	5,88	Inge_sansev002	2,28

Tabella 32: risultati delle scansioni.

Target	Elemento 1	Elemento 2	Errore [mm]
6	Arch_sansev003	References	14,53
14	Arch_sansev025	References	11,86
6	Arch_sansev002	References	11,28
9	Arch_sansev001	Arch_sansev004	11,18
51	Arch_sansev010	Arch_sansev003	11,00
12	Arch_sansev001	Arch_sansev001	10,86
7	Arch_sansev004	References	10,75
13	Arch_sansev008	References	10,23
12	Arch_sansev001	References	10,10
10	Arch_sansev008	Inge_sansev001	10,07
6	Arch_sansev002	Arch_sansev003	10,06
7	Arch_sansev001	Arch_sansev004	9,96
14	Arch_sansev005	Arch_sansev025	9,83
2	Arch_sansev003	References	9,64
14	Arch_sansev007	References	9,23

Tabella 33: estratto della tabella estrapolata dal programma contenente le maggiori tensioni dei target che intercorrono tra coppie di scansioni o tra singole scansioni e i references.

La media tra tutti gli errori di posizionamento di ciascun *target* collimato in ognuna scansione è di 5,70 mm con una deviazione *standard* di 2,76 mm. In seguito è stato calcolato anche l'*RMSE* pari a 6,40 mm per poterlo confrontare con quelli ottenuti dalle elaborazioni fotogrammetriche. Il colore del semaforo dello *scan manager* generale in questo caso è risultato essere verde. Dunque, tra le due nuvole di punti ottenute con i differenti metodi di collocazione menzionati, è stata scelta quella realizzata col metodo di collocazione basato sul *target*.

La nuvola di punti risultato dell'unione di tutte le scansioni caricate è stata successivamente colorata mediante il comando "operazioni: colore/immagini: applica immagini".

4.5. Considerazioni qualitative dell'elaborazione dei dati della Torre degli Smeducci

L'elaborazione dei dati della torre degli Smeducci con differenti tecniche di rilievo, fotogrammetrica e *laser scanner*, e differenti *software* commerciali, *Agisoft Photoscan*, *Pix4D Mapper* e *Faro SCENE*, ha portato a generare una serie di considerazioni relative alla praticità operativa, agli algoritmi utilizzati e ai dati ottenuti.

La prima considerazione va effettuata su un confronto delle precisioni ottenute in base a quelle attese.

Tecnica	Fotogrammetrica da UAV		Fotogrammetrica terrestre		TLS
<i>Software</i>	<i>Photoscan</i>	<i>Pix4D</i>	<i>Photoscan</i>	<i>Pix4D</i>	<i>SCENE</i>
<i>RMSE [m]</i>	0,0172	0,0150	0,0218	0,0139	0,0064

Tabella 34: riepilogo dei RMSE delle differenti tecniche di rilievo effettuate per la Torre degli Smeducci.

Come ci si poteva aspettare, si può asserire che la tecnica *TLS* raggiunge una precisione superiore a quella fotogrammetrica. Infatti l'*RMSE* ottenuto col rilievo *laser scanner* è inferiore di circa il 60% rispetto a quelli intrapresi con le due tecniche fotogrammetriche. E' stata inoltre appurata una migliore qualità del dato estratto dalle elaborazioni eseguite col *software Pix4D* rispetto a quelle con *Photoscan*.

Per quanto riguarda invece le differenze tra fotogrammetria aerea e quella terrestre, a parità di *marker* collimati, ci si aspettava per la seconda una maggiore precisione, soprattutto a causa della migliore qualità dei fotogrammi acquisiti. Questa è stata rispettata solo per le elaborazioni compiute con il *software Pix4D* notando una diminuzione dell'*RMSE* di circa il 7%. Invece per le elaborazioni eseguite con *Photoscan* è stato riscontrato un aumento percentuale dell'*RMSE* del 21%. Evidentemente le impostazioni di settaggio e gli algoritmi utilizzati da *Photoscan* non permettono di gestire nel migliore dei modi tipologie di fotogrammi con importanti distorsioni.

E' da tenere anche in considerazione che i dati estratti dall'elaborazione delle scansioni rilevate con tecnica *TLS*, sono stati ottenuti collimando solo i *target* della parte inferiore della Torre degli Smeducci per impossibilità di visualizzazione di quella superiore.

L'ultima considerazione è inerente alle caratteristiche di elaborazione dei *software* e viene esposta sotto forma di matrice di qualità.

Tecnica di rilievo	Fotogrammetrica		Laser scanner
<i>Software</i>	<i>Agisoft Photoscan</i>	<i>Pix4D</i>	<i>Faro SCENE</i>
<i>Economicità</i>	+++	++++	+
<i>Interfaccia utente</i>	++++	+++	+++
<i>Gestione dei lavori</i>	++++	+++	+++
<i>Gestione dei fotogrammi/scansioni</i>	++++	+++	++++
<i>Gestione dell'elaborazione</i>	++++	+++	++++
<i>Rapidità di elaborazione</i>	+++	++++	+++++
<i>Georeferenziazione</i>	+++	++++	+++++
<i>Creazione nuvole di punti</i>	+++	++++	+++++

Tabella 35: matrice di qualità dei programmi utilizzati. La scala di valutazione va da un valore minimo "+" assunto come scarsa qualità, ad un massimo di "+++++" assunto come massima qualità.

4.6. Esportazione dei dati

La necessità di disporre delle elaborazioni effettuate ha fatto sì che i dati ottenuti siano stati esportati dai database di partenza.

Col *software Agisoft Photoscan* sono state compiute le seguenti tipologie di esportazioni:

- per l'elaborazione dei dati rilevati con fotogrammetria da UAV del colle Monte nero:
 1. nuvola densa di punti (volo *eBee*),
 2. nuvola densa di punti (volo *eBee* + *Phantom4*),
 3. DSM (volo *eBee* + *Phantom4*),
 4. Ortofoto (volo *eBee* + *Phantom4*);
- per l'elaborazione dei dati rilevati con fotogrammetria UAV della Torre degli Smeducci:
 1. nuvola densa di punti (volo *Phantom4*),
 2. Ortofoto del fronte sud della Torre (volo *Phantom4* per confronto),
 3. Ortofoto dei 4 fronti della Torre (volo *Phantom4* + 10 fotogrammi terrestri);
- per l'elaborazione dei dati rilevati con fotogrammetria terrestre della Torre degli Smeducci:
 1. nuvola densa di punti (camera Nikon D800E).

L'esportazione delle nuvole dense può avvenire attraverso il comando "*export: export points*" scegliendo come formato del dato di output quello *.las*.



Figura 104: finestra di dialogo per l'esportazione della nuvola densa di punti.

L'esportazione del *DSM* e dell'Ortofoto può avvenire invece attraverso i rispettivi comandi "*export: export DEM*" ed "*export: export orthomosaic*". Il settaggio delle impostazioni di esportazione prevede la determinazione della tipologia di formato del dato di *output*, la dimensione del *pixel* e le eventuali definizioni dei confini e divisioni in blocchi.

Col software *Pix4D* sono state compiute le seguenti tipologie di esportazioni:

- per l'elaborazione dei dati rilevati con fotogrammetria da *UAV* del colle Monte nero:
 1. nuvola densa di punti (volo *eBee*),
 2. nuvola densa di punti (volo *eBee* + *Phantom4*),
 3. *DSM* (volo *eBee* + *Phantom4*),
 4. Ortofoto (volo *eBee* + *Phantom4*);
- per l'elaborazione dei dati rilevati con fotogrammetria da *UAV* della Torre degli Smeducci:
 1. nuvola densa di punti (volo *Phantom4*);
- per l'elaborazione dei dati rilevati con fotogrammetria terrestre della Torre degli Smeducci:
 1. nuvola densa di punti (camera *Nikon D800E*).

Tutte le esportazioni non sono necessarie in quanto il *software* destina automaticamente tutti i dati di *output* in cartelle di salvataggio del *computer*.

Col *software Vistual SFM* sono state compiute le seguenti tipologie di esportazioni:

- per l'elaborazione dei dati rilevati con fotogrammetria aerea del colle Monte Nero:
 1. nuvola densa di punti (volo *eBee*).

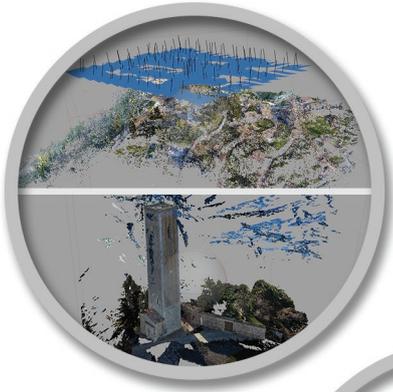
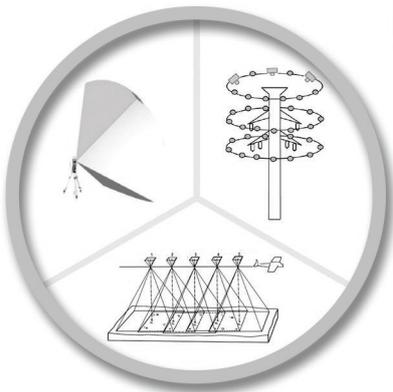
Anche in questo caso non è necessario esportare alcun dato in quanto il *software* destina automaticamente tutti i dati di *output* in cartelle di salvataggio *del computer*.

Col *software Faro SCENE* sono state compiute le seguenti tipologie di esportazioni:

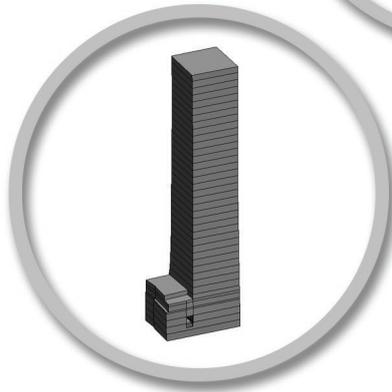
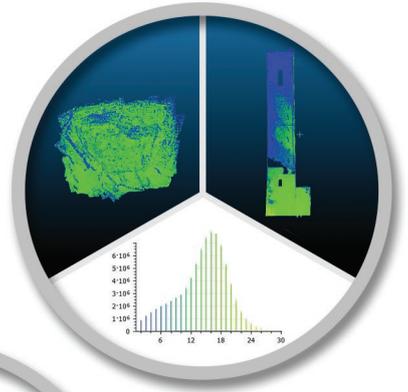
- per l'elaborazione dei dati rilevati con tecnica *laser scanner* terrestre della Torre degli Smeducci:
 1. nuvola densa di punti (scansioni *Faro CAM2*).

L'esportazione della nuvola densa di punti è stata effettuata attraverso il comando "esporta punti di scansione". Le scansioni possono essere esportate separatamente o unite. E' stato scelto dunque l'utilizzo di un'unica nuvola scegliendo il formato di *output* ".E57"¹⁵¹, in quanto risulta essere il più leggero e l'unico a possedere la giusta interoperabilità da parte dei programmi di analisi dei dati utilizzati in seguito.

¹⁵¹ Il formato ".E57" è un formato *standard* non proprietario per la memorizzazione delle nuvole di punti ed è una combinazione di dati binari e *XML*.



CAPITOLO 5 ANALISI DEI DATI



Le nuvole dense di punti, estratte dai file di progetto dei *software* di elaborazione dati fotogrammetrici o *laser scanner*, sono servite per compiere un'approfondita analisi riguardante principalmente la loro qualità e precisione.

Prima di effettuare le analisi sulle differenti tipologie di nuvole dense a propria disposizione è stato necessario pulirle e prepararle per eliminare rumori di fondo ed elementi limitrofi agli oggetti del rilievo, ininfluenti agli studi.

La preparazione delle nuvole dense è stata effettuata solo su quelle riguardanti il rilievo della Torre degli Smeducci, poiché non serviva alcun tipo di pulizia a quelle inerenti il rilievo del colle Monte Nero.

5.1. Pulizia delle nuvole di punti

Per eseguire la pulizia delle nuvole di punti della Torre degli Smeducci è stato preso in considerazione l'utilizzo del *software 3DReshaper*, che ha permesso la rimozione della parti superflue e la loro suddivisione nei quattro prospetti costituenti il monumento.

3DReshaper è un programma di facile utilizzo dedicato a svariate tipologie di elaborazione delle nuvole di punti derivanti da differenti tecniche di rilievo 3D.

La motivazione principale per cui è stato preso in considerazione in questa fase è la sua capacità di processare più nuvole contemporaneamente e di importare in un singolo lavoro di progetto molteplici formati di nuvole di punti.

Per semplicità, i formati dei *file* in *input* e *output* di *3DReshaper* sono stati settati come *“.las”* tranne quello di *input* derivante dal *software Faro SCENE* di tipo *“.E57”*.

Come primo passo per ciascuna nuvola densa è stato generato un differente file di progetto.

In ciascuno di essi, per effettuare la pulizia, sono stati compiuti sempre i medesimi passaggi:

- selezione della nuvola densa di punti;
- avvio del comando “nuvola: pulisci o scomponi nuvola”;
- selezione dei punti della nuvola densa da cancellare;
- avvio del comando “cancella i punti all'interno”.

In seguito per eseguire la divisione di ciascuna nuvola densa pulita, nei quattro fronti che la compongono, è stata definita la seguente procedura:

- creazione di un nuovo file di progetto e conseguente caricamento della nuvola densa per quattro volte consecutive;
- per ciascuna copia di nuvola caricata, è stato scelto il fronte da mantenere con conseguente eliminazione dei punti facenti parte degli altri tre.

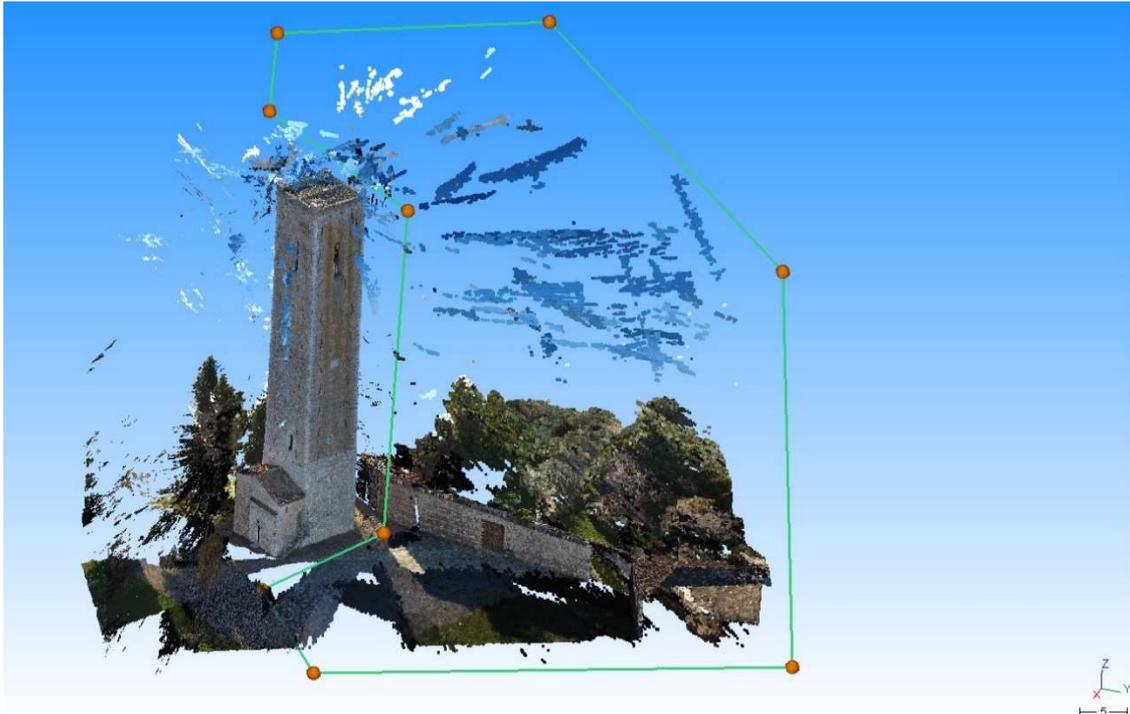


Figura 105: selezione con lazo poligonale dei punti della nuvola densa da eliminare.

5.2. Analisi della densità

Lo studio della qualità delle nuvole di punti, estratte dalle elaborazioni dei dati acquisiti con le differenti tecniche di rilievo utilizzate, è stato effettuato mediante analisi della loro densità.

Per definizione la densità esprime la concentrazione più o meno avanzata di una determinata tipologia di popolazione. Nel caso in questione la popolazione è rappresentata dai punti e il relativo incremento o diminuzione descrive una più o meno elevata capacità della nuvola di rappresentare al meglio la realtà dell'oggetto rilevato.

Il programma utilizzato per svolgere tale tipologia di analisi è stato *CloudCompare*.

CloudCompare è un programma che svolge differenti tipologie di analisi e interrogazioni su nuvole di punti, *mesh*, Ortofoto, modelli altimetrici del terreno, ecc.

Ciascuna nuvola da analizzare è stata preventivamente caricata con il metodo del *drag and drop* o tramite barra del menù nello spazio di lavoro del programma chiamato in questo caso "*DB Tree*".

Successivamente si è selezionato il comando "*density*" per poter avviare il processo di elaborazione della densità delle nuvole di punti.

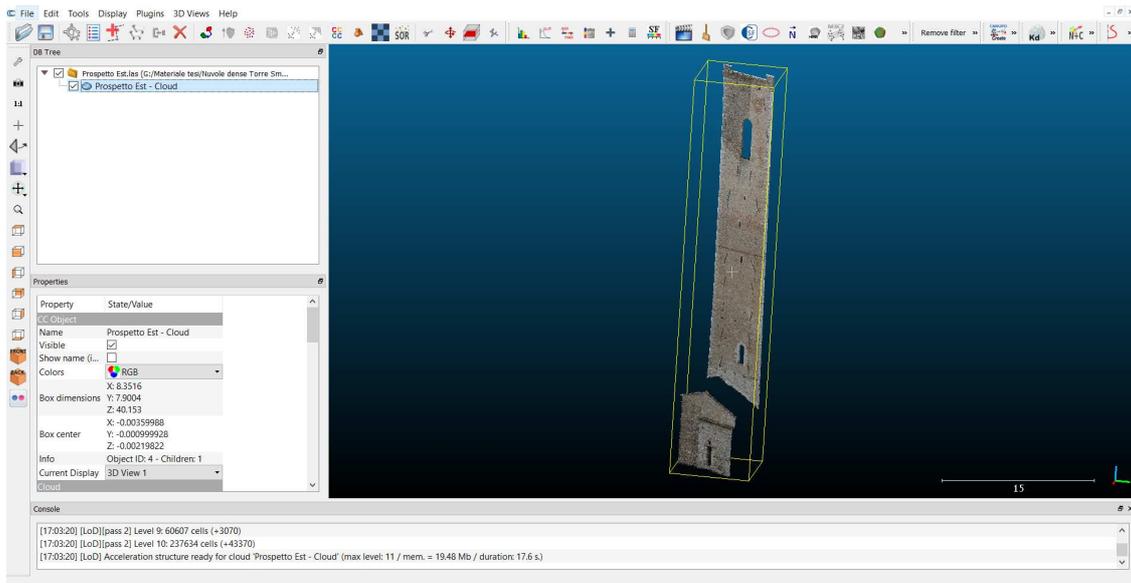


Figura 106: schermata tipo del software Cloud Compare.

Successivamente una finestra di dialogo consente la scelta di differenti metodi e *output* di calcolo, inerenti alla densità delle nuvole di punti, messe a disposizione dal *software*.

I metodi di calcolo possono essere:

- *“precise”*: dove la densità è stimata contando per ogni punto il numero di vicini *“N”* all'interno di una sfera di raggio *“R”* da impostare anticipatamente;
- *“approximate”*: dove la densità viene semplicemente ottenuta determinando la distanza dal prossimo vicino (generalmente molto più veloce). Tale distanza è considerata equivalente al raggio sferico *“R”* di cui sopra e il numero di vicini *“N”* pari a 1.

Gli output di calcolo invece consistono in:

- *“number of neighbors”*: ovvero il già sopracitato numero di vicini all'interno di una sfera di raggio *“R”* da impostare anticipatamente, disponibile solo in modalità *“precise”*:

$$Density = N \quad [5.1]$$

- *“surface density”*: ovvero il numero di vicini normalizzato rispetto alla superficie limitrofa dipendente dal valore del raggio impostato:

$$Density = N / (\pi R^2) \quad [5.2]$$

- *“volume density”*: ovvero il numero dei vicini normalizzato rispetto al volume limitrofo dipendente dal valore del raggio impostato:

$$Density = N / (4/3\pi R^3) \quad [5.3]$$

5.2.1. Analisi della densità delle nuvole di punti del colle Monte Nero

La densità della Torre degli Smeducci è stata computata tenendo conto delle nuvole dense di punti ottenute dalle seguenti elaborazioni:

1. fotogrammetria da UAV SenseFly eBee - Agisoft Photoscan;
2. fotogrammetria da UAV SenseFly eBee + Dji Phantom4 - Agisoft Photoscan;
3. fotogrammetria da UAV SenseFly eBee - Pix4D;
4. fotogrammetria da UAV SenseFly eBee + Dji Phantom4 - Pix4D;
5. fotogrammetria da UAV SenseFly eBee - Visual SFM.

Il metodo di calcolo utilizzato è stato quello "precise" con un raggio di valore pari a 0,20 m, ovvero il valore della tolleranza della scala di progetto 1:500 attraverso la quale è stato impostato il rilievo, mentre gli *output* consistono nella determinazione del "number of neighbors".

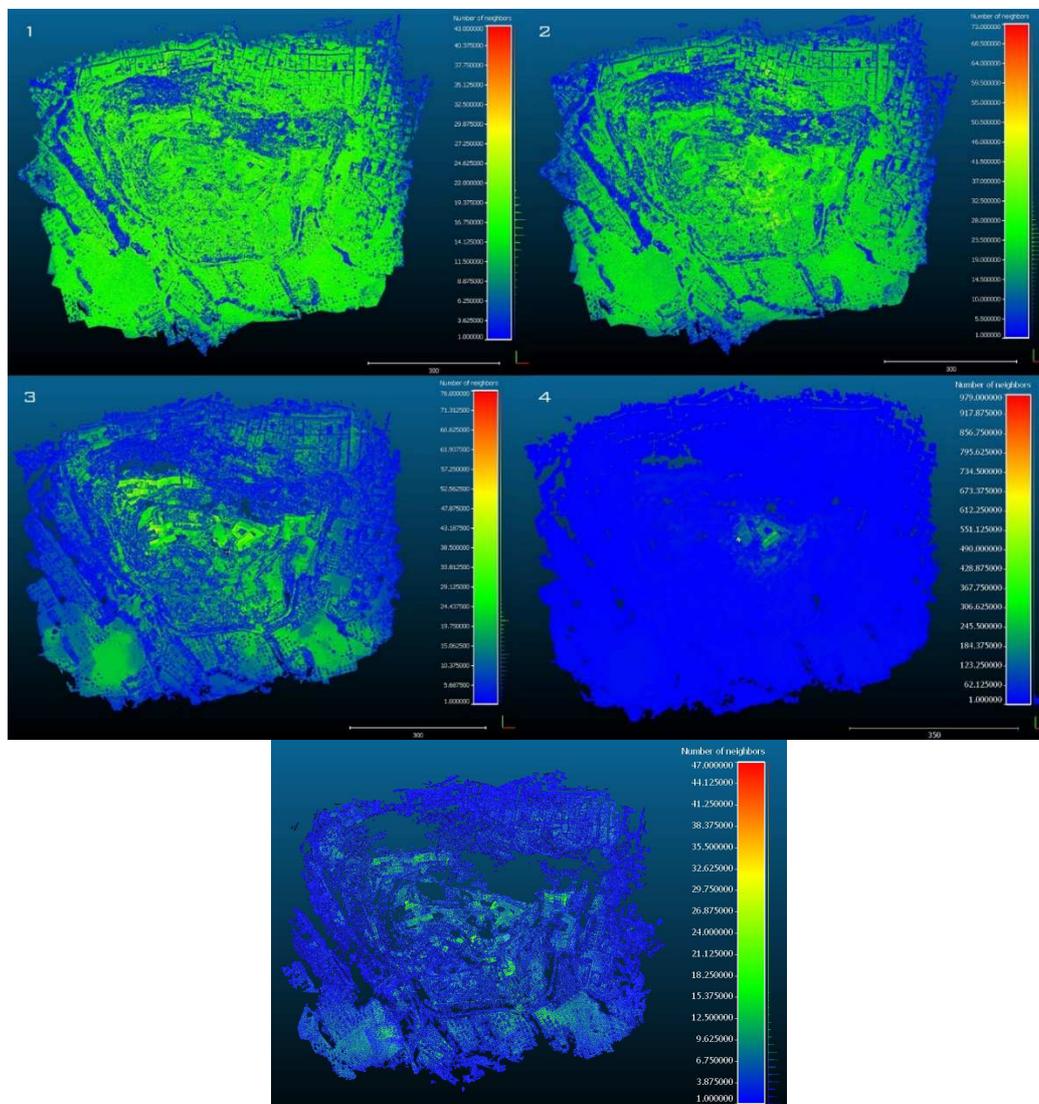


Figura 107: analisi della densità delle cinque nuvole di punti computate tenendo conto delle elaborazioni appena citate. Le numerazioni seguono lo stesso ordine dell'elenco soprastante.

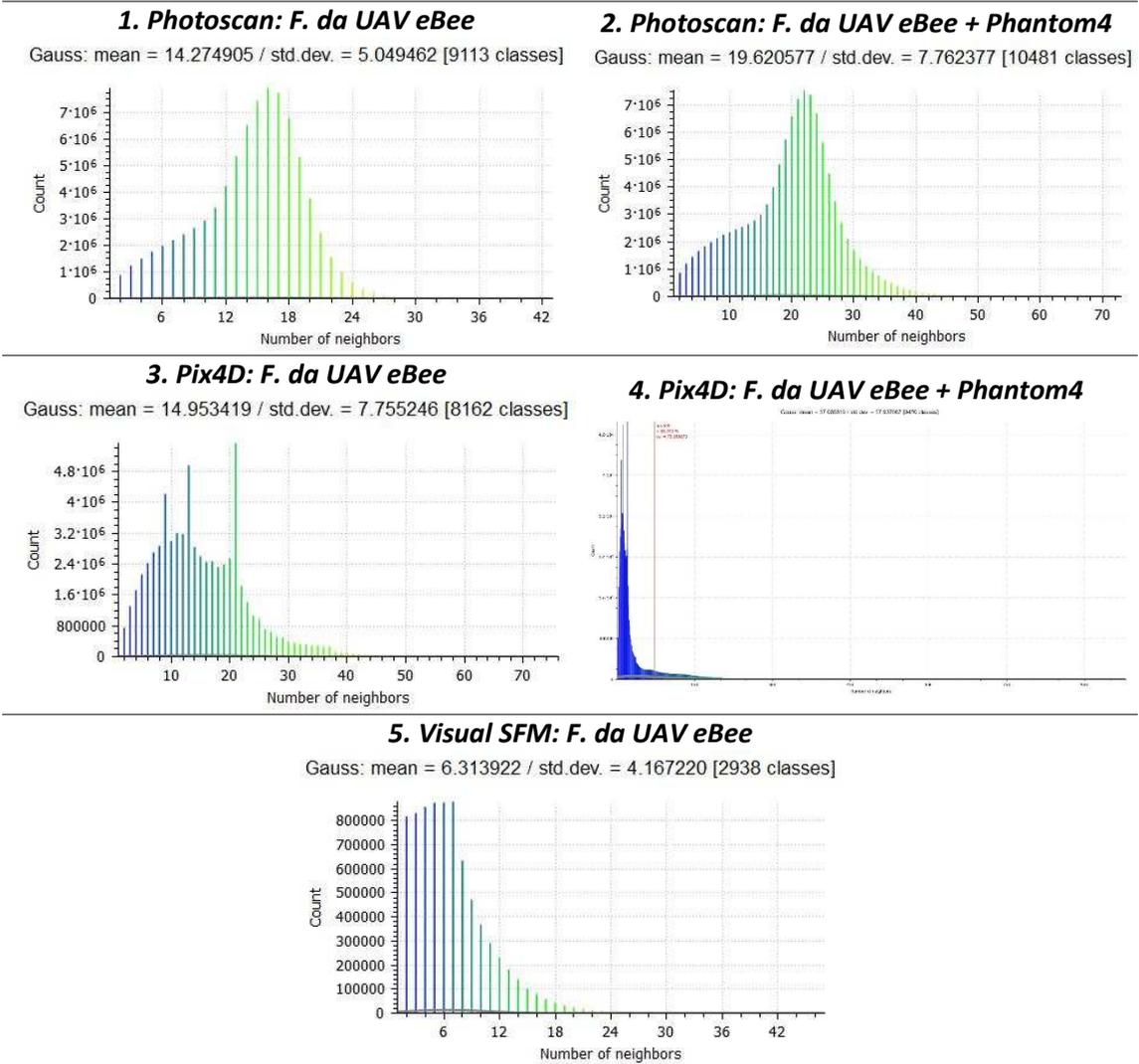


Tabella 36: grafici identificanti la media gaussiana e la deviazione standard delle analisi della densità delle cinque nuvole di punti elaborate. Le numerazioni seguono lo stesso ordine dell'elenco iniziale.

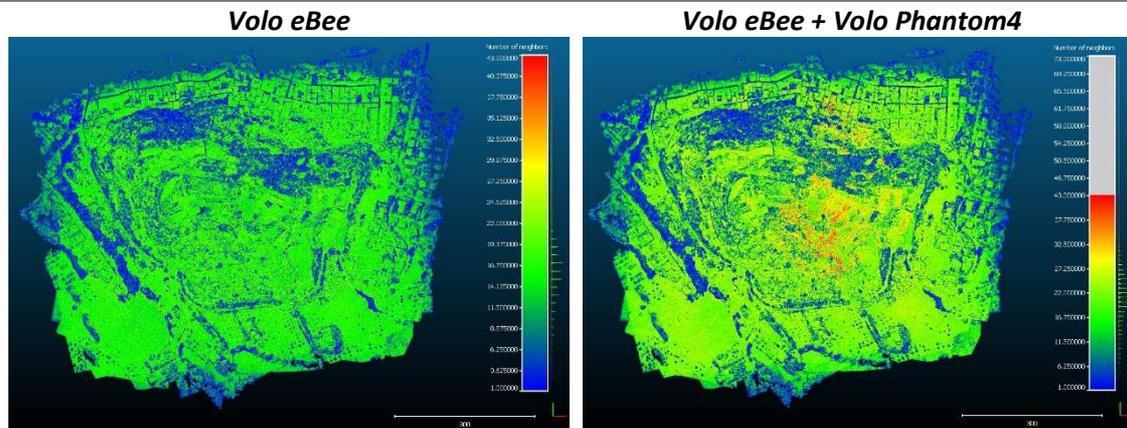
Tipologia di elaborazione	Media gaussiana [N° Neighbors]	Deviazione standard [N° Neighbors]	Massimo valore di "N" raggiunto	Totale numero di punti
1. Photoscan: F. da UAV eBee	14,3	5,0	43	83'032'628
2. Photoscan: F. da UAV eBee + Phantom4	19,6	7,8	73	109'838'982
3. Pix4D: F. da UAV eBee	15,0	7,8	76	66'611'775
4. Pix4D: F. da UAV eBee + Phantom4	37,1	58,0	979	89'674'273
5. Visual SFM: F. da UAV eBee	6,3	4,2	47	8'627'304

Tabella 37: presa visione delle medie gaussiane, delle deviazioni standard e del numero di punti totale delle analisi della densità delle cinque nuvole di punti elaborate. Le numerazioni seguono lo stesso ordine dell'elenco iniziale.

Per meglio comprendere i dati esposti e dettagliare in maniera puntuale l'analisi condotta, sono stati effettuati i seguenti confronti:

1. confronto della densità tra le due nuvole elaborate da *Photoscan*;
2. confronto della densità tra le due nuvole elaborate da *Pix4D*;
3. confronto della densità tra le due nuvole frutto del solo volo *eBee*, elaborate dai software *Photoscan* e *Pix4D*;
4. confronto delle densità tra le due nuvole frutto dell'unione dei voli effettuati dai droni *eBee* e *Phantom4*, elaborate dai software *Photoscan* e *Pix4D*;
5. confronto della densità tra le due nuvole frutto del solo volo *eBee*, elaborate dai software *Visual SFM* e *Photoscan*.

1. Confronto della densità tra le due nuvole elaborate da *Photoscan*



2. confronto della densità tra le due nuvole elaborate da *Pix4D*

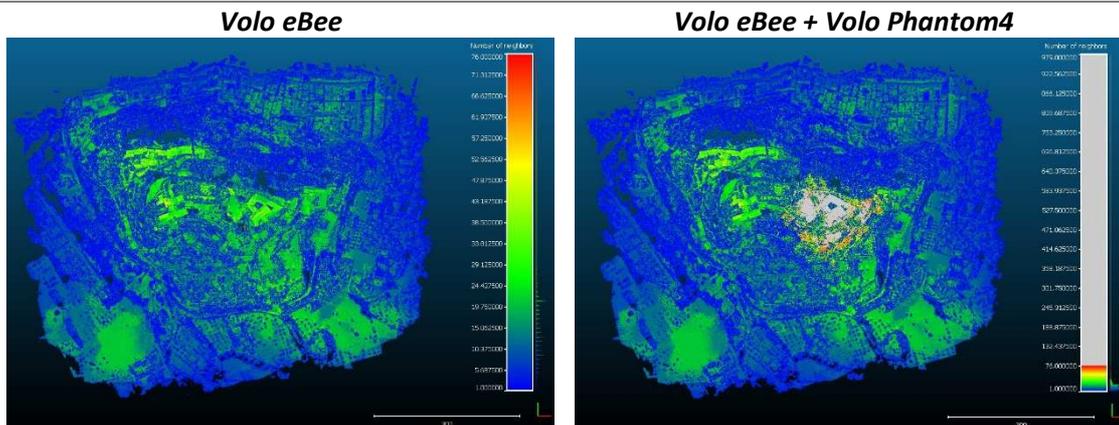


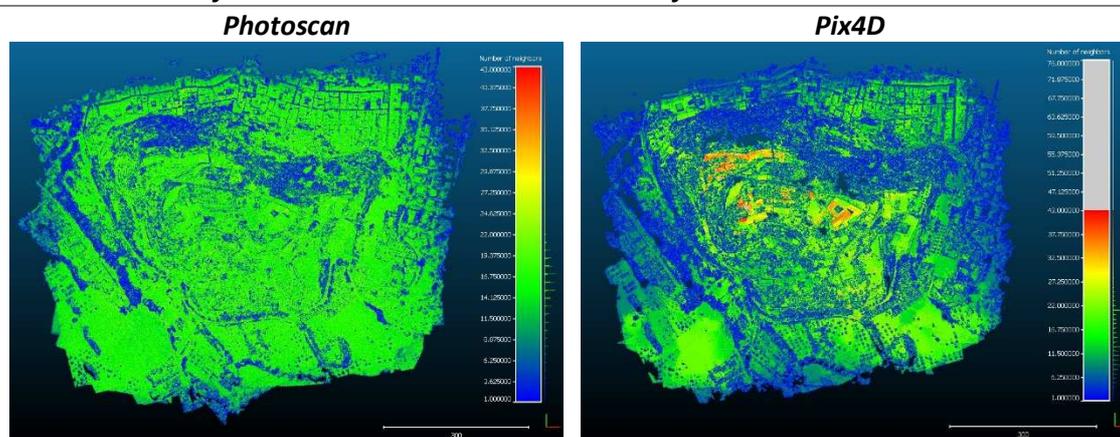
Tabella 38: confronto della densità tra le coppie di nuvole elaborate da *Photoscan* e da *Pix4D*. Per ciascuna tipologia il valore massimo della scala di colore dell'elaborazione con un "N" maggiore è stato impostato secondo il valore massimo della scala di colore dell'elaborazione con un "N" minimo. Oltre quel valore i punti con un "N" superiore a quello impostato vengono identificati col colore grigio.

I primi due confronti hanno come caratteristica principale la presa visione delle differenze di densità relative all'elaborazione di nuvole di punti ottenute aggiungendo al singolo volo effettuato dal drone *eBee*, quello compiuto dal *Phantom4*.

Dal punto di vista qualitativo delle immagini estratte, i risultati hanno evidenziato, sia per la coppia delle nuvole di punti ottenuta con *Photoscan* sia per quella ottenuta con *Pix4D*, un aumento significativo della densità nella zona circostante il Duomo Vecchio, ovvero lo spazio interessato proprio del volo compiuto dal *Phantom4*.

Invece, dal punto di vista numerico sono aumentati (in maniera considerevole con *Pix4D*) tutti i parametri analizzati ovvero: la media gaussiana, la deviazione *standard*, il massimo valore di "number of neighbors" raggiunto e il numero totale di punti della nuvola densa.

3. Confronto della densità tra le due nuvole frutto del solo volo eBee



4. confronto delle densità tra le due nuvole frutto dell'unione dei voli effettuati dai droni eBee e Phantom4

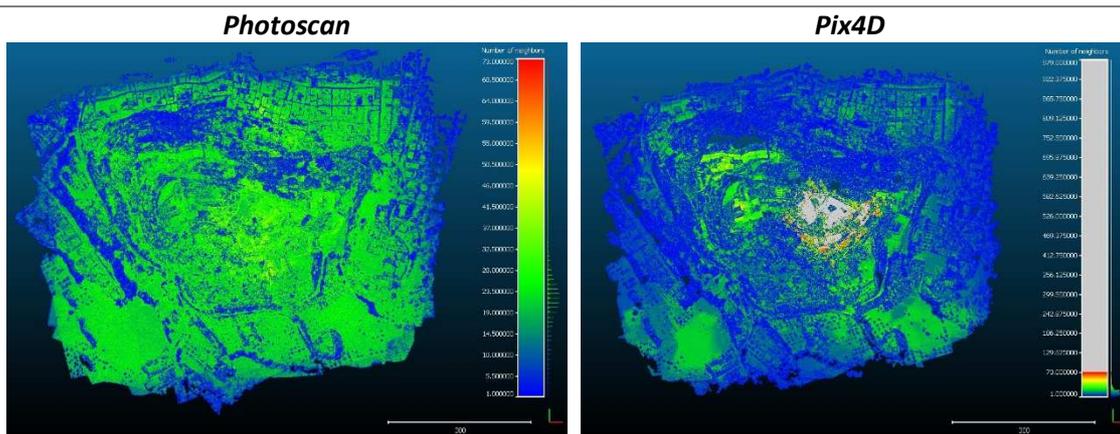


Tabella 39: confronto della densità tra le coppie di nuvole frutto del singolo volo conseguito dal drone *eBee* e dell'unione di quelli eseguiti dai droni *eBee* e *Phantom4*. Per ciascuna tipologia il valore massimo della scala di colore dell'elaborazione con un "N" maggiore è stato impostato secondo il valore massimo della scala di colore dell'elaborazione con un "N" minimo. Oltre quel valore i punti con un "N" superiore a quello impostato vengono identificati col colore grigio.

5. Confronto della densità tra le due nuvole frutto del solo volo eBee

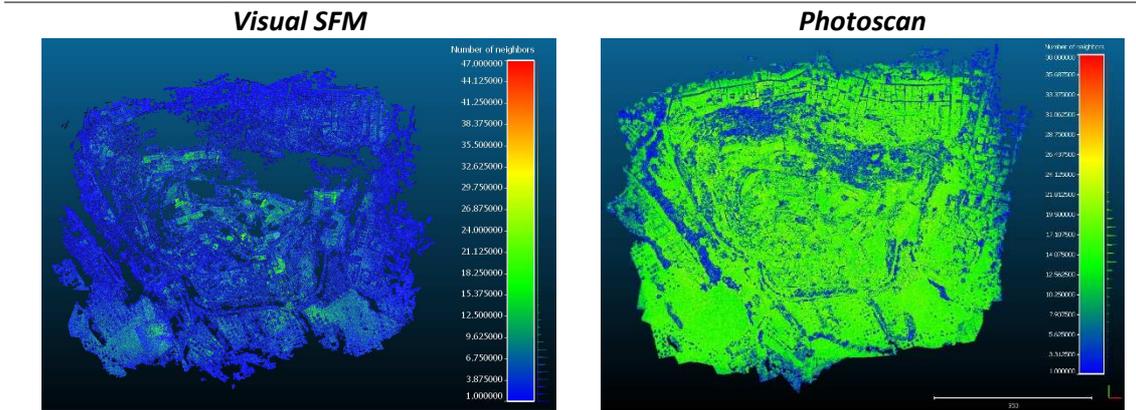


Tabella 40: confronto della densità tra le due nuvole frutto del solo volo eBee.

Il terzo e quarto confronto hanno come caratteristica principale la presa visione delle differenze di densità relative all'elaborazione di nuvole di punti ottenute coi *software Pix4D e Photoscan*.

Dal punto di vista qualitativo delle immagini estrapolate, in entrambi i confronti, per le nuvole dense elaborate dal *software Pix4D*, i risultati hanno evidenziato un aumento della densità nelle zone del colle Monte Nero con maggiore quota altimetrica e una diminuzione della stessa nelle zone con minore quota altimetrica.

Invece, dal punto di vista numerico, sempre per le elaborazioni portate avanti col *software Pix4D*, sono aumentati tutti i parametri analizzati, ovvero la media gaussiana, la deviazione *standard* e il massimo valore di "number of neighbors" raggiunto, tranne il numero totale di punti della nuvola densa che è diminuito.

Il quinto confronto, sia dal punto di vista qualitativo delle immagini estrapolate sia quantitativo per i valori dei risultati ottenuti, fa registrare un notevole minore numero di punti totali e di densità della nuvola lungo tutta l'area del colle Monte Nero rispetto a quelli elaborati con i *software commerciali*.

5.2.2. Analisi della densità delle nuvole di punti della Torre degli Smeducci

La densità della Torre è stata computata, per i quattro fronti che la contraddistinguono, tenendo conto delle nuvole dense di punti ottenute dalle seguenti elaborazioni:

1. fotogrammetria da UAV *Dji Phantom4* - *Agisoft Photoscan*;
2. fotogrammetria terrestre camera *Nikon* - *Agisoft Photoscan*;
3. fotogrammetria da UAV *Dji Phantom4* - *Pix4D*;
4. fotogrammetria terrestre camera *Nikon* - *Pix4D*;
5. laser scanner terrestre - *Faro SCENE*.

Il metodo di calcolo utilizzato è stato quello "precise" con un raggio di valore pari a 0,02 m, ovvero il valore della tolleranza della scala 1:50 attraverso la quale è stato impostato il rilievo, mentre gli *output* consistono nella determinazione di "N".

5.2.2.1. Fronte nord

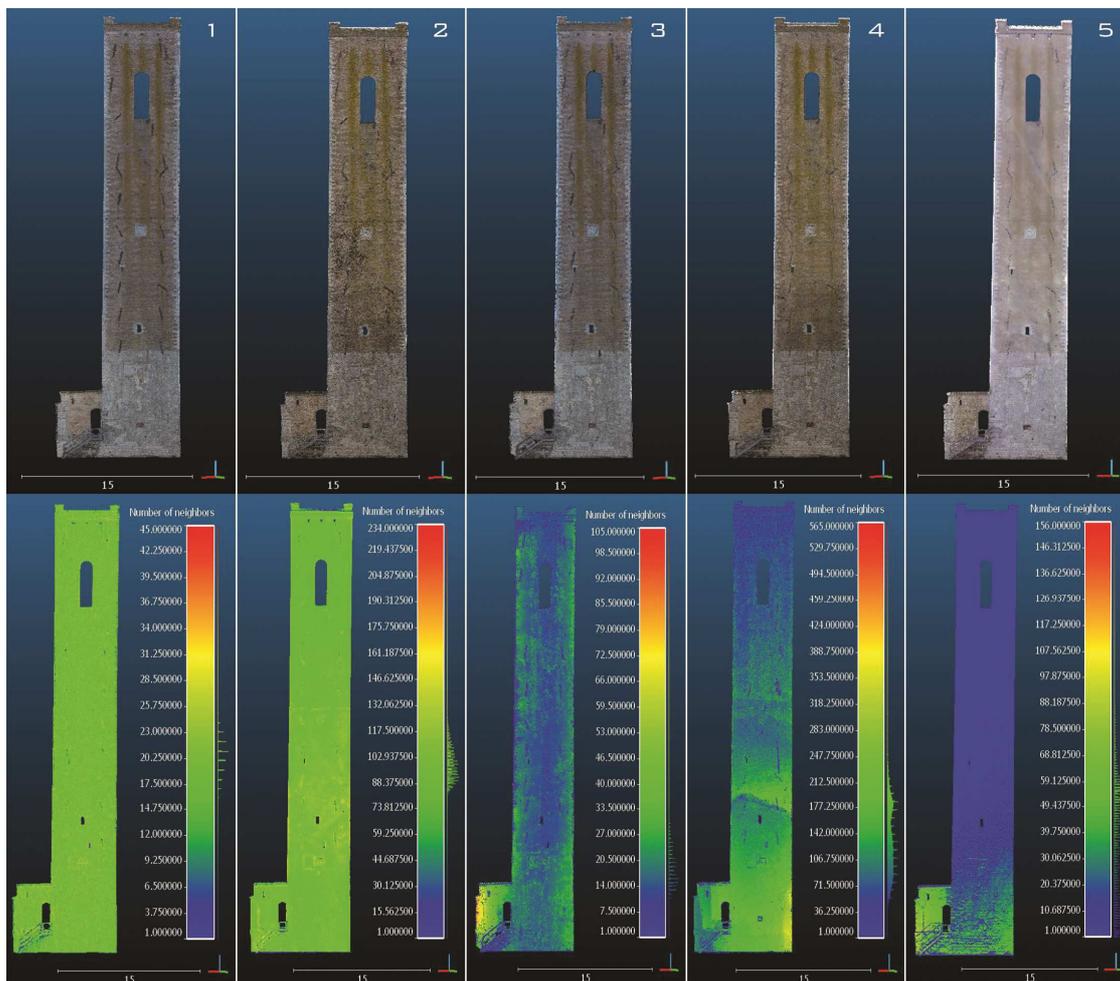


Figura 108: in alto le nuvole dense di punti delle elaborazioni sopra citate, in basso l'analisi di densità effettuata sulle rispettive nuvole dense di punti. La numerazione segue la stessa sopra esposta.

Nell'analisi del fronte nord, tra le tre differenti tecniche di rilievo, fotogrammetrica da UAV, fotogrammetrica terrestre e TLS, quella che restituisce un più alto valore della densità, espresso attraverso la sua valutazione media lungo tutta la superficie, è quella fotogrammetrica terrestre; in successione troviamo la tecnica TLS e infine quella fotogrammetrica da UAV.

Ulteriore suddivisione si può fare per le analisi compiute sulle nuvole dense ottenute dai due differenti *software* commerciali applicati alla fotogrammetria da UAV o terrestre. In entrambi i casi le elaborazioni portate avanti dal programma *Pix4D* hanno restituito nuvole di punti maggiormente dense rispetto a quelle ottenute con *Photoscan*.

I risultati sono confermati inoltre sia dal numero totale di punti componenti le nuvole dense, sia dal valore massimo di "N" raggiunto in ciascuna analisi.

Qui di seguito sono riportati i diagrammi e le tabelle ottenuti da ciascuna analisi.

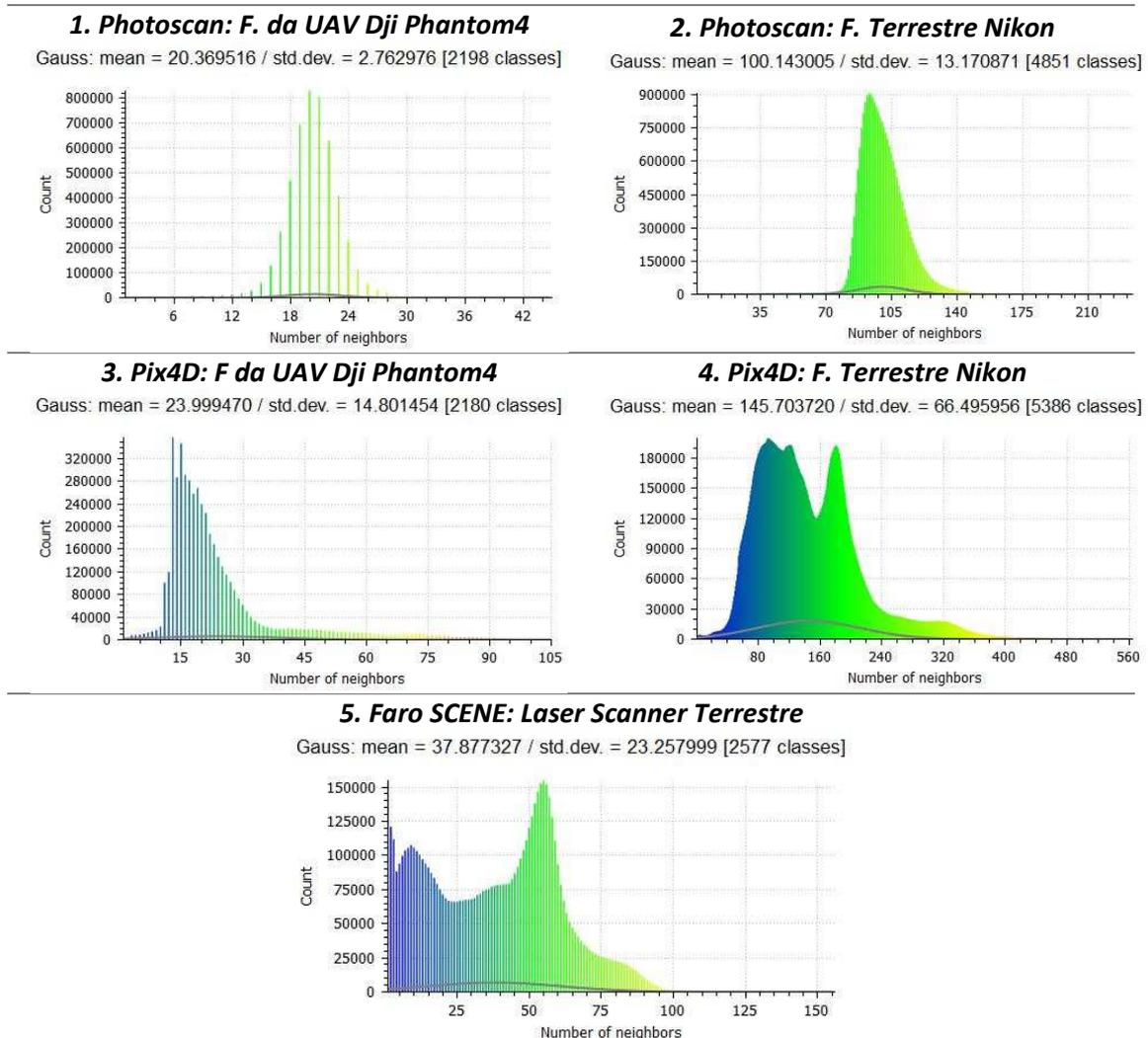


Tabella 41: dati ricavati dalle analisi di densità del fronte nord, compiute sui cinque differenti tipi di elaborazione.

Tipologia di elaborazione	Media gaussiana [N° Neighbors]	Deviazione standard [N° Neighbors]	Totale numero di punti
1. Photoscan: F. da UAV Dji Phantom4	20,4	2,8	4'827'382
2. Photoscan: F. Terrestre Nikon	100,1	13,2	23'530'628
3. Pix4D: F. da UAV Dji Phantom4	24,0	14,8	4'749'034
4. Pix4D: F. Terrestre Nikon	145,7	66,5	29'000'797
5. Faro SCENE: Laser Scanner Terrestre	37,9	23,3	6'639'385

Tabella 42: riassunto delle analisi di densità del fronte nord, compiute sui cinque differenti tipi di elaborazione.

5.2.2.2. Fronte sud

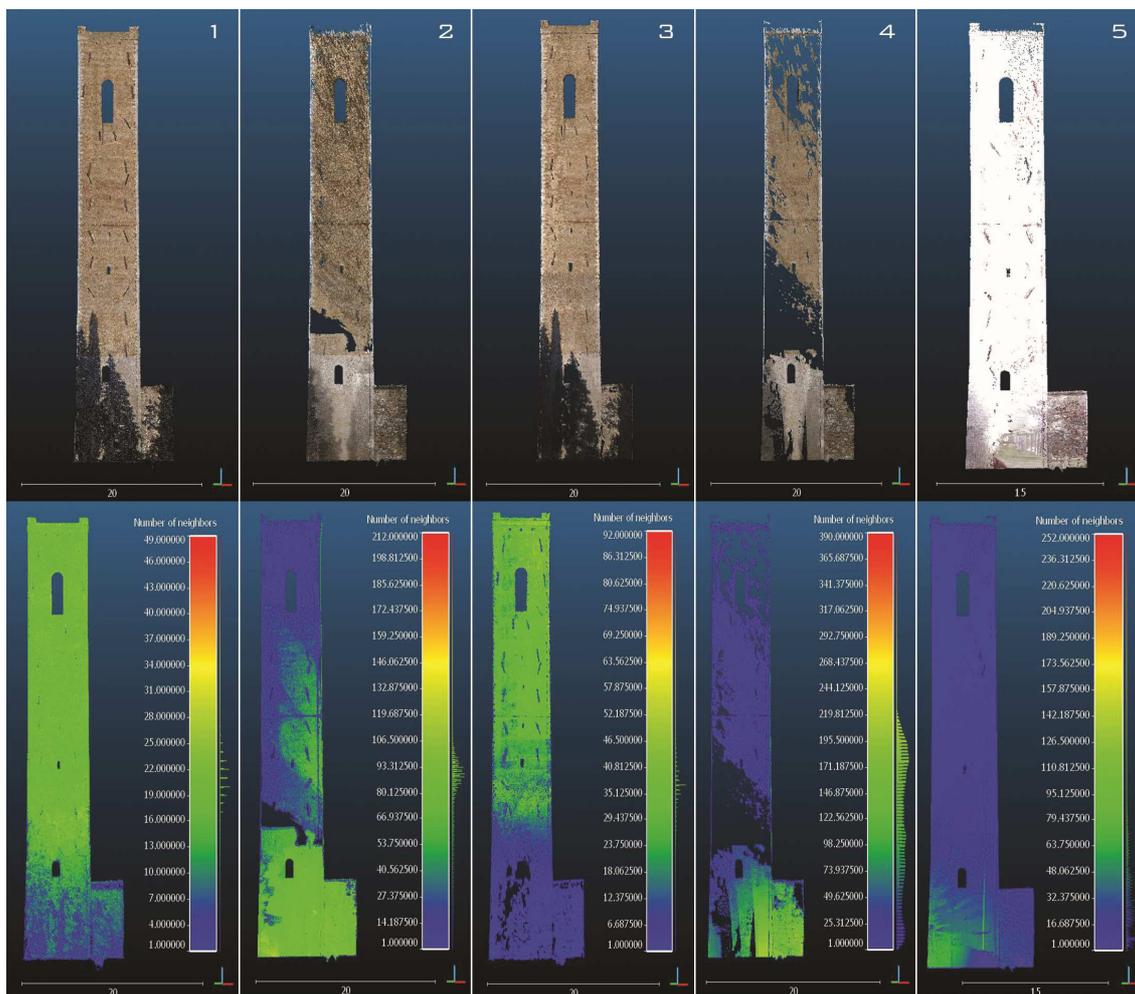


Figura 109: in alto le nuvole dense di punti compiute sui cinque differenti tipi di elaborazione, in basso l'analisi di densità effettuata sulle rispettive nuvole dense di punti. La numerazione segue la stessa di quella del fronte sud.

Anche nell'analisi del fronte sud, la tecnica di rilievo che restituisce un più alto valore della densità, espresso attraverso la sua valutazione media lungo tutta la superficie, risulta essere quella fotogrammetrica terrestre; in successione troviamo sempre nello stesso ordine la tecnica *TLS* e quella fotogrammetrica da *UAV*.

Le analisi effettuate sulle nuvole dense estrapolate da *Pix4D* hanno restituito nuvole maggiormente dense rispetto a quelle elaborate da *Photoscan*.

La conferma di tutte queste osservazioni sono rafforzate anche in questo caso dal numero totale di punti componenti le nuvole dense e dal valore massimo di "N".

Da notare inoltre che per le tecniche di rilievo terrestri la maggiore densità si raggiunge nelle parti basse della torre, mentre per quelle da *UAV*, nel caso di questo fronte, a partire dal primo quarto della Torre a causa della presenza della vegetazione che impediva il rilievo nelle parti inferiori.

Qui di seguito sono riportati i diagrammi e le tabelle ottenuti da ciascuna analisi.

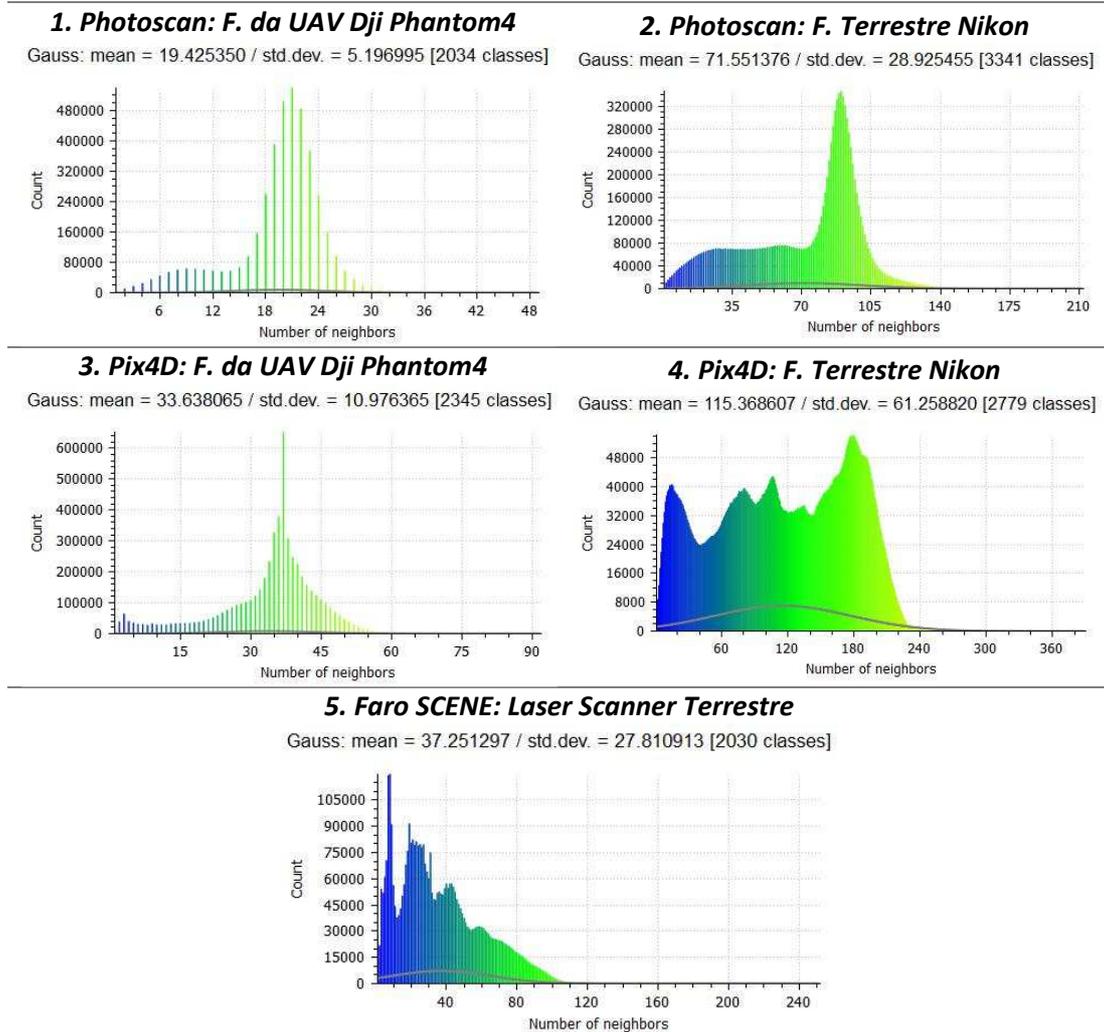


Tabella 43: dati ricavati dalle analisi di densità del fronte sud, compiute sui cinque differenti tipi di elaborazione.

Tipologia di elaborazione	Media gaussiana [N° Neighbors]	Deviazione standard [N° Neighbors]	Totale numero di punti
1. Photoscan: F. da UAV Dji Phantom4	19,4	5,2	4'135'448
2. Photoscan: F. Terrestre Nikon	71,6	28,9	11'157'325
3. Pix4D: F. da UAV Dji Phantom4	33,6	11,0	5'497'329
4. Pix4D: F. Terrestre Nikon	115,4	61,3	7'717'445
5. Faro SCENE: Laser Scanner Terrestre	37,3	27,8	4'118'944

Tabella 44: riassunto delle analisi di densità del fronte Sud, compiute sui cinque differenti tipi di elaborazione.

5.2.2.3. Fronte ovest

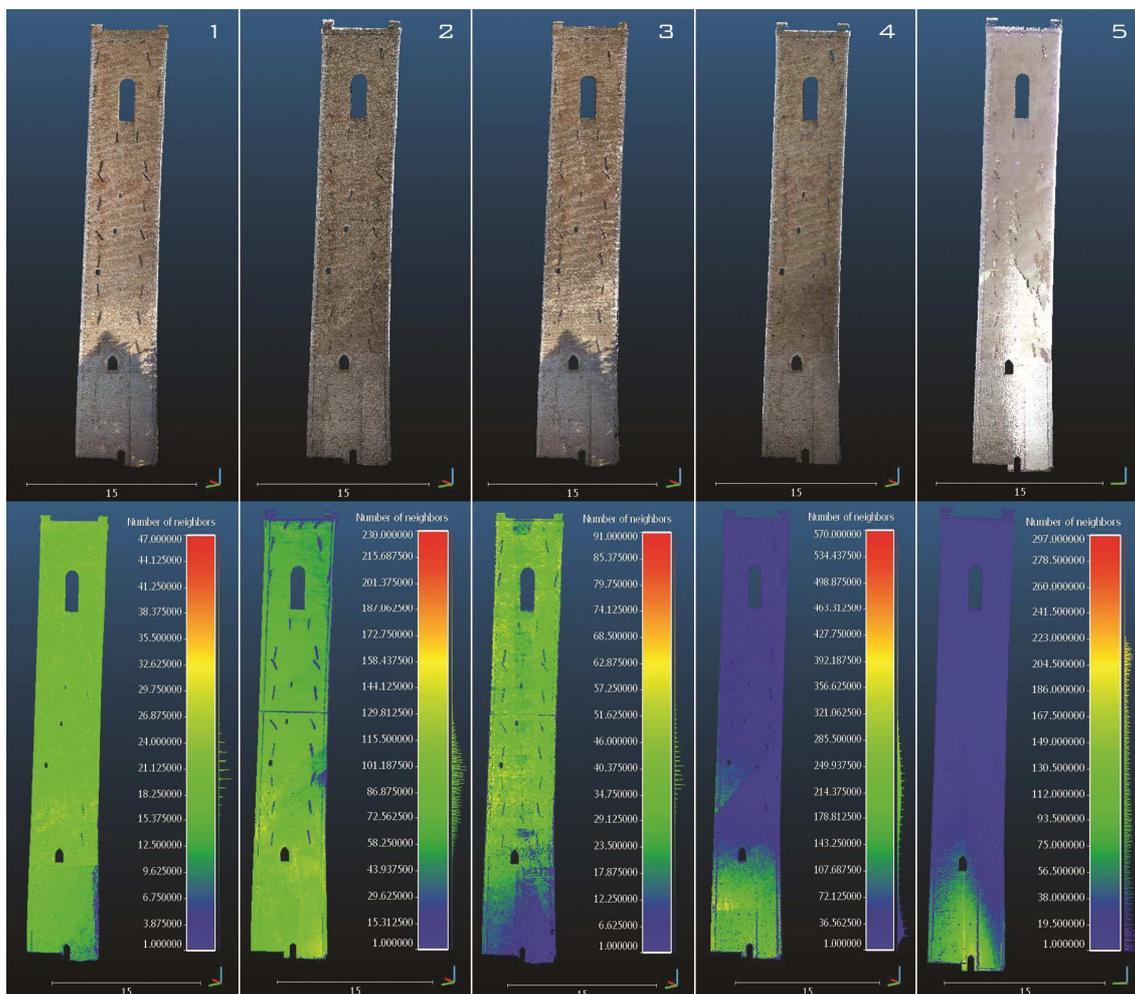


Figura 110: in alto le nuvole dense di punti compiute sui cinque differenti tipi di elaborazione, in basso l'analisi di densità effettuata sulle rispettive nuvole dense di punti. La numerazione segue la stessa di quelle dei prospetti già esaminati.

Anche nell'analisi del fronte ovest, la tecnica di rilievo che restituisce un più alto valore della densità, espresso attraverso la sua valutazione media lungo tutta la superficie, risulta essere quella fotogrammetrica terrestre; in successione troviamo sempre nello stesso ordine la tecnica TLS e quella fotogrammetrica da UAV.

Le analisi effettuate sulle nuvole dense estrapolate da Pix4D hanno restituito nuvole maggiormente dense rispetto a quelle elaborate da Photoscan.

La conferma di tutte queste osservazioni sono rafforzate anche in questo caso dal numero totale di punti componenti le nuvole dense e dal valore massimo di "N".

Si nota sempre che le tecniche di rilievo terrestri raggiungono una maggiore densità nelle parti basse della Torre, mentre quelle da UAV tendono ad avere densità minori nelle zone dove il drone non è riuscito a volare con maggior efficacia, a causa della vicinanza al terreno o della presenza di ostacoli.

Qui di seguito sono riportati i diagrammi e le tabelle ottenuti da ciascuna analisi.

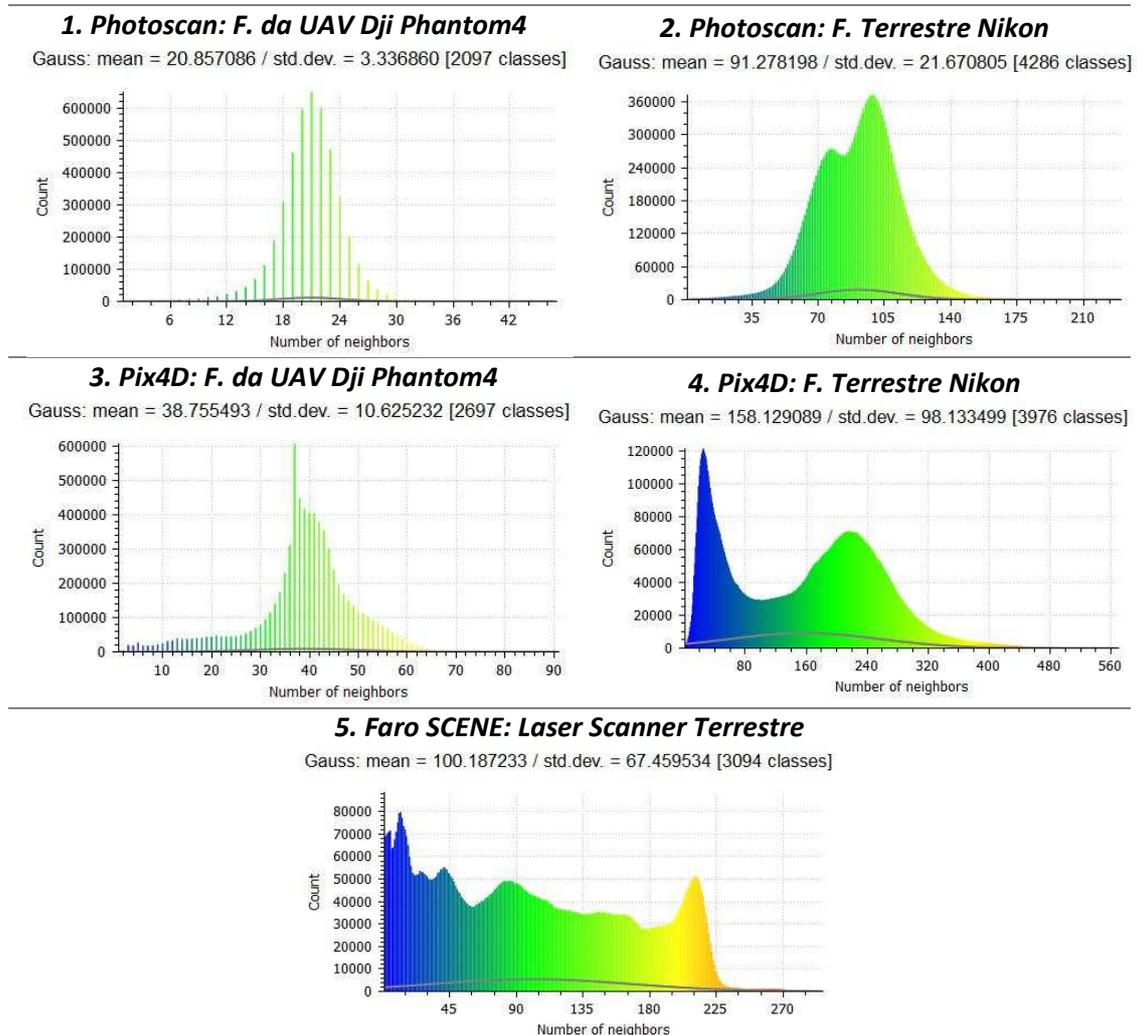


Tabella 45: riassunto delle analisi di densità del fronte ovest, compiute sui cinque differenti tipi di elaborazione.

Tipologia di elaborazione	Media gaussiana [N° Neighbors]	Deviazione standard [N° Neighbors]	Totale numero di punti
1. Photoscan: F. da UAV Dji Phantom4	20,9	3,39	4'395'637
2. Photoscan: F. Terrestre Nikon	91,3	21,7	18'362'975
3. Pix4D: F. da UAV Dji Phantom4	38,8	10,6	7'270'258
4. Pix4D: F. Terrestre Nikon	158,1	98,1	15'802'706
5. Faro SCENE: Laser Scanner Terrestre	100,2	67,5	9'569'638

Tabella 46: riassunto delle analisi di densità del fronte ovest, compiute sui cinque differenti tipi di elaborazione.

5.2.2.4. Fronte est

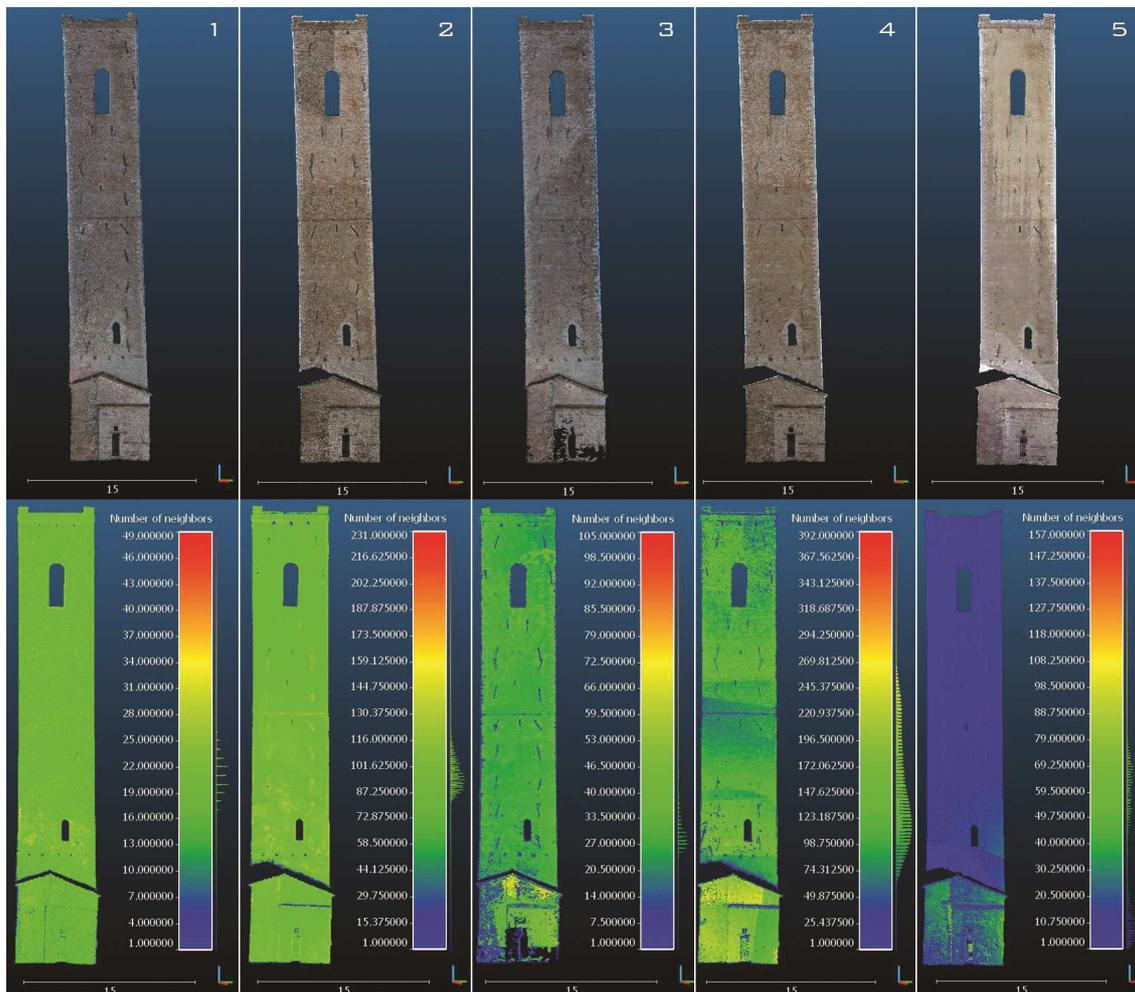


Figura 111: in alto le nuvole dense di punti compiute sui cinque differenti tipi di elaborazione, in basso l'analisi di densità effettuata sulle rispettive nuvole dense di punti. La numerazione segue la stessa di quelle dei prospetti già esaminati.

Infine nell'analisi del fronte est, la tecnica di rilievo che restituisce un più alto valore della densità, espresso attraverso la sua valutazione media lungo tutta la superficie, risulta essere sempre quella fotogrammetrica terrestre; in successione troviamo sempre nello stesso ordine la tecnica TLS e quella fotogrammetrica da UAV.

Le analisi effettuate sulle nuvole dense estrapolate da Pix4D hanno restituito nuvole maggiormente dense rispetto a quelle elaborate da Photoscan.

La conferma di tutte queste osservazioni sono rafforzate anche in questo caso dal numero totale di punti componenti le nuvole dense e dal valore massimo di "N".

Le tecniche di rilievo terrestri raggiungono, allo stesso modo, una maggiore densità nelle parti basse della torre, mentre quelle da UAV tendono ad avere densità minori nelle zone dove il drone non è riuscito a volare con maggior efficacia, a causa della vicinanza al terreno o della presenza di ostacoli.

Qui di seguito sono riportati i diagrammi e le tabelle ottenuti da ciascuna analisi.

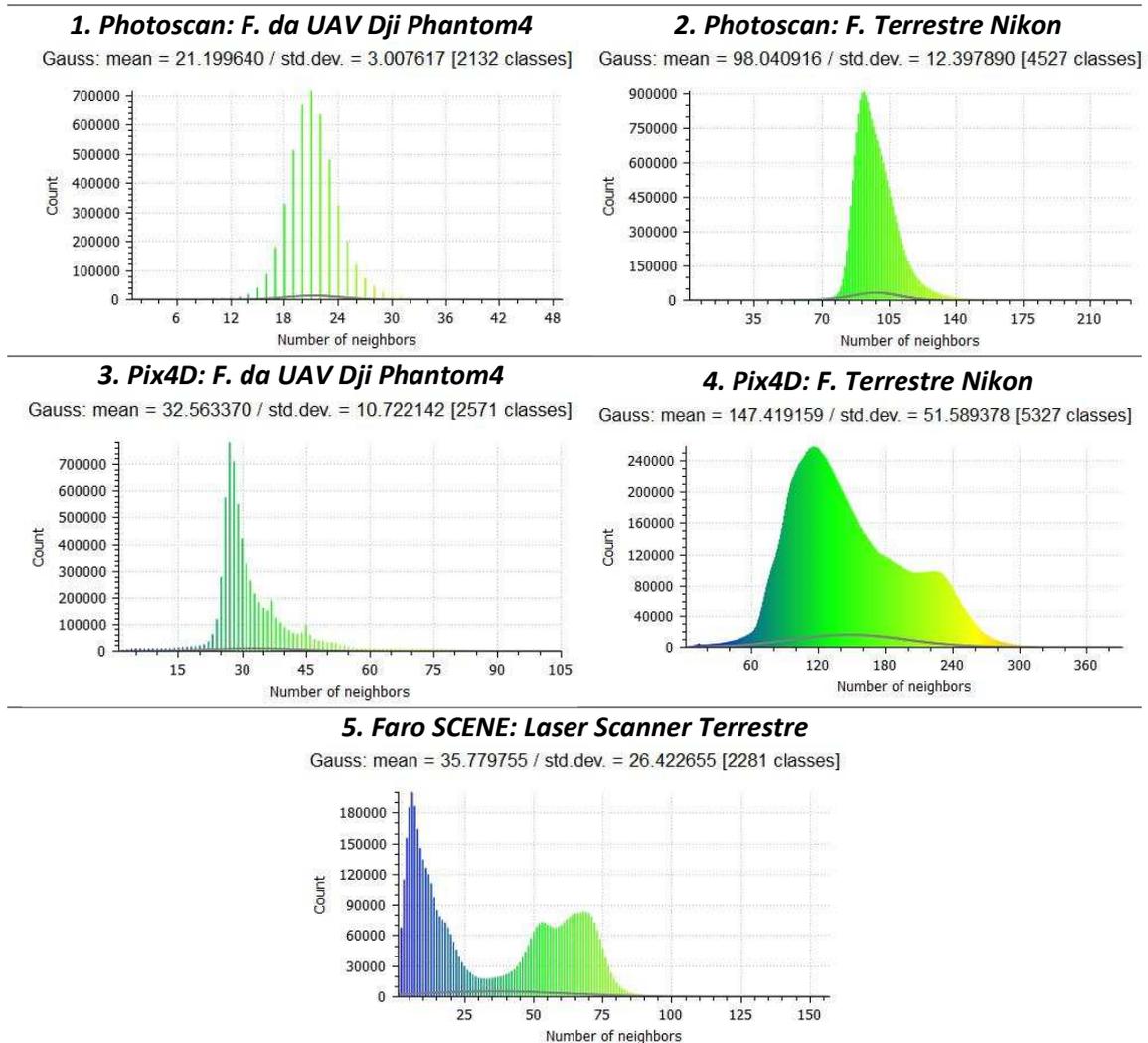


Tabella 47: riassunto delle analisi di densità del fronte est, compiute sui cinque differenti tipi di elaborazione.

Tipologia di elaborazione	Media gaussiana [N° Neighbors]	Deviazione standard [N° Neighbors]	Totale numero di punti
1. Photoscan: F. da UAV Dji Phantom4	21,2	3,0	4.543.303
2. Photoscan: F. Terrestre Nikon	98,0	12,4	20.485.844
3. Pix4D: F. da UAV Dji Phantom4	32,6	10,7	6.609.809
4. Pix4D: F. Terrestre Nikon	147,4	51,6	28.373.019
5. Faro SCENE: Laser Scanner Terrestre	35,8	26,4	5.201.937

Tabella 48: riassunto delle analisi di densità del fronte est, compiute sui cinque differenti tipi di elaborazione.

5.2.2.5. Conclusioni delle analisi della densità dei fronti della Torre

Dalle analisi effettuate su tutti i quattro fronti della Torre degli Smeducci, le elaborazioni dei dati acquisiti con le tecniche di rilievo terrestre (fotogrammetrica e *laser scanner*), hanno generato delle nuvole maggiormente dense rispetto a quelle ottenute dalle elaborazioni dei dati acquisiti con le tecniche di rilievo da *UAV*.

Per un migliore perfezionamento delle analisi e conseguente appianamento delle divergenze, si sarebbero dovute utilizzare camere da presa con le stesse caratteristiche, ma ciò non è avvenuto per questa campagna di acquisizione dati.

Le migliori caratteristiche intrinseche (in *primis* quella inerente alla risoluzione) della camera da presa *Nikon* utilizzata per il rilievo fotogrammetrico terrestre hanno fatto sì che il confronto della densità tra le nuvole ottenute da differenti tecniche di rilievo non fosse uniforme.

La tecnica *TLS* non ha potuto mostrare appieno le proprie capacità. Infatti per poter acquisire il monumento in tutta la sua altezza, molte stazioni sono state posizionate ad una distanza maggiore di quella che si sarebbe impostata per rilevare, ad esempio, soltanto le parti più basse. Ciò ha comportato delle densità minori (sia nelle parti inferiori sia in quelle superiori) rispetto alla tecnica di rilievo fotogrammetrica terrestre. Inoltre, per tutte le analisi effettuate sulle nuvole ottenute dall'elaborazione dei dati acquisiti con tecniche di rilievo terrestre, è stata evidenziata una maggiore densità nelle parti inferiori, mentre per quelle effettuate sulle nuvole estratte dalle elaborazioni dei dati acquisiti con tecniche di rilievo da *UAV*, la densità è risultata essere distribuita più uniformemente lungo tutte le superfici tranne nei punti dove la presa era maggiormente disturbata dalla presenza del terreno o da quella di ostacoli fisici, oppure negli spigoli della Torre dove il volo del drone stazionava per più tempo.

Un'ultima osservazione viene fatta per quanto riguarda le *deviazioni standard*. Nella tabella che segue vengono riportati i rapporti, espressi in percentuale, tra la deviazione *standard* e la media gaussiana di tutte le elaborazioni effettuate per ciascun fronte.

$$I_{\%} = \frac{\text{deviazione standard}_{i-esima}}{\text{media gaussiana}_{i-esima}} \quad [5.4]$$

Maggiore è il valore percentuale ottenuto, maggiore è la dispersione dei valori calcolati rispetto alla media gaussiana, maggiore sarà dunque la disomogeneità di densità di ciascuna elaborazione.

I valori percentuali indicano che la nuvola densa ottenuta dall'elaborazione dei dati acquisiti con tecnica *TLS* è quella con una maggiore disomogeneità di densità dei punti; a seguire in ordine di maggiore dispersione vi sono le nuvole dense della tecnica fotogrammetrica terrestre e quelle della tecnica fotogrammetrica da *UAV*. Per quanto

riguarda queste ultime due tecniche lo sviluppo delle nuvole con i due differenti programmi incide in maniera notevole. Infatti l'elaborazione dei dati, rilevati con una stessa tecnica, ed effettuata con il *software Pix4D*, ha portato ad un incremento di circa il 20% della deviazione *standard*, ovvero della disomogeneità di densità delle nuvole di punti, rispetto a quella effettuata con il *software Agisoft Photoscan*.

Incidenza % della deviazione standard rispetto alla media gaussiana

<i>Fronte</i>	Nord	Sud	Ovest	Est	Media
<i>1. Photoscan: F. da UAV Dji Phantom4</i>	14%	27%	16%	14%	18%
<i>2. Photoscan: F. Terrestre Nikon</i>	13%	40%	24%	13%	22%
<i>3. Pix4D: F. da UAV Dji Phantom4</i>	62%	33%	27%	33%	39%
<i>4. Pix4D: F. Terrestre Nikon</i>	46%	53%	62%	35%	49%
<i>5. Faro SCENE: Laser Scanner Terrestre</i>	61%	75%	67%	74%	69%

Tabella 49: rapporto percentuale della deviazione standard rispetto alla media gaussiana per ciascun prospetto di tutte le elaborazioni effettuate.

5.2.3. Confronto della densità tra il caso a scala urbana e quello a scala architettonica

I dati delle medie gaussiane del caso a scala urbana e di quello a scala architettonica, ricavate tenendo conto delle proprie scale di progetto (rispettivamente 1:500 e 1:50) sono stati rapportati ad una superficie, più significativa, di estensione pari a 1 m per poterli confrontare tra loro.

I risultati vengono esposti nelle seguenti tabelle.

Densità media della Torre degli Smeducci (R = 1 m)

<i>Fronte</i>	Nord	Sud	Ovest	Est	Media
<i>1. Photoscan: F. da UAV Dji Phantom4</i>	1020	970	1045	1060	1024
<i>2. Photoscan: F. Terrestre Nikon</i>	5005	3580	4565	4900	4513
<i>3. Pix4D: F. da UAV Dji Phantom4</i>	1200	1680	1940	1630	1613
<i>4. Pix4D: F. Terrestre Nikon</i>	7285	5770	7905	7370	7083
<i>5. Faro SCENE: Laser Scanner Terrestre</i>	1895	1865	5010	1790	2640

Tabella 50: densità media della Torre degli Smeducci e di ciascun fronte che la compone, calcolata tenendo conto della tolleranza della scala di progetto 1:50 (R = 0,02 m) e rapportata successivamente ad un valore di superficie di estensione pari a 1 m.

Densità media del colle Monte Nero

Tipologia di elaborazione	(R = 0,2 m)	(R = 1 m)
1. Photoscan: F. da UAV eBee	14	72
2. Photoscan: F. da UAV eBee + Phantom4	20	98
3. Pix4D: F. da UAV eBee	15	75
4. Pix4D: F. da UAV eBee + Phantom4	37	186
5. Visual SFM: F. da UAV eBee	6	32

Tabella 51: densità media del colle Monte Nero calcolata tenendo conto della tolleranza della scala di progetto 1:500 (R = 0,20 m) e rapportata successivamente ad un valore di superficie di estensione pari a 1 m.

Ciò permette di constatare che il rilievo a scala architettonica, anche a causa delle differenti impostazioni in fase di progetto dell'acquisizione dati (come le differenti scale, distanze di presa e GSD), ha una maggiore densità rispetto a quello a scala urbana di circa due ordini di grandezza.

5.3. Analisi della precisione

L'analisi della precisione di acquisizione ed elaborazione dati con differenti tecniche di rilievo e diversi programmi computazionali è stata compiuta mediante l'utilizzo della funzione "cloud to cloud distance" di *CloudCompare*.

Per definizione la precisione esprime l'attitudine di uno strumento a fornire misure affette da errori. Più è elevato l'errore strumentale, minore è la precisione.

In questo caso il "cloud to cloud distance" fornisce la distanza, secondo una media gaussiana, tra due nuvole di punti.

Preventivamente sono state caricate tutte le coppie di nuvole delle quali si è voluto effettuare il confronto, in seguito per ciascuna coppia selezionata, è stata avviata l'elaborazione "cloud/cloud distance" o tramite l'apposito comando si trova sulla barra degli strumenti o tramite comando da barra del menù che si trova sotto la voce "tools: distances". Nella schermata principale appare una finestra di dialogo che interroga l'utente su quale nuvola deve essere presa come riferimento principale e quale come comparazione.

La nuvola comparata è quella in cui vengono calcolate le distanze, *CloudCompare* calcolerà le distanze di ciascuno dei suoi punti relativamente alla nube di riferimento e il campo scalare generato sarà ospitato da questa nube. Invece per quanto riguarda la nuvola di riferimento è bene che sia scelta con le estensioni più ampie e la più elevata densità.

Terminata la scelta viene visualizzata la finestra di calcolo "cloud/cloud distance". *CloudCompare* calcola per la prima volta le distanze approssimative, utilizzate

internamente per impostare automaticamente il livello ottimale migliore per eseguire il calcolo delle distanze reali.

Dopo aver calcolato le distanze approssimative appare l'ultima finestra di dialogo che serve per l'impostazione dei parametri generali e avanzati, tra cui:

- *“octree level”*: livello di suddivisione degli *octree* al quale verrà eseguito il calcolo della distanza. Un *octree* è una suddivisione cubica dello spazio della nuvola. Maggiore è il numero degli *octree* e maggiore è il tempo di elaborazione, inoltre più è estesa l'area di una nuvola da analizzare e maggiore dovrà essere il numero degli *octree* per ottenere risultati più precisi.
- *“Max. distance”*: distanza massima di ricerca tra le due nuvole analizzate. Maggiore è la distanza tra le due nuvole, maggiore sarà il tempo di elaborazione dei dati.
- *“Multi threaded”*: scelta di utilizzo del numero di *core* della *CPU*.
- *“Split X,Y and Z components”*: genera altri tre campi scalari corrispondenti alla distanza assoluta tra ciascun punto comparato e il suo punto di riferimento più vicino ad ogni dimensione.

I parametri appena citati sono stati impostati, per ciascuna elaborazione effettuata, secondi i valori di *default* suggeriti dal programma.

Al termine dell'elaborazione la nuvola di riferimento è nascosta e la nuvola comparata è colorata secondo i valori riportati nella scala di colore.

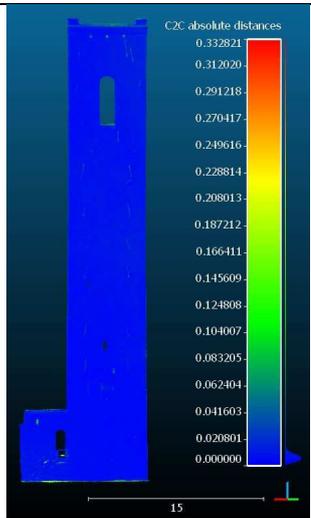
L'analisi *cloud to cloud* della Torre degli Smeducci è stata valutata per i quattro fronti che la contraddistinguono, tenendo conto delle seguenti comparazioni di nuvole dense:

1. *Photoscan*: Fotogrammetria da *UAV Dji Phantom4* - *Photoscan*: Fotogrammetria terrestre camera *Nikon* - *Agisoft Photoscan*;
2. *Pix4D*: Fotogrammetria da *UAV Dji Phantom4* - *Pix4D*: Fotogrammetria terrestre camera *Nikon* - *Pix4D*;
3. *Photoscan*: Fotogrammetria da *UAV Dji Phantom4* - *Faro SCENE: Laser Scanner* terrestre;
4. *Photoscan*: Fotogrammetria terrestre camera *Nikon* - *Faro SCENE: Laser Scanner* terrestre;
5. *Photoscan*: Fotogrammetria da *UAV Dji Phantom4* - *Pix4D*: Fotogrammetria da *UAV Dji Phantom4*;
6. *Photoscan*: Fotogrammetria terrestre camera *Nikon* - *Pix4D*: Fotogrammetria terrestre camera *Nikon*.

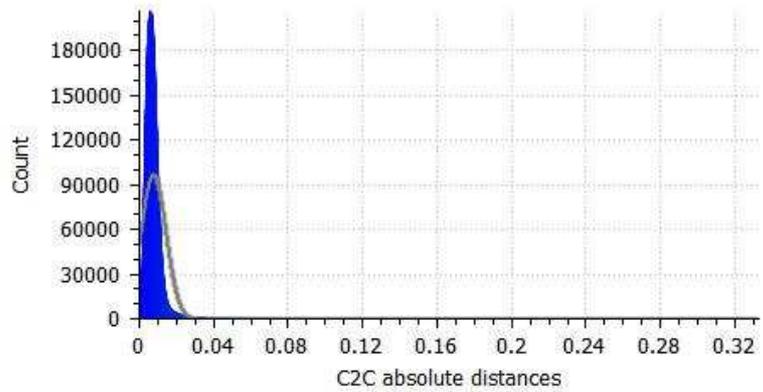
Di seguito vengono esposte le tabelle contenenti i grafici e i risultati numerici delle comparazioni tra nuvole dense per ciascun fronte della Torre degli Smeducci.

Fronte nord

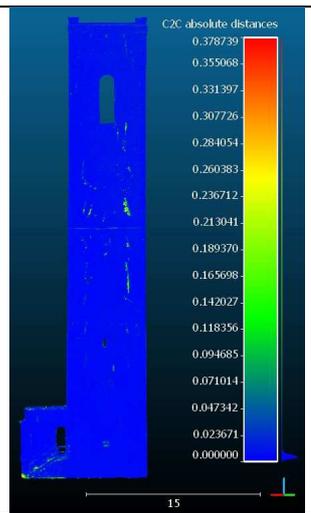
1. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon



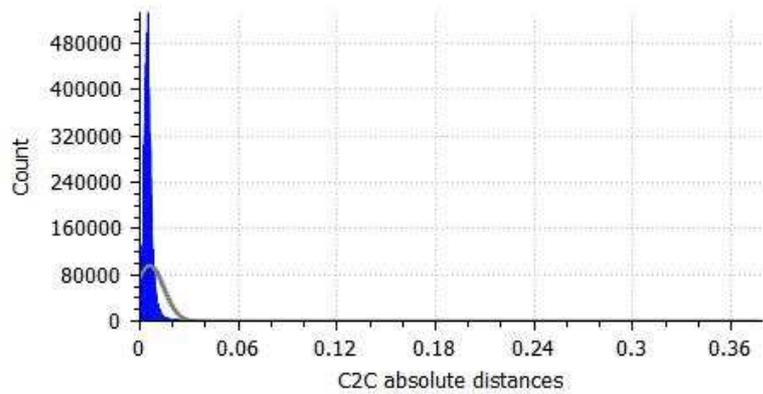
Gauss: mean = 0.007712 / std.dev. = 0.006648 [4851 classes]



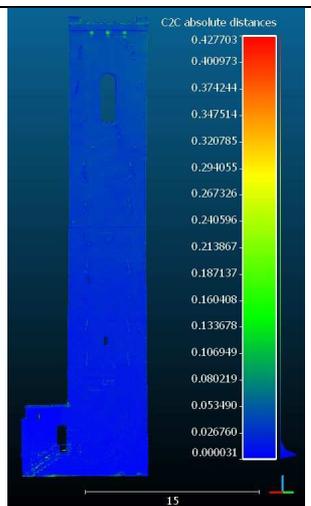
2. Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon



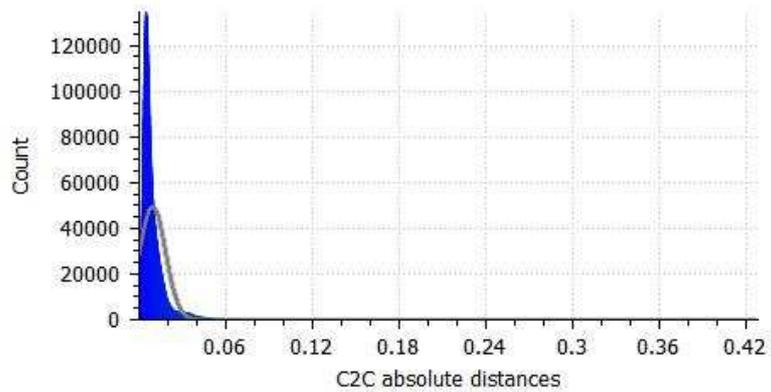
Gauss: mean = 0.006061 / std.dev. = 0.008451 [5386 classes]



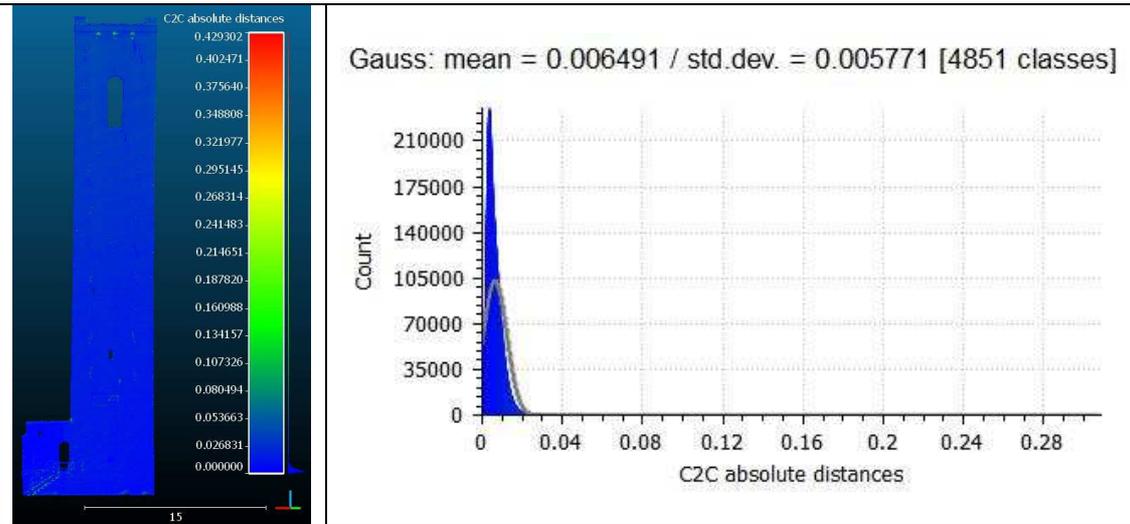
3. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre



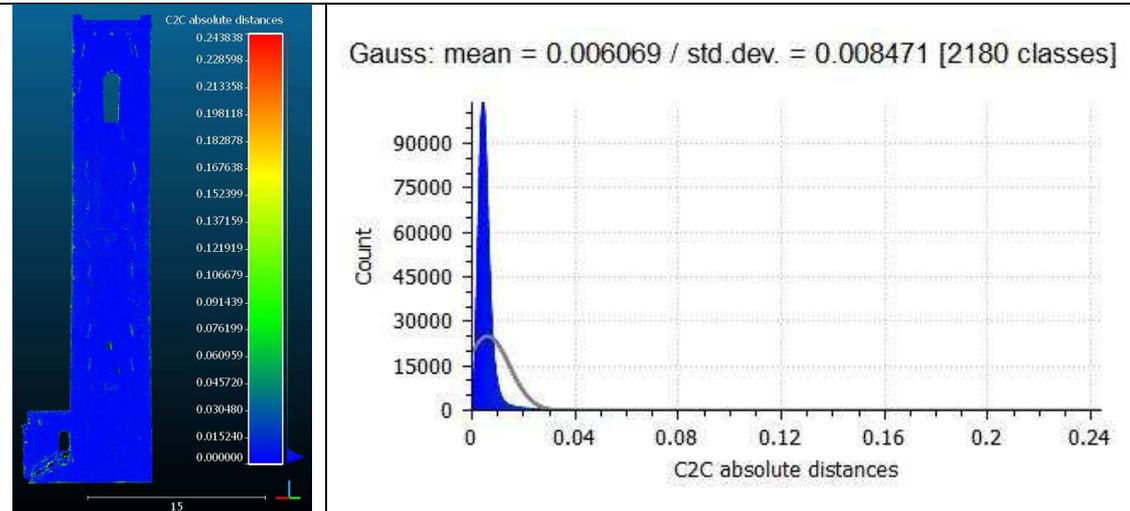
Gauss: mean = 0.009430 / std.dev. = 0.008862 [2577 classes]



4. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre



5. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4



6. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon

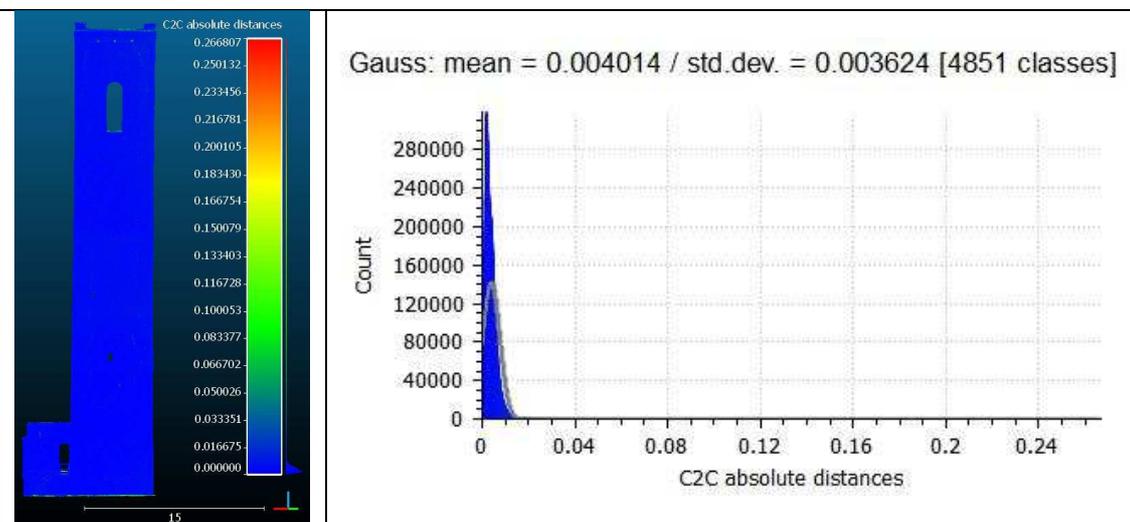
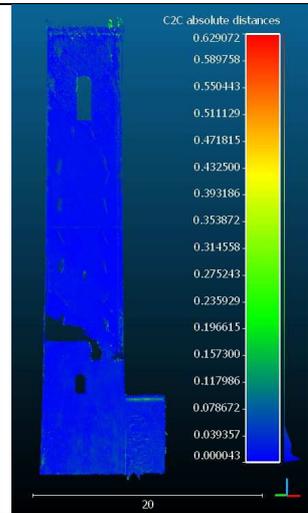


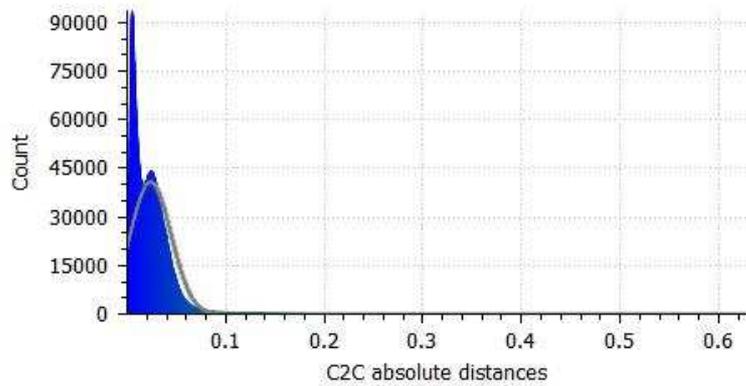
Tabella 52: grafici delle comparazioni tra coppie di nuvole dense per il fronte nord.

Fronte sud

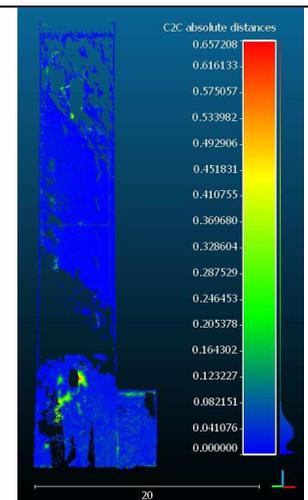
1. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon



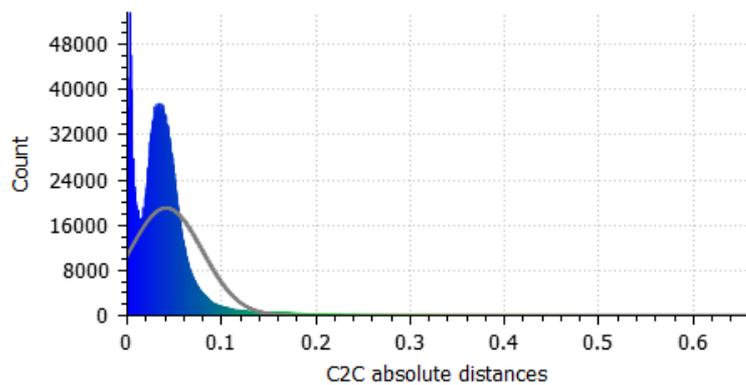
Gauss: mean = 0.024024 / std.dev. = 0.020531 [3341 classes]



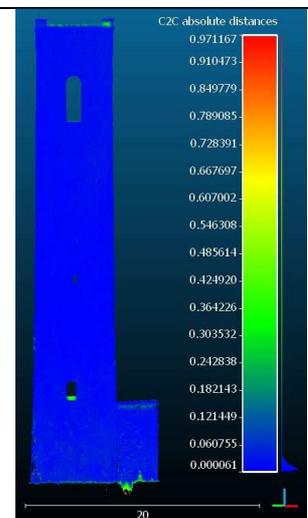
2. Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon



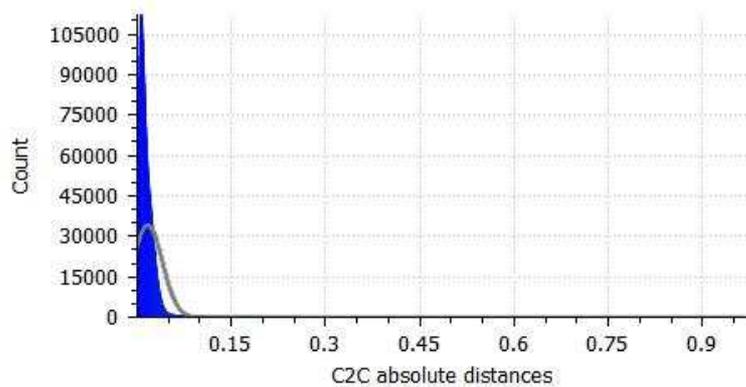
Gauss: mean = 0.041462 / std.dev. = 0.038201 [2779 classes]



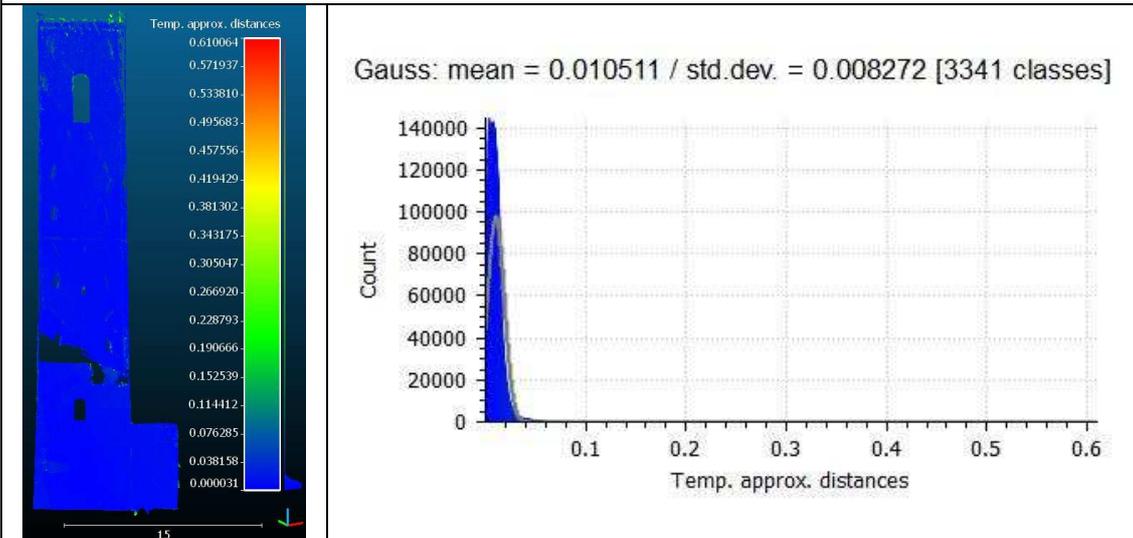
3. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre



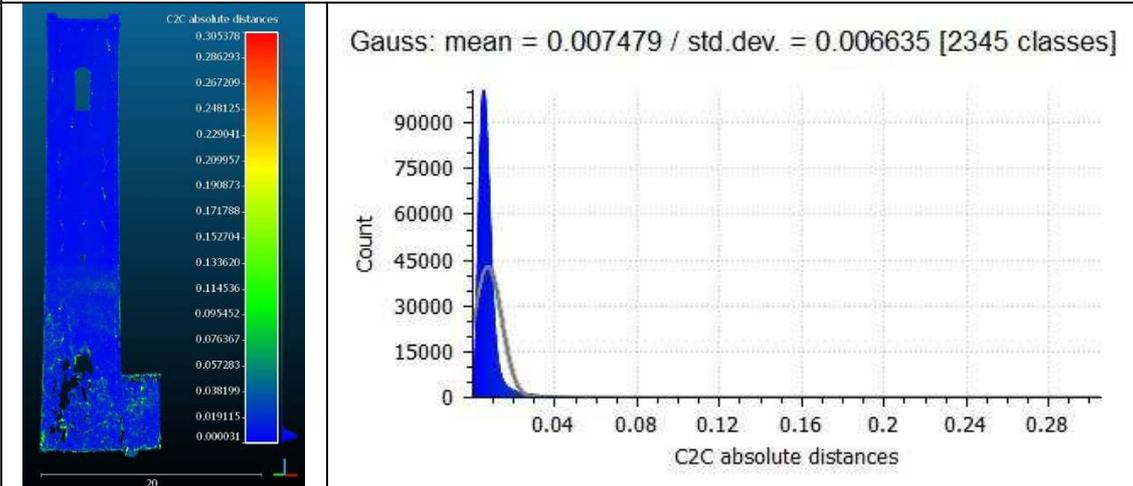
Gauss: mean = 0.017192 / std.dev. = 0.023011 [2034 classes]



4. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre



5. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4



6. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon

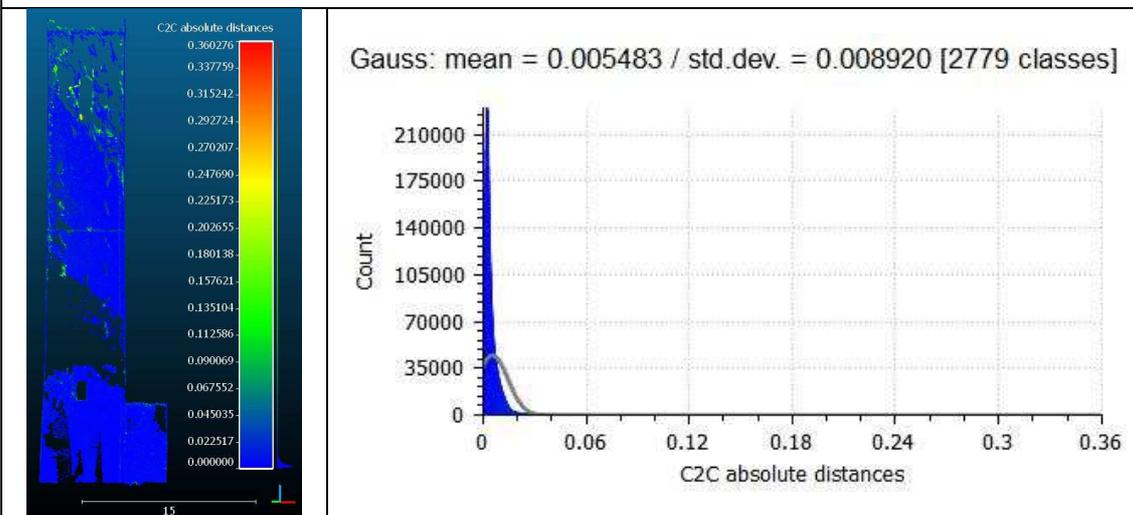
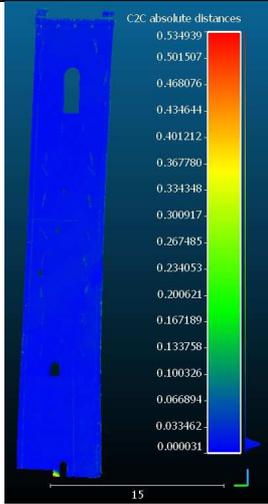


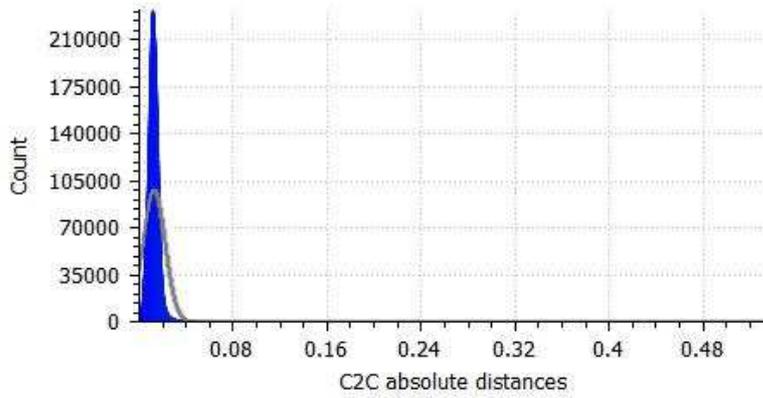
Tabella 53: grafici delle comparazioni tra coppie di nuvole dense per il fronte sud.

Fronte ovest

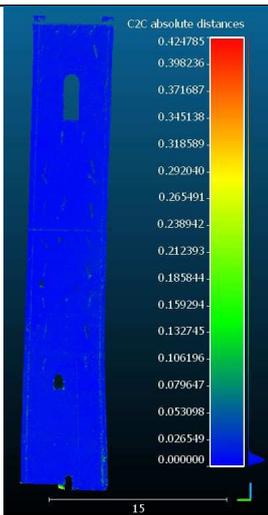
1. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon



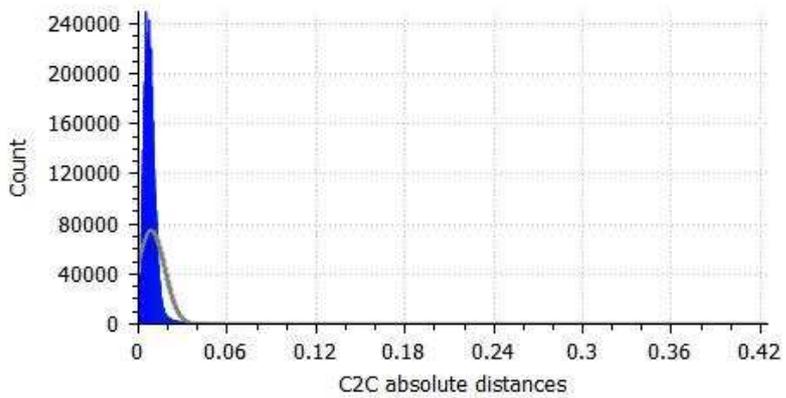
Gauss: mean = 0.012767 / std.dev. = 0.009282 [4286 classes]



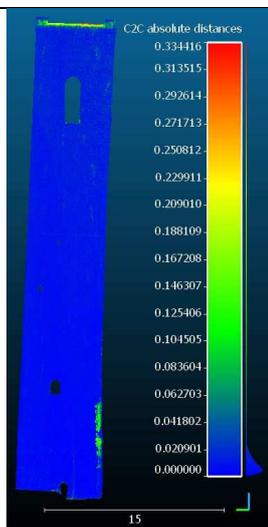
2. Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon



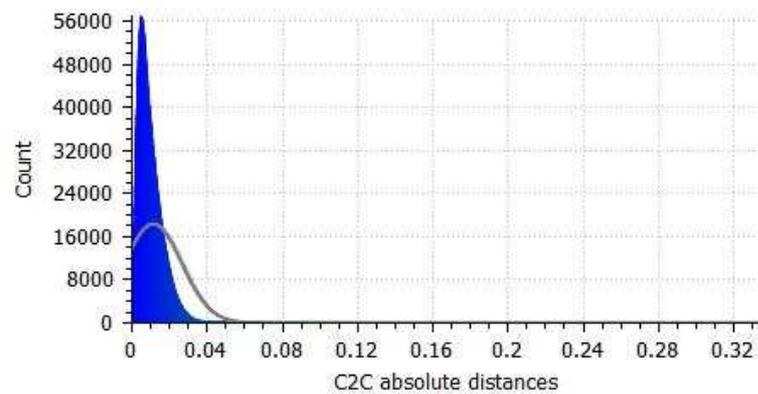
Gauss: mean = 0.008665 / std.dev. = 0.008965 [3976 classes]



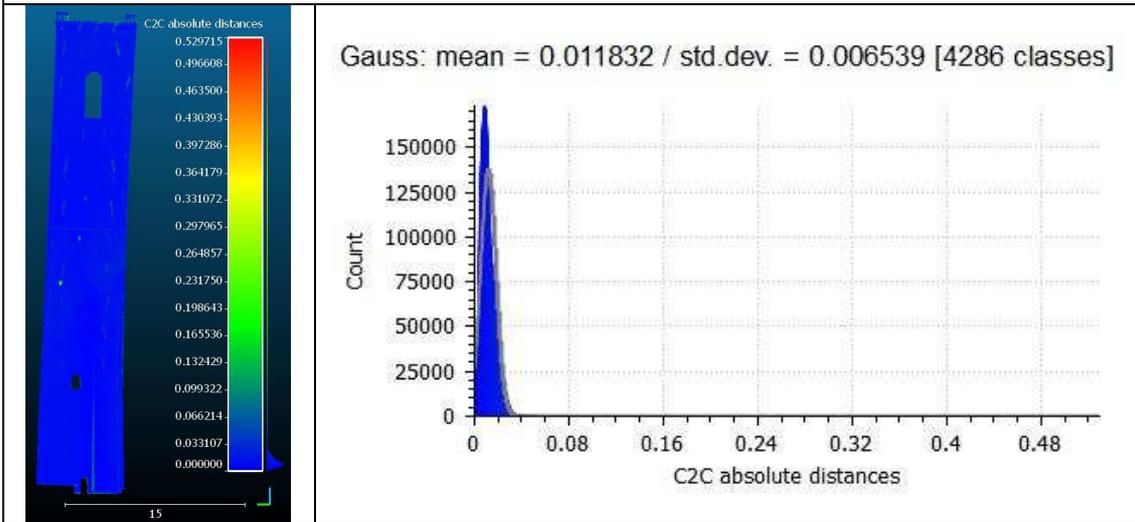
3. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre



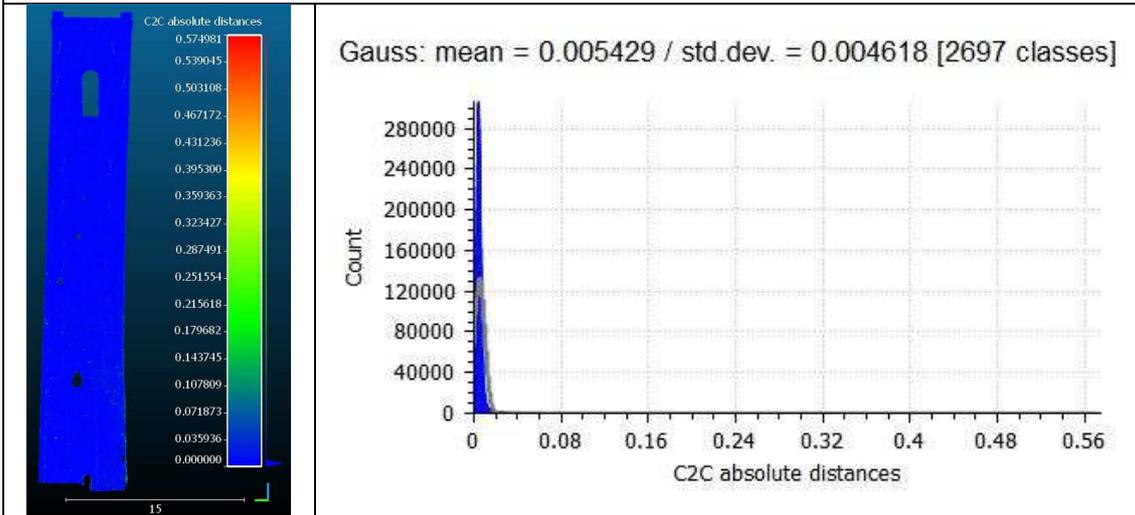
Gauss: mean = 0.011423 / std.dev. = 0.015216 [2097 classes]



4. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre



5. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4



6. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon

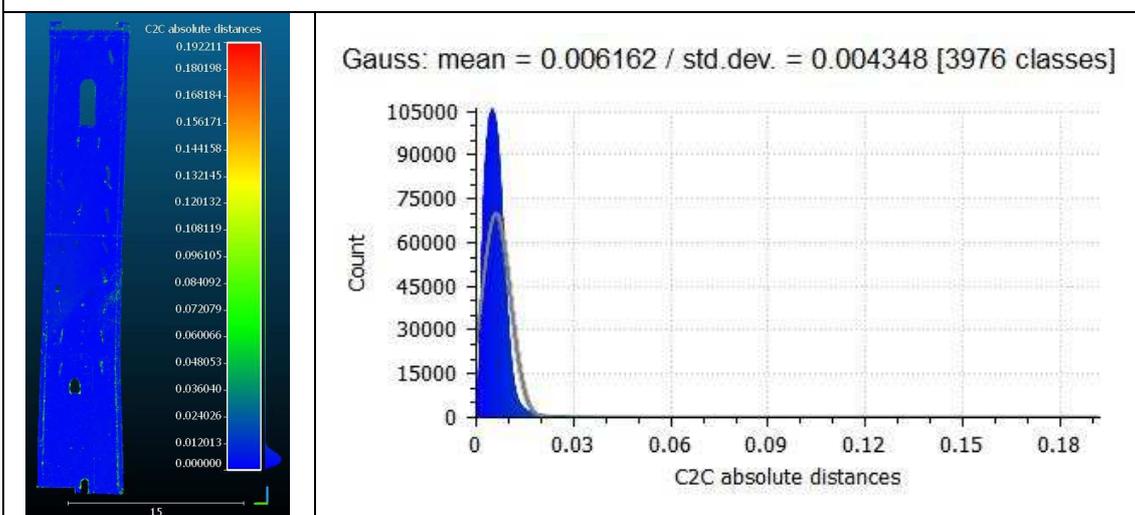
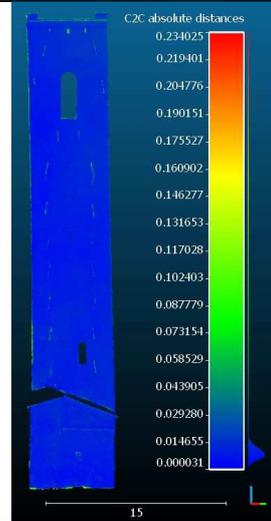


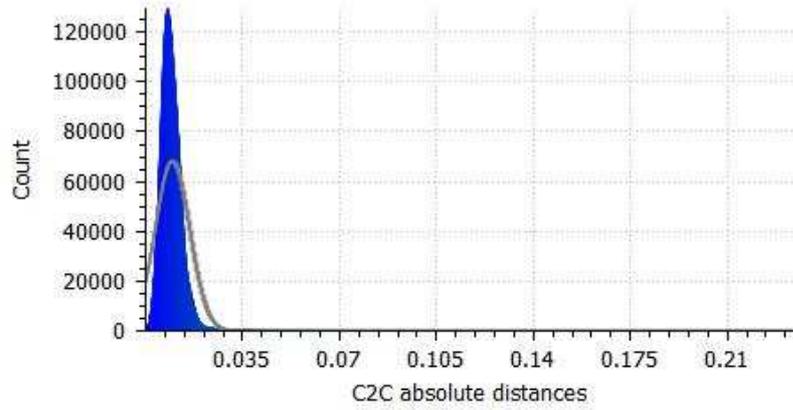
Tabella 54: grafici delle comparazioni tra coppie di nuvole dense per il fronte ovest.

Fronte est

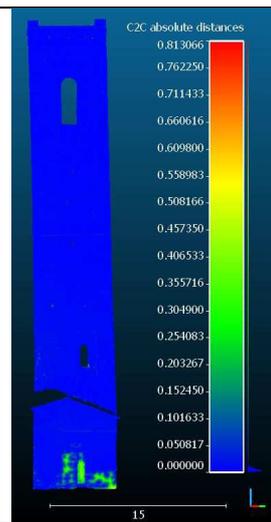
1. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon



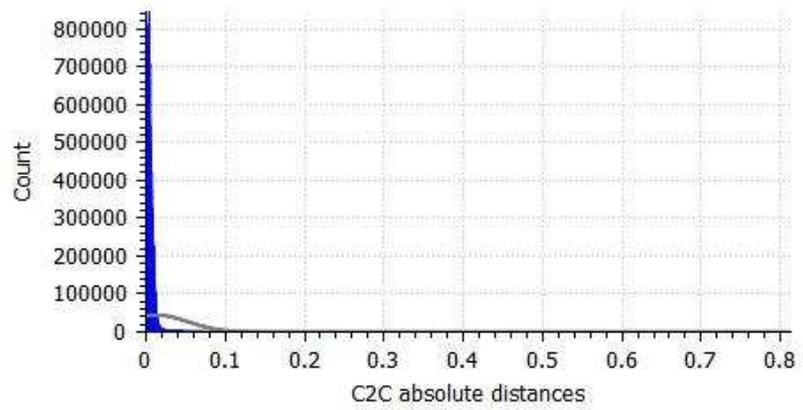
Gauss: mean = 0.009737 / std.dev. = 0.006181 [4527 classes]



2. Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon



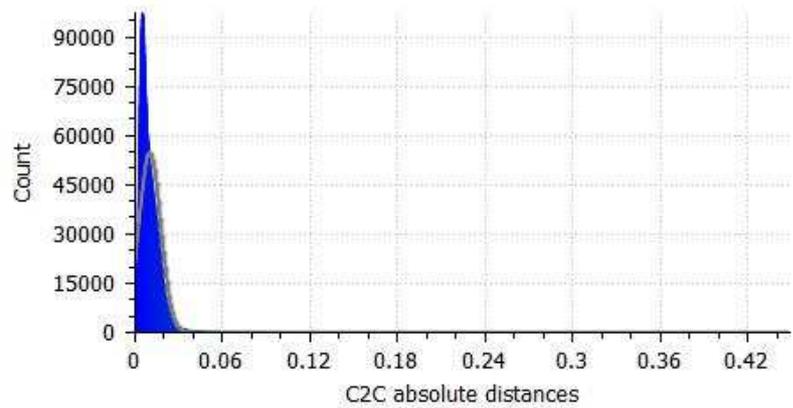
Gauss: mean = 0.013885 / std.dev. = 0.039012 [5327 classes]



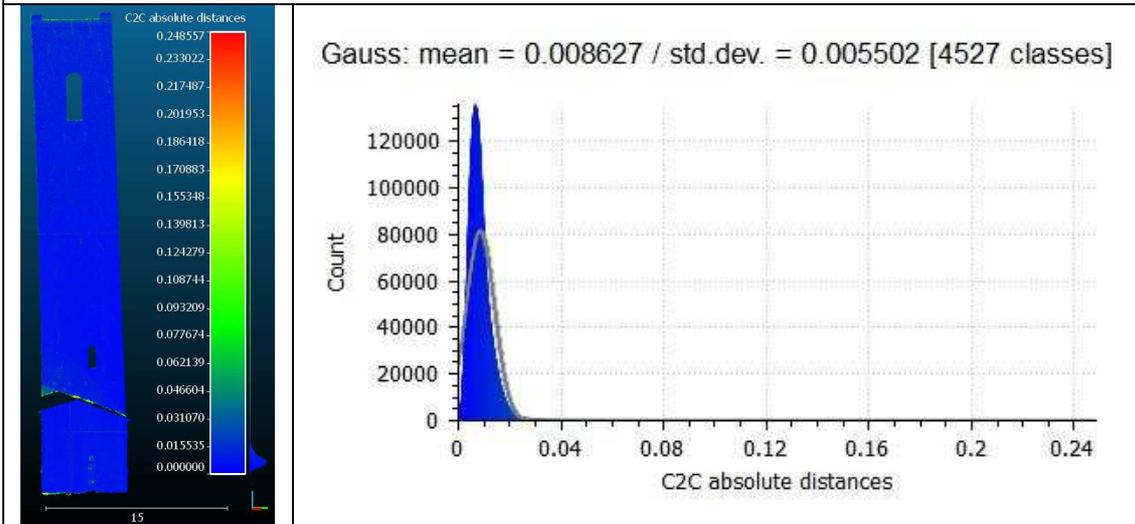
3. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre



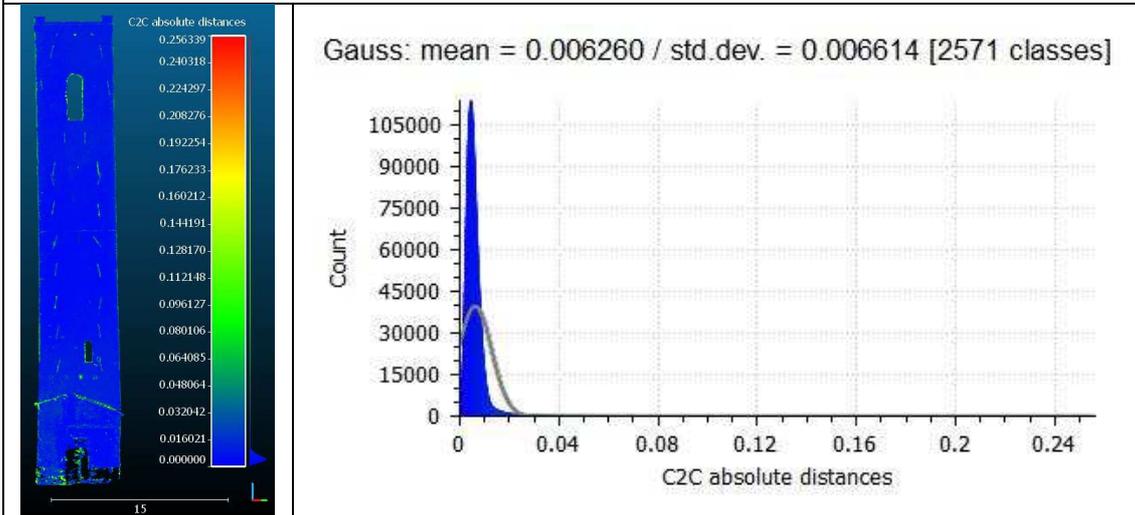
Gauss: mean = 0.010156 / std.dev. = 0.007446 [2281 classes]



4. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre



5. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4



6. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon

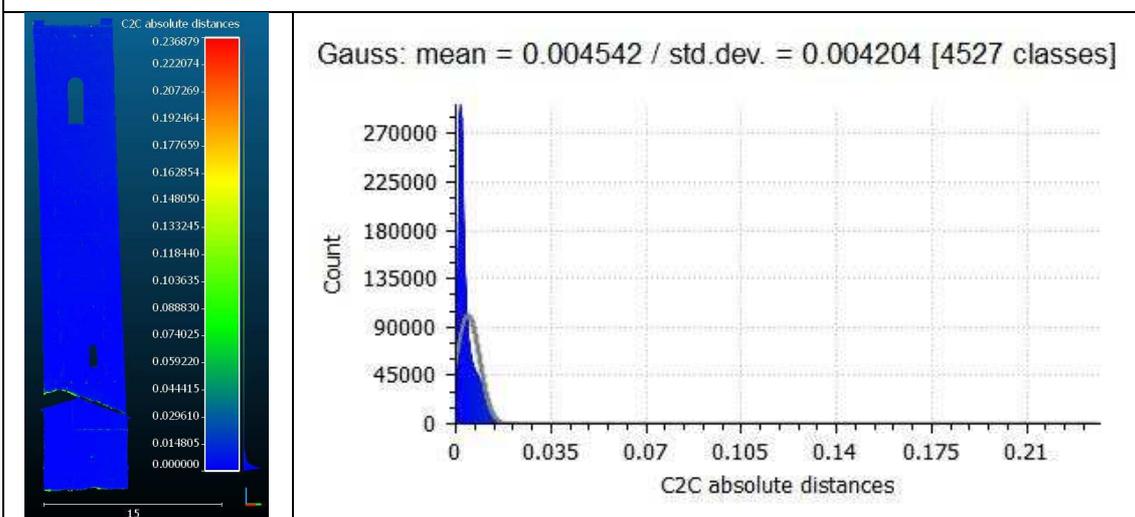


Tabella 55: grafici delle comparazioni tra coppie di nuvole dense per il fronte est.

Fronte nord

<i>Tipologia di elaborazione</i>	<i>Media gaussiana [cm]</i>	<i>Deviazione standard [cm]</i>
1. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon	0,771	0,665
2. Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon	0,606	0,845
3. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre	0,943	0,886
4. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre	0,649	0,577
5. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4	0,607	0,847
6. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon	0,401	0,362

Tabella 56: media gaussiana e deviazione standard delle comparazioni tra coppie di nuvole dense per il fronte nord.

Fronte sud

<i>Tipologia di elaborazione</i>	<i>Media gaussiana [cm]</i>	<i>Deviazione standard [cm]</i>
1. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon	2,402	2,053
2. Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon	4,146	3,820
3. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre	1,719	2,301
4. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre	1,051	0,827
5. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4	0,748	0,664
6. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon	0,548	0,892

Tabella 57: media gaussiana e deviazione standard delle comparazioni tra coppie di nuvole dense per il fronte sud.

Fronte ovest

<i>Tipologia di elaborazione</i>	<i>Media gaussiana [cm]</i>	<i>Deviazione standard [cm]</i>
1. <i>Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon</i>	1,277	0,928
2. <i>Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon</i>	0,867	0,897
3. <i>Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 – Faro SCENE: Laser Scanner terrestre</i>	1,142	1,522
4. <i>Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre</i>	1,183	0,654
5. <i>Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4</i>	0,543	0,462
6. <i>Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon</i>	0,616	0,435

Tabella 58: media gaussiana e deviazione standard delle comparazioni tra coppie di nuvole dense per il fronte ovest.

Fronte est

<i>Tipologia di elaborazione</i>	<i>Media gaussiana [cm]</i>	<i>Deviazione standard [cm]</i>
1. <i>Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon</i>	0,974	0,618
2. <i>Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon</i>	1,389	3,901
3. <i>Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre</i>	1,016	0,745
4. <i>Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre</i>	0,863	0,550
5. <i>Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4</i>	0,626	0,661
6. <i>Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon</i>	0,454	0,420

Tabella 59: media gaussiana e deviazione standard delle comparazioni tra coppie di nuvole dense per il fronte est.

Torre degli smeducci

Tipologia di elaborazione	Media gaussiana [cm]	Deviazione standard [cm]
1. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon	1,356	1,066
2. Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon	1,752	2,366
3. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre	1,205	1,364
4. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Faro SCENE: Laser Scanner terrestre	0,937	0,652
5. Photoscan: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4 - Pix4D: Fotogrammetria da UAV Dji Phantom4	0,631	0,659
6. Photoscan: Fotogrammetria terrestre Nikon - Pix4D: Fotogrammetria terrestre Nikon	0,505	0,527

Tabella 60: media delle medie gaussiane e deviazioni standard delle comparazioni tra coppie di nuvole dense dei quattro fronti.

Le analisi 1 e 2 riguardanti la distanza tra coppie di nuvole elaborate con lo stesso programma, ma con tecniche di rilievo dati fotogrammetrico differente (da UAV e terrestre), hanno fatto registrare i valori massimi di scostamento sia per quanto riguarda la media gaussiana sia per la deviazione *standard*. I valori di scostamento massimo tra le due nuvole sono stati registrati lungo il fronte sud a causa della difficoltà, per entrambi le tecniche, di acquisizione dati con ostacoli limitrofi.

Le analisi 3 e 4 relative alla distanza tra coppie di nuvole ricavate dall'elaborazione di dati acquisiti con tecniche di rilievo differente (*TLS* raffrontata prima con la fotogrammetria da UAV, successivamente con quella terrestre) hanno fatto registrare un maggior scostamento della coppia di nuvole che differiscono per la discordante modalità di presa "aerea - terrestre". Il *trend* è stato pressoché costante per tutti i fronti in questione.

Infine le analisi 5 e 6 inerenti al confronto tra coppie di nuvole elaborate con diversi programmi ma con gli stessi *output* (UAV - UAV e terrestre - terrestre), hanno restituito i valori minimi di scostamento sia per quanto riguarda la media gaussiana sia per la *deviazione standard*. Il *trend* è stato costante e quasi lineare per tutti i fronti in questione, compreso quello sud.

Alla luce di ciò si può asserire che:

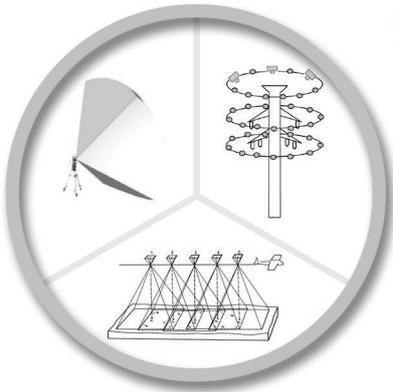
- elaborazioni di dati acquisiti con tecniche di rilievo differenti (per esempio da UAV e terrestri), portano ad un maggiore scostamento dei modelli di *output*, rispetto a quelle di dati acquisiti con tecniche di rilievo simili (per esempio fotogrammetria terrestre e *TLS*), indipendentemente dal programma utilizzato.
- Elaborazioni eseguite con l'uso di differenti *software* commerciali di buona qualità (in questo caso *Agisoft Photoscan* e *Pix4D*) e acquisizioni dati effettuate

con le medesime tecniche di rilievo fotogrammetrico, portano ad un valore di scostamento tra i modelli di *output*, pari a circa 0,007 m, inferiore alla precisione richiesta.

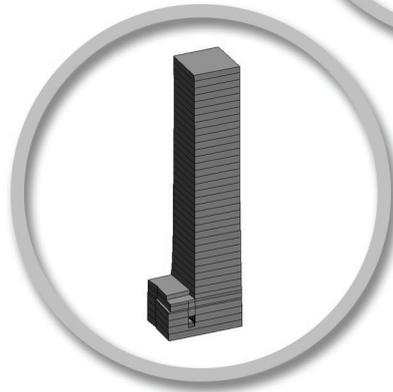
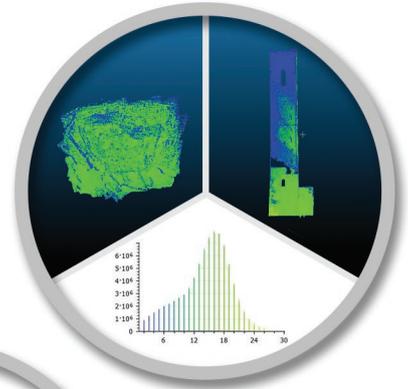
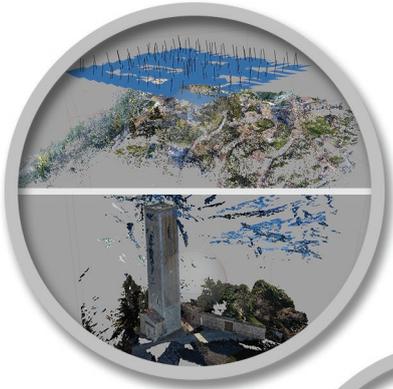
Infine alla luce delle considerazioni finali delle analisi di qualità, precisione e georeferenziazione effettuate sulle nuvole dense di punti è stata creata la seguente matrice:

		1			2			3			4			5		
		G	Q	P	G	Q	P	G	Q	P	G	Q	P	G	Q	P
1	G	=			<			>			<			<		
	Q		=			<			>			>			>	
	P			=			1			3			-			3
2	G	>			=			>			<			<		
	Q		>			=			>			>			>	
	P			1			=			-			5			-
3	G	<			<			=			<			<		
	Q		<			<			=			<			>	
	P			3			-			=			1			2
4	G	>			>			>			=			<		
	Q		<			<			>			=			>	
	P			-			5			1			=			-
5	G	>			>			>			>			=		
	Q		<			<			>			<			=	
	P			3			-			2			-			=

Tabella 61: matrice relazionale delle analisi effettuate sulle seguenti tipologie di elaborazioni di nuvole dense: 1) fotogrammetria aerea - Photoscan, 2) fotogrammetria aerea - Pix4D, 3) fotogrammetria terrestre - Photoscan, 4) fotogrammetria terrestre - Pix4D, 5) tecnica laser scanner - SCENE. Le relazioni sono inerenti a: "G" il livello di georeferenziazione ottenuta, "Q" il livello di qualità raggiunta, "P" la differenza di precisione tra coppie di nuvole di punti. Il numero usati per il campo "P" ha una scala che va da 1 a 5 e serve per definire il più o meno elevato livello di scostamento tra le nuvole dense. La tabella viene letta solamente da sinistra verso destra e non a doppia entrata.



CAPITOLO 6
LA RESTITUZIONE
GRAFICA 2D



Il rilievo ha come fine ultimo la rappresentazione grafica del bene architettonico o della porzione di territorio interessata.

Gli elaborati principali di una costruzione, in un processo di restituzione bidimensionale, sono:

- piante, ovvero proiezioni ortogonali su un piano di riferimento orizzontale, ottenute da una sezione orizzontale dell'oggetto, esaminato ad una quota prestabilita;
- prospetti o alzati, ovvero proiezioni ortogonali su un piano di riferimento verticale;
- sezioni ovvero proiezioni ortogonali su un piano di riferimento di giacitura qualsiasi (generalmente verticale), ottenute dal taglio dell'oggetto da parte di un altro piano, solitamente parallelo al primo, esaminato ad una quota prestabilita.

Ciascun elaborato è riprodotto tenendo conto di una scala grafica consona alle esigenze del fruitore ultimo della documentazione, del rilievo conseguito e delle estensioni del manufatto in sé.

6.1. Restituzione dei prospetti

I dati di input di questa fase sono le Ortofoto dei quattro lati della Torre degli Smeducci prodotti attraverso il software *Agisoft Photoscan*.

Il formato che contraddistingue questa documentazione grafica è di tipo *raster*. Le immagini dovranno perciò essere trasformate in un contenuto vettoriale attraverso un'operazione di vettorializzazione.

Questo procedimento, nella pratica comune, consiste nella conversione delle griglie di *pixel* con informazioni di toni radiometrici, in punti, linee, curve e poligoni descritti attraverso vettori.

Esistono svariati *software* che compiono in automatico questa procedura, nel caso in questione essa è stata eseguita manualmente servendosi dell'utilizzo del programma *AutoCAD* della casa madre *Autodesk*.

AutoCAD è il primo programma di tipo *CAD* che la *software house* ha sviluppato. Il *CAD* o *Computer Aided Design* significa "progettazione assistita dall'elaboratore" e rappresenta la branca dell'informatica volta allo studio e alla formulazione delle tecniche di *computer grafica* a supporto della progettazione o riproduzione compositiva di oggetti reali o frutto dell'intelletto umano.

La versione utilizzata per l'operazione di vettorializzazione è stata *Autocad 2015*.

Per ciascun prospetto è stato creato un singolo *file* di progetto all'interno del quale è stata caricata l'Ortofoto caratteristica.

Il programma si suddivide principalmente in due spazi di lavoro: il primo chiamato “modello”, il secondo chiamato “layout”.

Nello spazio di lavoro modello sono state compiute le operazioni di trasformazione manuale dell’immagine da formato digitale *raster* a vettoriale mediante l’utilizzo delle forme geometriche primitive disponibili, quali linee, polilinee, punti, cerchi, poligoni, ed altre, oltre all’impiego dei comandi di modifica, necessari a completare le giuste forme dell’oggetto rilevato. La forma geometrica più utilizzata è stata la polilinea che ha permesso di unificare molteplicità di dati in un elemento singolo. La determinazione della dimensione degli elementi geometrici (lunghezza dei vettori principalmente sotto forma di linee) è il risultato del livello di dettaglio e di precisione dati dalla scala di rappresentazione scelta e delle dimensioni totali del manufatto da restituire. Troppe linee di discontinuità significherebbero elevate informazioni superflue.

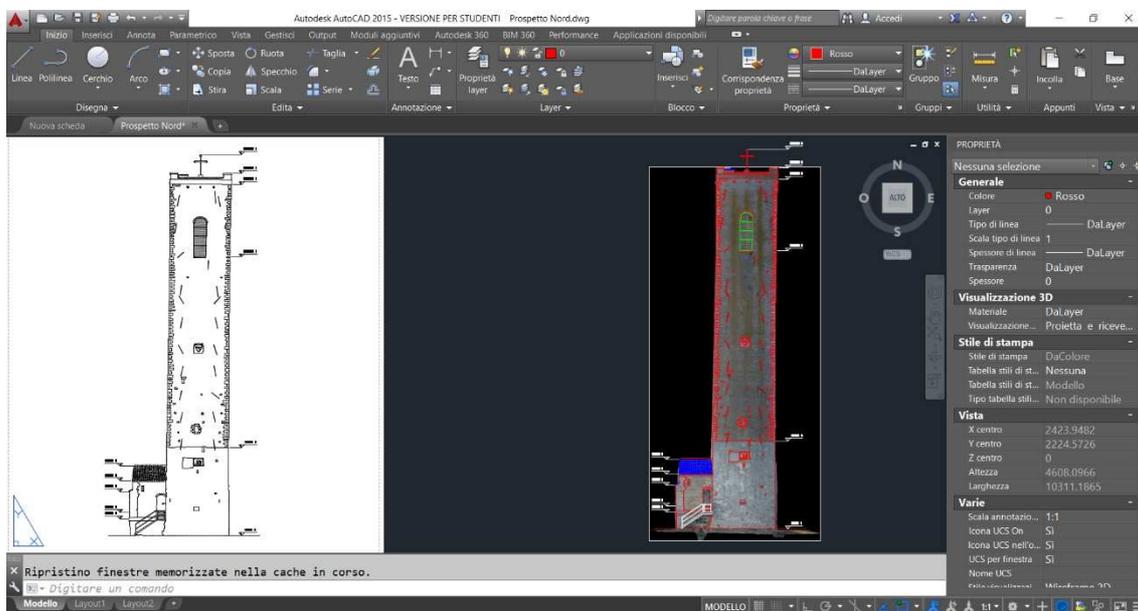


Figura 112: schermata principale del programma Autocad. A sinistra la restituzione del prospetto Nord visualizzato nello spazio layout a destra in quello modello.

Nello spazio di lavoro *layout* è stata impostata la scala di rappresentazione pari a 1:100 oltre alle informazioni relative alla stampa e all’impaginazione dei dati.

Terminata la procedura i prospetti sono stati impaginati con il programma di *computer grafica Adobe Photoshop CC*.

La metodologia utilizzata per vettorializzare i prospetti e impaginarne le tavole grafiche derivanti ha comportato l’impiego di circa 10 ore a prospetto. L’aspetto che inizialmente ha inficiato maggiormente sulle tempistiche è stata la scelta degli elementi da restituire e la modalità di rappresentazione rispetto alla scala stabilita.

6.2. Restituzione delle sezioni

Le sezioni della Torre sono state ottenute utilizzando una vettorializzazione manuale servendosi della nuvola di punti elaborata dal software *ZEB-REVO Desktop*, dopo il rilievo degli ambienti interni all'edificio, svolto con la tecnica *SLAM*.

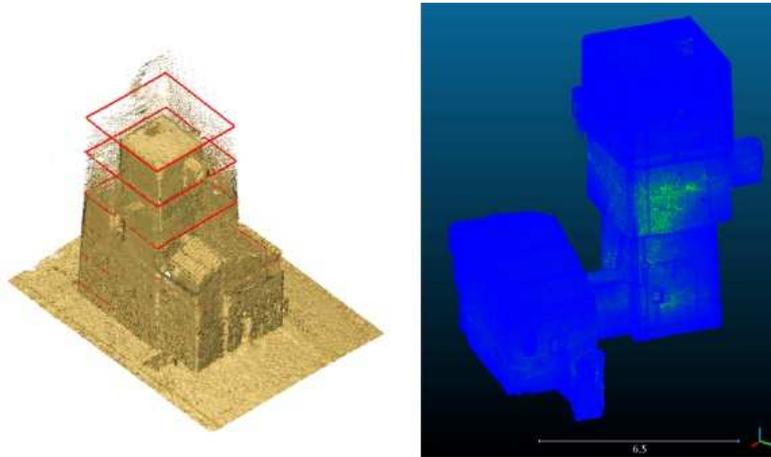


Figura 113: a sinistra nuvola di punti rilevata con la tecnica SLAM allineata con quella rilevata con tecnica fotogrammetrica aerea. A destra presa visione della sola nuvola di punti dei primi due piani interni della Torre.

Come già esposto solo i primi due piani sono stati rilevati con strumentazione *SLAM*. La nuvola di punti che ne è derivata, è stata inizialmente caricata nel programma *3DReshaper*, e in seguito allineata a quella frutto dell'unione di due ulteriori nuvole:

- la prima ricavata dall'elaborazione dei dati acquisiti con tecnica fotogrammetrica terrestre, con un'estensione che va dal livello a quota zero, imposto a 342,38 m, fino a 10 m circa di altezza;
- la seconda ricavata dall'elaborazione dei dati acquisiti con tecnica fotogrammetrica da drone, dai 10 m circa fino alla copertura, più la copertura del fabbricato basso addossato sul fianco Est del corpo principale.

Questa suddivisione è stata effettuata in seguito alle considerazioni estrapolate dalle analisi di qualità compiute sulle nuvole dense.

Successivamente le tre nuvole sono state unite in un unico file di formato *.las* ed esportate.

A questo punto è stato utilizzato il programma *PointCab* per poter ottenere le sezioni della Torre sotto formato *raster*.

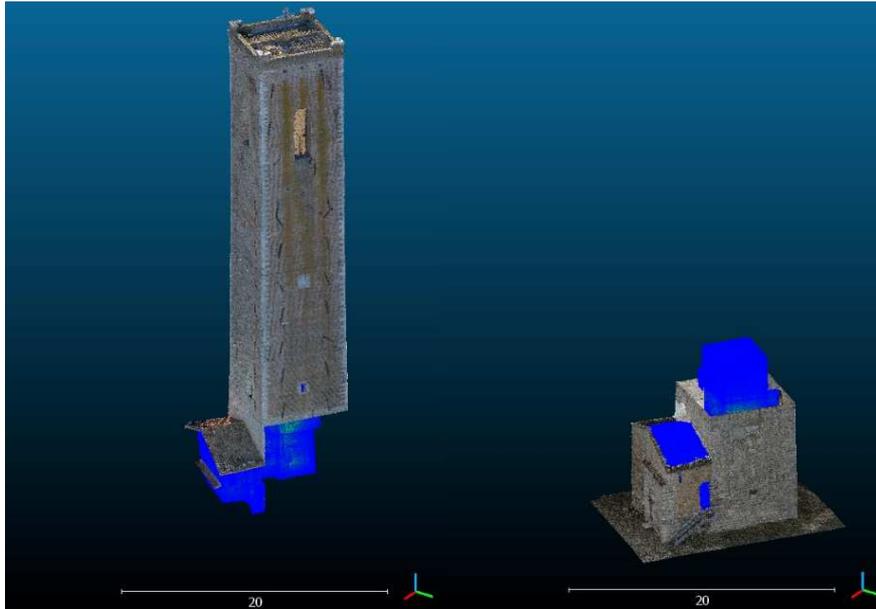


Figura 114: a sinistra la parte di nuvola densa ottenuta da fotogrammetria da drone, a destra quella ottenuta da fotogrammetria terrestre. In blu la nuvola di punti rilevata con la tecnica SLAM.

Il programma permette di visualizzare il dato inserito, in questo caso la nuvola densa di punti della Torre, in tre finestre differenti. La prima restituisce una vista in pianta dell'oggetto, la seconda e la terza rispettivamente le viste longitudinali e trasversali. Ciascuna di esse può essere utilizzata per tracciare dei piani di sezione rettilinei a seconda della posizione e del numero di elaborati che si vuole ottenere.

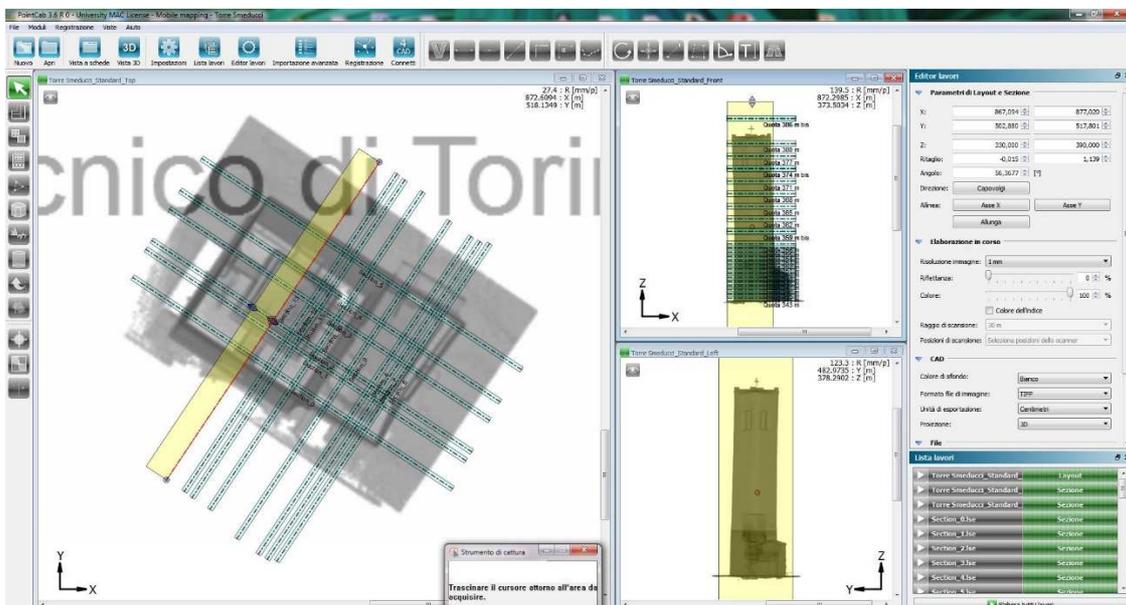


Figura 115: schermata principale di un progetto di lavoro del programma PointCab.

Nel box di dialogo presente a destra della schermata principale del programma possono essere svolte le seguenti funzioni:

- impostazione dei piani di sezione tramite l'utilizzo di coordinate X, Y, Z (corrispondenti in questo caso a E, N, Q);
- impostazione dei file di output tra cui la definizione del formato;
- avvio dell'elaborazione dei file di output.

PointCab permette di generare file in formato .dwg e .tif in maniera tale da poter importare in AutoCAD le sezioni impostate.

Il file .dwg generato, contiene al proprio interno un insieme di immagini .tif (tiles) di dimensioni 1x1 m georiferite, che disposte ordinatamente, compongono l'intera sezione creata.

Con PointCab sono state generate due sezioni, una longitudinale e l'altra trasversale.

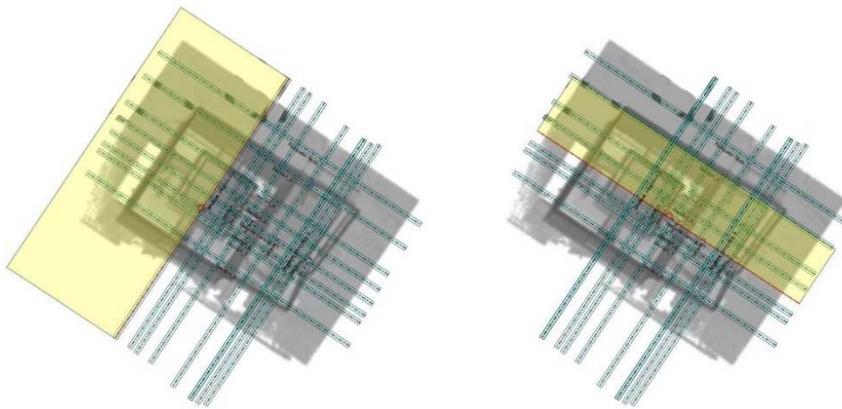


Figura 116: visualizzazione delle due sezioni, longitudinale e trasversale, generate con PointCab.

Dopo averle caricate in AutoCAD, è stata compiuta l'operazione di vettorializzazione, tenendo conto della scala di rappresentazione 1:100.

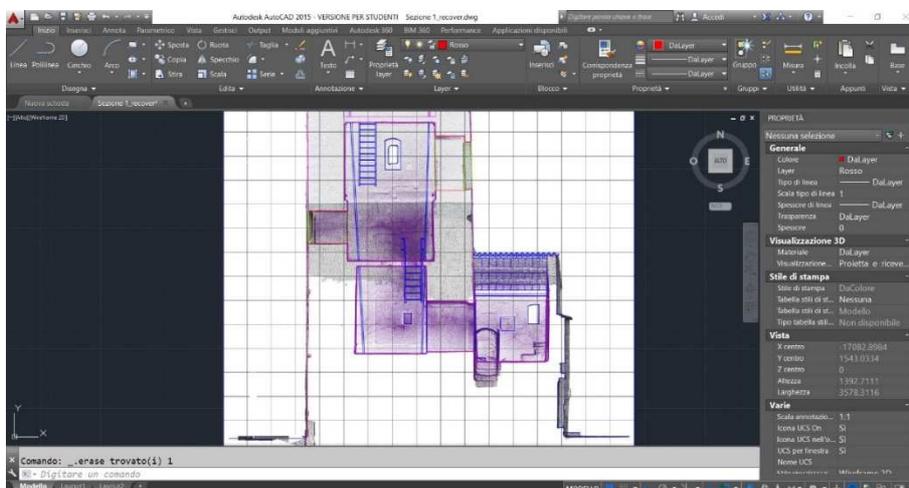


Figura 117: operazione di vettorializzazione in Autocad delle sezioni create con il software PointCab.

Successivamente, per poter restituire le porzioni della Torre inerenti ai quattro piani mancanti, al *file* di progetto di *AutoCAD* sono state aggiunte le informazioni derivanti dal rilievo eseguito con longimetro il 30 maggio 2017.

Terminata la procedura anche le sezioni sono state impaginate con il programma di *computer grafica Adobe Photoshop CC*.

In questo caso, la metodologia utilizzata per la vettorializzazione e impaginazione delle sezioni ha comportato l'impiego di circa 20 ore a sezione. Gli aspetti che hanno inficiato maggiormente sulle tempistiche sono stati: la scelta degli elementi da restituire, la modalità di rappresentazione rispetto alla scala stabilita e soprattutto l'integrazione tra loro di più tecniche di rilievo.

6.3. Restituzione delle piante

La realizzazione delle piante della Torre degli Smeducci è stata compiuta anch'essa sulla nuvola di punti acquisita con la tecnica *SLAM* e sulle due nuvole derivanti dai processi fotogrammetrici.

Attraverso il *file* di progetto di *PointCab*, creato per estrarre inizialmente le sezioni, sono stati creati due piani ortogonali alla torre alle quote 347 m e 353 m, relative rispettivamente al primo e secondo piano fuori terra. Per ciascun livello sono stati generati i *file .dwg* da importare in *AutoCAD* per eseguire la vettorializzazione secondo la scala di rappresentazione 1:100.

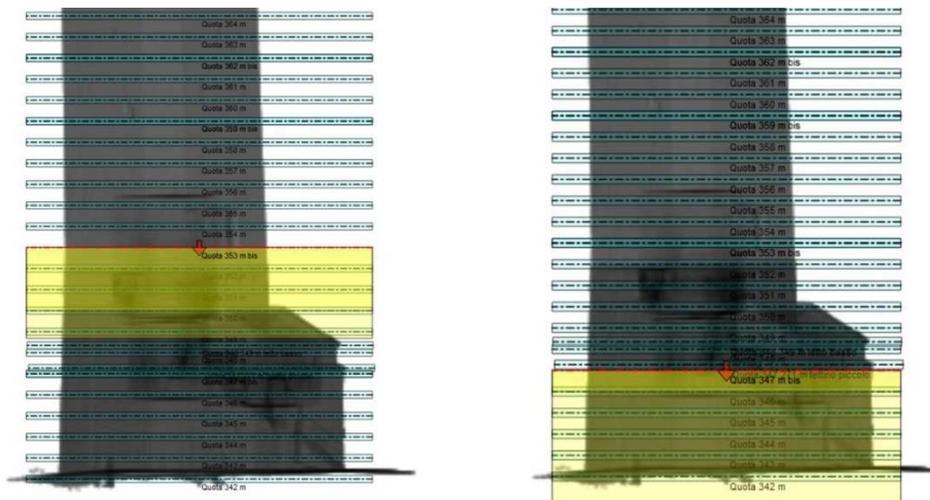


Figura 118: visualizzazione delle due sezioni ortogonali estrapolate da *PointCab*.

I restanti livelli, riguardanti gli altri quattro piani della Torre, non sono stati restituiti a causa della mancanza di informazioni geometriche e metriche in pianta.

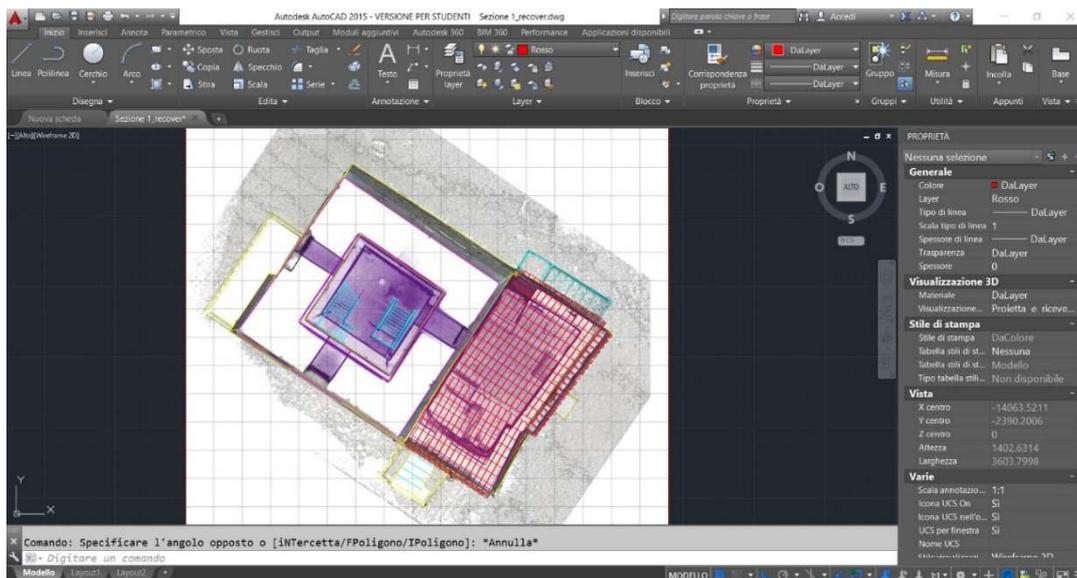


Figura 119: operazione di vettorializzazione in Autocad delle piante create con il software PointCab.

Conclusasi la vettorializzazione, le piante sono state impaginate con il programma di computer grafica *Adobe Photoshop CC*.

La metodologia utilizzata per vettorializzare e impaginare le sezioni ha comportato l'impiego di circa 10 ore a pianta. Gli aspetti che hanno inficiato maggiormente sulle tempistiche sono stati sempre: la scelta degli elementi da restituire, la modalità di rappresentazione rispetto alla scala stabilita e soprattutto l'integrazione tra loro di più tecniche di rilievo.

6.4. Mappatura dello stato di degrado per un ipotetico studio del restauro

*"...Il restauro costituisce il momento metodologico del riconoscimento dell'opera d'arte, nella sua consistenza fisica e nella sua duplice polarità estetica e storica, in vista della sua trasmissione al futuro."*¹⁵²

Con queste parole Cesare Brandi fornisce una definizione sulla tematica del restauro, disciplina alquanto discussa nel corso del XIX e XX secolo a seconda della corrente di pensiero di provenienza. Le sue riflessioni inerenti alla sinergia inscindibile tra l'enunciazione di opera d'arte e quella di restauro hanno portato alla formulazione di un documento chiamato "Carta italiana del Restauro" del 1972 volto all'elaborazione di principi e prescrizioni indirizzati alla guida dei professionisti.

Si parla dunque di restauro nel momento in cui la l'intera collettività, nel momento di necessità, riconosce come opera d'arte il prodotto di un'attività umana.

¹⁵² C. BRANDI, *Teoria del restauro*, Einaudi, Torino, 1977, op. cit. p. 6.

La finalità delle operazioni volte a ripristinare l'opera sono da ricercarsi nel solo obiettivo di trasmissione al futuro, ovvero a garantire nel tempo, per quanto si possa, le originarie funzionalità storiche, estetiche e strutturali.

Per raggiungere ciò “...la consistenza fisica dell'opera deve necessariamente avere la precedenza, perché rappresenta il luogo stesso della manifestazione dell'immagine”.¹⁵³

La consistenza fisica si suddivide però in due aspetti l'uno indipendente dall'altro: la materia con cui l'opera d'arte trasmette la propria immagine nel tempo e la materia che ne rappresenta il supporto fisico a cui aggrapparsi e ne garantisce la stabilità e solidità strutturale.

Da qui deriva un'importante riflessione che implica differenti tipologie di approccio di intervento a seconda dei due differenti aspetti della materia che si possono incontrare in campo analitico e progettuale.

Nonostante ciò Brandi sostiene infine che “...si restaura solo la materia dell'opera d'arte”¹⁵⁴, lasciando da parte qualsiasi velleità relativa ad aggiunte personali che possano ricreare falsi storici.

Per intraprendere uno studio e successivamente un intervento di restauro bisogna possedere una sufficiente conoscenza della conformazione geometrica del manufatto, ma soprattutto della materia che lo compone. Sarà dunque fondamentale che l'operatore intraprenda approfonditi studi e analisi inerenti alle tipologie costruttive e ai materiali impiegati, sia quelli esistenti per garantire il sostegno, sia quelli presenti per connotare esteticamente l'opera.

Altro passo importante nella conoscenza della materia, unico elemento restaurabile, è lo studio spaziale e temporale del prodotto umano in questione.

Da questo studio esce fuori un aspetto da tenere in considerazione durante le operazioni sopra citate, ovvero il restauro di ripristino. Esso non potrà mai essere perpetrato nel caso di manufatti che abbiano subito modifiche che col passare del tempo li hanno portati ad una nuova concezione artistica riconosciuta dalla collettività. In caso contrario il ripristino resta una pratica pur sempre complessa, sconsigliabile in qualsiasi circostanza a causa della possibile insorgenza di restauri di fantasia.

6.4.1. Le mappature del degrado

“...La lettura geometrica dell'architettura ha come oggetto tanto le semplici 'figure' che governano la regolarità del disegno, quanto le deformazioni e le trasgressioni che negano quelle regolarità, aprendo interrogativi sulle ragioni 'intenzionali' o 'accidentali'”

¹⁵³ ibidem, cit.

¹⁵⁴ ivi, cit. p. 7.

*che possono averle provocate*¹⁵⁵. E' dunque a partire dalla lettura che le 'geometrie' e le 'figure' alterate possono essere individuate sul tessuto compositivo del manufatto.

La lettura deve essere accompagnata da un sistema univoco e inequivocabile volto alla descrizione grafica. Viene perciò identificato un telaio di base da cui partire per apporci sopra le informazioni acquisite visivamente.

Il telaio appena citato può essere rappresentato dai classici elaborati grafici bidimensionali, o dalla restituzione grafica tridimensionale, che con l'utilizzo di modelli parametrici e l'implementazione di sistemi di interoperabilità con altri modelli numerici o *database* creati ad hoc permette una più vasta catalogazione delle informazioni, permettendone la gestione e modifica programmata nel tempo a venire.

Le informazioni da apporre sul 'telaio' grafico devono dunque essere codificate secondo delle regole comuni a tutti gli operatori del settore. In Italia, per esempio, la norma che regola il linguaggio grafico e dei termini da utilizzare per le alterazioni della materia è la *UNI 11182/2006* intitolata "*Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Descrizione della forma di alterazione - Termini e definizioni*".

Le 'geometrie' e le 'figure' alterate diventano con questa norma a tutti gli effetti delle patologie di degrado interessanti porzioni più o meno estese della materia del manufatto.

La *UNI 11182/2006* affronta il discorso patologico dal solo punto di vista macroscopico (a occhio nudo), tralasciando l'analisi chimica e fisica della materia degradata.

Per questo motivo l'approccio che si esegue seguendo la suddetta norma è di tipologia prettamente descrittiva e non analitico-strumentale. Perciò risulta essere un'anamnesi patologica prossima.

La descrizione dello stato di fatto del degrado interessante la materia dell'opera è rappresentata quindi da mappature eseguite sul rilievo geometrico-architettonico restituito. Esistono differenti varietà di mappature che si possono implementare in un elaborato grafico, esse nel campo della descrizione architettonica, possono riguardare:

- la composizione materica;
- la composizione dei sistemi costruttivi;
- la composizione dei colori;
- le apposizioni decorative;
- le unità stratigrafiche;
- le tecniche di posa in opera;
- i fenomeni di degrado.

Passo ultimo per concretizzare una mappa tematica sta nel collegare, a qualsiasi elemento letto visivamente, una rappresentazione specifica, frutto della propria azione

¹⁵⁵ B. P. TORSELLO, *La materia del restauro*, Marsilio, Venezia, 1988, op. cit. pag. 128.

intellettuale. Si cerca dunque di visualizzare un sapere, più che rappresentare ciò che è già noto e immediatamente percepibile.

La mappatura portata avanti è quella inerente ai fenomeni di degrado previo studio delle tipologie di materiali che compongono l'ossatura portante esterna della Torre e di quelli che ne completano la funzionalità pratica e l'essenza ornamentale.

6.4.2. Analisi dei principali materiali e dei sistemi costruttivi della Torre

La lettura e consecutiva descrizione dei materiali e dei sistemi costruttivi, impiegati per la realizzazione in epoca medioevale e per le modifiche susseguitesi nel corso dei secoli, è stata compiuta sui quattro prospetti estrapolati dall'elaborazione dei dati rilevati con i processi fotogrammetrici.

Del corpo principale è emerso che:

- la struttura muraria, che si estende dalla base della Torre fino ad un'altezza media di 10 metri circa, è composta da pietra conca tenuta legata da malta di spessore variabile da 1 a 3 cm circa. L'eterogeneità dello spessore della malta è da imputarsi alla differente tipologia di forma e di pietra utilizzata nei quattro prospetti.



Figura 120: muratura in pietra conca.

- La struttura muraria, che si estende da circa 10 metri di altezza della Torre fino alla sommità, è composta mattoni pieni tenuti legati da malta di spessore variabile da 1 a 2 cm circa. Immorsati nella muratura, si alternano mattoni stracotti con un passo più o meno regolare.



Figura 121: muratura in mattoni pieni.

- Lungo i quattro spigoli della muratura in mattoni sono presenti cantonali in pietra concia.



Figura 122: cantonale in pietra concia.

- Per ciascun prospetto sono presenti numerose chiavi come risultato di una chiusura del sistema di tiranti interni alla struttura portante della Torre.



Figura 123: chiave a chiusura del sistema di tiranti interni alla struttura portante.

- Per ogni lato della Torre, nei pressi della sommità, sono presenti tre doccioni ciascuno dei quali costituito da una coppia di coppi.



Figura 124: doccioni composti da coppie di coppi.

- Per ciascun dei quattro vertici della Torre è presente un merlo guelfo d'angolo in muratura di mattoni pieni e mensola terminale in pietra concia.



Figura 125: merlo guelfo.

- Copertura in coppi con comignolo per il passaggio di persone per la manutenzione della sommità della torre e croce in ferro battuto posta centralmente.



Figura 126: copertura in coppi.

- Per ciascun prospetto, lungo una fascia di circa 6 m di altezza (dai 10 m ai 16 m circa), sono presenti buche pontai.



Figura 127: buche pontai.

- Per ciascun prospetto, in corrispondenza dell'ultimo piano della Torre, ad un'altezza di circa 30 m dal livello di riferimento, sono presenti delle aperture composte da un arco a tutto sesto e chiuse da una grata in ferro a maglie strette.



Figura 128: una delle quattro aperture dell'ultimo piano della Torre.

- Per ciascun prospetto, per ciascun piano di calpestio della Torre, sono presenti aperture minori, alcune terminanti con piattabanda costituita da singolo blocco in pietra, altre le più ampie, con archi a tutto sesto o sesto acuto chiuse da grata in ferro a maglie strette.
- Nel metà di destra del prospetto Ovest è presente una scarpa in muratura di pietra conca.
- Nel prospetto Est è presente un ingresso al piano ammezzato della Torre composto da un'apertura terminante con una coppia di archi a sesto acuto in pietra e chiusa da un infisso ligneo.

Del corpo secondario, quello addossato alla Torre, è emerso che:

- la struttura muraria è composta:
 - per il lato posto a Nord e la parte destra di quello posto a Est, da pietra conca nella parte bassa e da mattoni pieni in quella superiore. Nel primo caso la separazione tra i due materiali è dovuta dalla presenza di una mensola aggettante in blocchi di pietra conca, nel secondo caso dalla presenza di una piccola tettoia.
 - per il lato posto a Sud e la parte sinistra di quello posto a Est, da mattoni pieni misti a pietra conca, localizzata principalmente nella parte bassa.
- è chiuso da una copertura in coppi.

- sono presenti, lungo i tre lati che lo compongono, tre ingressi, due conducono ai piani interrati e ammezzati della torre e una al primo piano attraverso l'utilizzo di una scala in acciaio di recente fattura.

6.4.3. Approccio seguito per la mappatura delle patologie di degrado

Anche la lettura delle patologie di degrado interessanti la Torre degli Smeducci, è stata compiuta sui quattro prospetti estratti dall'elaborazione dei dati rilevati con i processi fotogrammetrici. Il frutto della lettura è stata la realizzazione di una mappatura del degrado. Non sempre è stata agevole l'identificazione istantanea di tutti i degradi, questo perché a volte si presentano associati ad altri o ne dipendono in maniera diretta concatenandosi l'uno all'altro.

Per poter restituire la mappatura è stata seguita la norma UNI 11182/2006 grazie alla quale sono state identificate cinque differenti tipologie di degrado:

1. Colatura: *“Traccia ad andamento verticale. Frequentemente se ne riscontrano numerose ad andamento parallelo”*¹⁵⁶.



Figura 129: colatura in corrispondenza dell'apertura Sud dell'ultimo piano della Torre.

Questo degrado è stato riscontrato in tutti e quattro i prospetti, principalmente nelle zone sottostanti ai parapetti delle grandi aperture dell'ultimo piano della Torre e ad alcune chiavi o aperture minori.

2. Colonizzazione biologica: *“presenza riscontrabile macroscopicamente di micro e/o macro organismi (alghe, funghi, licheni, muschi, piante superiori)”*¹⁵⁷. Nella circostanza specifica sono stati riscontrati soltanto casi di patina biologica, in altre parole quello *“strato sottile ed omogeneo, costituito prevalentemente da microrganismi, variabile per consistenza, colore e adesione al substrato”*¹⁵⁸.

¹⁵⁶ AA.VV., *Norma UNI 11182, 2006*, op. cit. pag. 4.

¹⁵⁷ ibidem, op. cit.

¹⁵⁸ ivi, op. cit. pag. 26.



Figura 130: patina biologica nel prospetto Nord della Torre.

Questo degrado è stato riscontrato in tutti i prospetti, principalmente in tutte quelle zone esposte allo stillicidio o al convogliamento non regolato o mal progettato delle acque piovane. Risultano interessate dunque le seguenti aree:

- quelle sottostanti i doccioni;
- quelle sottostanti le chiavi in ferro;
- quelle sottostanti alle aperture, principalmente quelle dell'ultimo piano;
- quelle sottostanti al cornicione in mattoni pieni sulla sommità della Torre;
- quelle sottostanti le mensole in pietra conca dei merli.

3. Disgregazione: *“Decoesione con caduta del materiale sotto forma di polvere o minutissimi frammenti. Talvolta viene utilizzato il termine polverizzazione”*¹⁵⁹.

Questo degrado è stato riscontrato in modo limitato ai singoli elementi di pietra conca degli spigoli della torre o a quelli della muratura in mattoni pieni o in pietra.



Figura 131: disgregazione di un singolo conco.

¹⁵⁹ ivi, op. cit. pag. 11.

4. Efflorescenza: *“Formazione superficiale di aspetto cristallino o polverulento o filamentoso, generalmente di colore biancastro”*¹⁶⁰.

Questo degrado è stato localizzato principalmente affianco o inglobato alle zone già interessate dalle patologie ‘colatura’ e ‘patina biologica’.



Figura 132: efflorescenza lungo la parete muraria in mattoni pieni del prospetto Ovest.

5. Fessurazione: *“Soluzione di continuità nel materiale che implica lo spostamento reciproco delle parti”*¹⁶¹.



Figura 133: fessurazione lungo la parete muraria in pietra del prospetto Sud.

Questo degrado è stato localizzato in tutti i prospetti della Torre. Si mostra particolarmente diffuso nei prospetti Sud e Ovest, lati verso i quali l’edificio tende a presentare una maggiore pendenza.

Completata la procedura di vettorializzazione delle patologie sono stati raccolti i valori delle aree di ogni singola superficie in tabelle di *Excel* suddivise per tipologia di degrado e per prospetto (le tabelle vengono inserite come documenti allegati). Qui di seguito viene riportata la tabella riassuntiva dei valori totali delle superfici delle patologie di degrado su cui dover intervenire e due tabelle comprendenti diverse tipologie di

¹⁶⁰ *ivi*, op. cit. pag. 13.

¹⁶¹ *ivi*, op. cit. pag. 17.

incidenze percentuali, delle lavorazioni da effettuare, rispetto ad ogni prospetto o alla totalità degli interventi da compiere sulla Torre degli Smeducci.

Tipologia prospetto	Colatura [m²]	Colonizzazione biologica [m²]	Disgregazione [m²]	Efflorescenze [m²]	Totale interventi [m²]
Nord	3,3445	45,3054	0,0296	1,9305	50,6100
Sud	0,7388	8,8995	0,0749	0,8109	10,5241
Ovest	3,4049	1,5661	0,1993	0,9017	6,0720
Est	6,7555	2,8675	0,1791	0,2708	10,0729
TOT. [m²]	14,2437	58,6385	0,4829	3,9139	77,2790

Tabella 62: valori totali di area delle differenti tipologie di degrado e degli interventi da eseguire.

Tipologia prospetto	Colatura [m²]	Colonizzazione biologica [m²]	Disgregazione [m²]	Efflorescenze [m²]	Totale interventi [m²]
Nord	6,61%	89,52%	0,06%	3,81%	100,00%
Sud	7,02%	84,56%	0,71%	7,71%	100,00%
Ovest	56,08%	25,79%	3,28%	14,85%	100,00%
Est	67,07%	28,47%	1,78%	2,69%	100,00%
TOT. [m²]	18,43%	75,88%	0,62%	5,06%	100,00%

Tabella 63: incidenze percentuali di ciascuna patologia di degrado rispetto alla totalità degli interventi. Analisi effettuata per ciascun prospetto e per l'intero edificio.

Tipologia prospetto	Colatura [m²]	Colonizzazione biologica [m²]	Disgregazione [m²]	Efflorescenze [m²]	Totale interventi [m²]
Nord	23,48%	77,26%	6,13%	49,32%	65,49%
Sud	5,19%	15,18%	15,51%	20,72%	13,62%
Ovest	23,90%	2,67%	41,27%	23,04%	7,86%
Est	47,43%	4,89%	37,09%	6,92%	13,03%
TOT. [m²]	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tabella 64: incidenze percentuali di ciascun prospetto rispetto alla totalità degli interventi. Analisi effettuata per ciascuna patologia di degrado o complesso totale delle patologie.

Anche le fessurazioni evidenziate in ciascun prospetto sono state archiviate in un *file Excel*. Il *file* viene inserito come allegato e permette di catalogare tutte le fratture, identificando le seguenti caratteristiche:

- nominativo ID con relativa codifica ("Nn" dove "N" è una lettera che dipende dal prospetto analizzato e "n" è un numero progressivo che varia al variare del numero delle fratture presenti in ciascun prospetto);
- eventuali ramificazioni con relativa codifica ("- " per fessurazioni composte da un unico tratto, "Cn" per le parti in comune e "Rn" per ramificazioni distinte della stessa fessurazione, con "n" un numero progressivo);

- tipologia di fessurazione con relativa codifica (“R” per individuare tratti visibili di vecchie fessurazioni ricucite da malta in interventi precedenti, “N” per individuare tratti di nuove fessurazioni, presumibilmente formatesi in seguito alle azioni telluriche dell’ultimo evento sismico);
- lunghezza di ciascun tratto di fessurazione.

Di seguito viene esposta una tabella comprensiva delle lunghezze totali delle fessurazioni mappate sui prospetti.

Tipologia prospetto	Totale [m]
<i>Nord</i>	3,2817
<i>Sud</i>	35,5267
<i>Ovest</i>	37,8294
<i>Est</i>	11,5731
TOT. [m]	88,2109

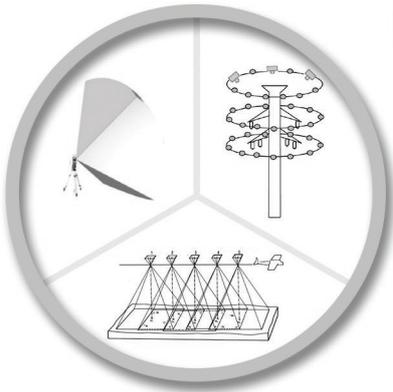
Tabella 65: lunghezze totali delle fessurazioni.

L’esecuzione della vettorializzazione della mappatura delle patologie di degrado, l’analisi delle superfici e la successiva impaginazione grafica ha comportato l’impiego di circa 5 ore a prospetto. Importanti aspetti che hanno influito sulle tempistiche sono stati: l’individuazione di tutte le patologie di degrado e la loro modalità di restituzione in base alle codifiche stabilite dalla UNI 1182/2006.

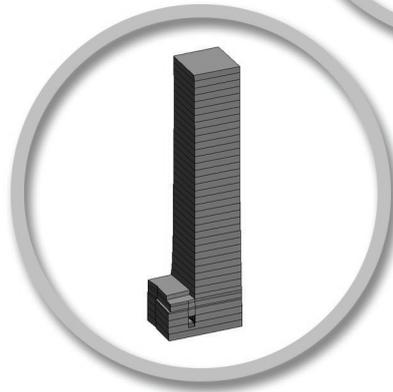
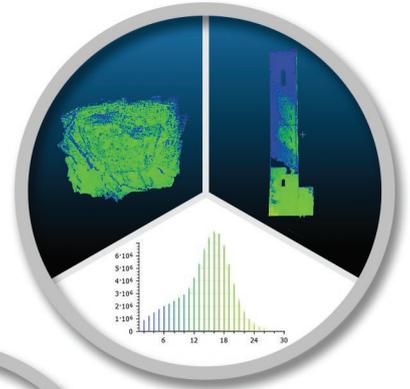
Analizzando i dati contenuti nelle tabelle riassuntive si può sostenere che il fronte maggiormente degradato è quello posto a Nord seguito direttamente da quello posto a Sud. Inoltre la tipologia di degrado più diffusa è quella dipendente dalla presenza di patina biologica sulla struttura muraria. Nei prospetti sopracitati il fenomeno della patina biologica è accentuato a causa della conformazione geometrica della copertura della Torre, in quanto le due falde convogliano l’acqua piovana verso Nord e verso Sud. Dal posizionamento delle differenti patologie e dalla loro estensione si intuisce la seguente dinamica degli eventi: l’acqua piovana che defluisce dai doccioni o che si accumula lungo gli spigoli vivi della torre (merli, cornicione, chiavi e aperture in primo luogo) permette la formazione di efflorescenze che, a lungo andare e senza la programmazione di interventi mirati, sono la base perfetta per la crescita di microrganismi biologici che si nutrono dei sali presenti sulla superficie degradata. Così facendo la patina biologica si sostituisce del tutto alle efflorescenze espandendosi sempre più. Invece la colatura, dovuta a depositi di polveri lungo gli spigoli vivi dell’edificio, si verifica generalmente in seguito a piogge che trasportano il materiale polverulento lungo le superfici sottostanti.

I prospetti maggiormente degradati dal punto di vista delle fessurazioni sono quello posto a Sud e quello posto ad Ovest esattamente lungo la direzione di inclinazione della torre.

Ipotesi di interventi per ciascuna tipologia di degrado vengono illustrate in allegato nelle tavole di restituzione grafica.



CAPITOLO 7
LA RESTITUZIONE
GRAFICA 3D



Il processo di materializzazione di un modello tridimensionale oggi giorno passa, tra le varie tecniche del panorama edilizio, anche attraverso la preparazione di un *BIM*.

Il futuro della progettazione e restituzione grafica e della produzione industriale è stato influenzato dallo sviluppo tecnologico e intellettuale di questa recente metodologia di approccio alla visione olistica del mondo delle costruzioni.

7.1 La metodologia *BIM*

Il *BIM* oramai è una realtà assoluta, che guida il campo delle costruzioni verso processi basati sullo studio di modelli digitali 3D, allontanando le ormai desuete forme di rappresentazione incentrate sulla carta 2D.

Ma cos'è un *BIM*? Esistono tre differenti eccezioni a partire dallo stesso acronimo.

Il *bim* inteso come *building information model* è la rappresentazione digitale di un modello di un edificio che restituisce informazioni circa la tipologia e composizione costruttiva, materica, dimensionale e geometrica.

Il *BIM* inteso come *Building Information Modelling* implementa al *bim* l'aspetto riguardante l'interoperabilità tra le possibili informazioni aggiuntive che altri campi scientifici possono generare coi loro processi lavorativi¹⁶².

Il *BIM* inteso come *Building Information Management* è tutto ciò che "comprende l'organizzazione, la gestione e il controllo del processo"¹⁶³.



Figura 134: evoluzione nel tempo delle tecniche di riproduzione grafica.

Il *bim* è dunque una piccola parte della visione olistica che comporta uno studio e progetto completo e approfondito di un edificio. Esso non si discosta di molto dalla visione tipica del *CAD* che negli ultimi decenni ha potenziato le proprie caratteristiche base, restituendo alla comunità tecnico - scientifica la possibilità della modellazione tridimensionale. L'unica differenza sostanziale sta nella modellazione parametrica.

¹⁶² A. OSELLO, *From CAD to BIM*, Dispense del corso di Disegno per il Progetto - Progettazione Edile, Politecnico di Torino, 2014, pag. 8.

¹⁶³ 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 in Beni Architettonici e del Paesaggio, Politecnico di Torino, A. A. 2015/2016, op. cit. pag. 115.

Infatti i nuovi sistemi di modellazione permettono di intendere gli oggetti come singoli elementi di progettazione (travi, pilastri, porte, muri, ecc.) e non più come insieme di linee, punti e figure geometriche più o meno complesse.

Il *bim* perciò alza non di poco il livello della concezione di base di un progetto, in esso si possono implementare al progetto (attraverso l'utilizzo di database interni), informazioni che con la tecnica *CAD* dovevano essere calcolate di volta in volta. Comunque tutto questo non è sufficiente a comprendere le multidisciplinarietà del caso. Grazie all'aspetto dell'interoperabilità tra differenti *software* computazionali il modello generato con la tecnica *bim* viene utilizzato come base comune per l'archiviazione condivisa di informazioni, diventando a sua volta un database aggiornato e aggiornabile in qualsiasi momento della vita utile dell'edificio.

L'interoperabilità è dunque l'insieme dei processi interdisciplinari volti a creare, gestire, trarre e comunicare informazioni tra le parti interessate a diversi livelli di dettaglio, in tempi e per scopi differenti, al fine garantire la qualità e l'efficienza nel tempo del manufatto.

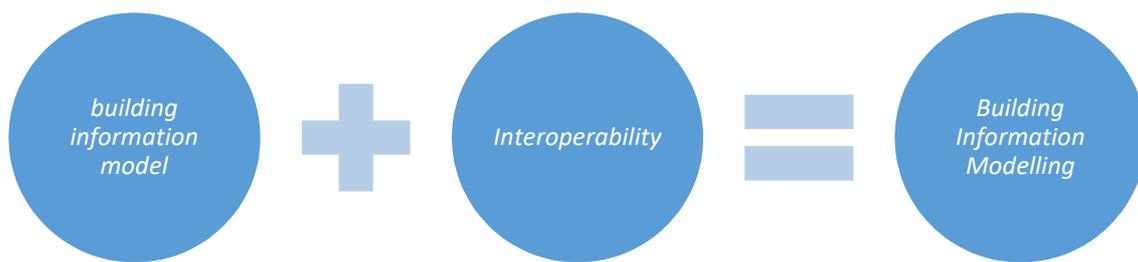


Figura 135: costituzione del BIM.

L'obiettivo e scopo principe è quello di condivisione del sapere tra differenti discipline quali: l'architettura, la progettazione strutturale e impiantistica, l'analisi energetica, la sostenibilità economico - finanziaria, la pianificazione di cantiere, la manutenzione programmata e molte altre.

Attualmente i governi di numerosi Stati mondiali stanno legiferando nuovi ordinamenti per implementare in maniera definitiva la metodologia *BIM*. Appunto per questo, gli operatori del settore *AEC*¹⁶⁴, a seguito delle nuove disposizioni contenute nel nuovo Codice degli Appalti e di decreto che verrà emanato entro breve (fatto *ad hoc* per il *BIM*), dovranno adeguarsi entro breve tempo. Entro il 1° Gennaio 2019 si dovrà verificare l'adeguamento del *BIM* per lavori complessi relativi a opere di importo a base di gara pari o superiore a 100 milioni di euro, per arrivare all'adeguamento del 1° Gennaio 2025

¹⁶⁴ Acronimo di Architettura - Edilizia - Costruzioni.

che vedrà interessate le opere di importo a base di gara inferiore a 1 milione di euro, ovvero sia qualsiasi attività edilizia¹⁶⁵.

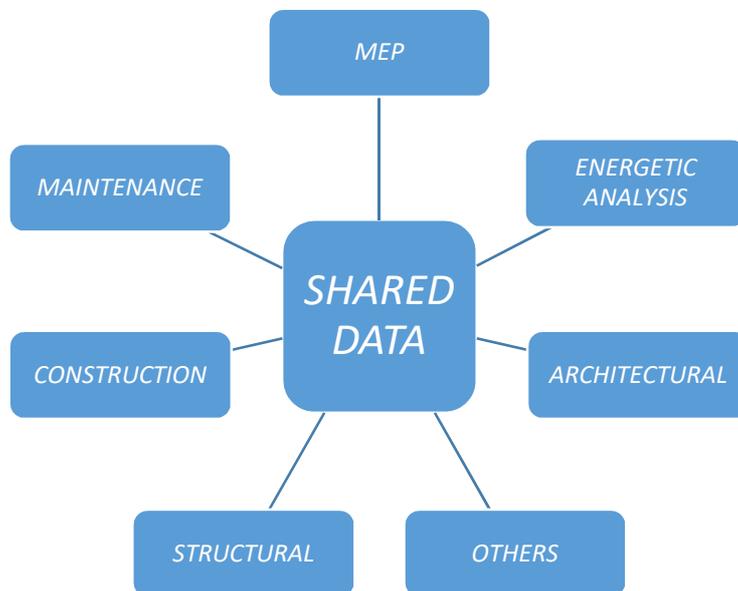


Figura 136: condivisione dei dati di differenti discipline per la definizione di un BIM.

7.2. La metodologia HBIM

Nella branca dell'architettura, anche il patrimonio storico del costruito deve trovare spazio in questa nuova metodologia progettuale. La soluzione è rappresentata dall'*HBIM* dove la prima lettera "H" sta per *Historic* (storico) o *Heritage* (patrimonio).

L'*HBIM* è "la trasposizione alla sfera del patrimonio del costruito storico della tecnologia BIM, che permette di modellare degli elementi architettonici come oggetti parametrici interattivi, costruiti sulla base di dati storici"¹⁶⁶.

Dunque si può assumere che il *BIM* corrisponde ad una metodologia progettuale che interessa un manufatto ipotetico e la sua futura realizzazione, mentre l'*HBIM* consiste in una metodologia che porta a rappresentare la realtà del costruito, ovvero la riproduzione di un modello "as is".

Per arrivare alla sua definizione servono un insieme di tecnologie di rilievo che possano comunicare con i *software* di riproduzione grafica tridimensionale. Al giorno d'oggi la pratica più veloce e più diffusa nel panorama topografico è rappresentata da tecniche fotogrammetriche o *laser scanner* che permettono la restituzione di nuvole di punti interoperabili in quasi tutti i programmi commerciali.

¹⁶⁵ Bozza del "Decreto BIM", Art 6, fonte: <http://commenta.formez.it/ch/CodiceAppalti>.

¹⁶⁶ P. RANIERI, *L'approccio BIM per la documentazione dell'architettura storica: una proposta applicativa del Castello del Valentino*, tesi di laurea magistrale in Architettura, Politecnico di Torino, A. A. 2014/2015.

Di pari passo anche i *software* di modellazione parametrica, che permettono di sviluppare un *BIM*, hanno dovuto implementare i propri processi di progettazione verso le nuove frontiere dell'*HBIM*. Sono nati dunque pacchetti di *plug-in*, o in alcuni casi vere e proprie sezioni interne ai programmi, dedicati alla gestione delle nuvole di punti di oggetti fisici rilevati.

I *plug-in* interagiscono con la nuvola di punti a volte in modalità automatica e altre guidati dall'azione dell'operatore addetto a trasformare il dato di *input* in un modello parametrico iniziale, al quale, in seguito ad altri rilievi (di carattere strutturale, storico, materico, di degrado patologico, ecc.) eseguiti sul manufatto, vengono aggiunte una tutta una serie di identità e informazioni, necessarie per il completamento dell'*HBIM* e con la possibilità di essere aggiornate col passare del tempo (monitoraggio a lungo tempo).

7.3.1 LOD

L'interoperabilità tra i numerosi settori, che partecipano alla definizione di un *BIM*, prevede una notevole mole di scambio di informazioni raccolte in *database* differenti l'uno dall'altro. Questi, per accogliere nel modo più efficiente possibile i dati devono essere regolati e coordinati secondo degli *standard* particolari.

La gestione e il controllo della qualità e della trasferibilità dei dati viene coordinata dai *LOD*, *Level of Development* (Livello di Sviluppo nella lingua italiana), introdotti per la prima volta come concetto nel 2008 dall'*American Institute of Architects (AIA)*.

Nel 2013 lo stesso *AIA* ha pubblicato un aggiornamento inerente ai *LOD* in seguito alle evoluzioni tecniche, tecnologiche e di pensiero in campo *BIM*: il *Document G202 - Project Building Information Modeling Protocol Form*.

Il Livello di Sviluppo descrive i minimi dimensionali, spaziali, quantitativi, qualitativi e altri dati inseriti in un elemento del modello per sostenere gli usi autorizzati a tale *LOD*¹⁶⁷. Corrisponde dunque alla misura delle quantità di informazioni fornite da un elemento del modello e non deve essere confuso con il *Level of Detail* (Livello di Dettaglio) che possiede sempre lo stesso acronimo (*LOD*) ma corrisponde ad un aumento del solo contenuto grafico dell'elemento del modello.

I Livelli di Sviluppo appartenenti al *Document G202* sono classificati su cinque livelli, da 100 a 500, ai quali può associarsi brevemente la seguente accezione:

- *LOD 100: concept*;
- *LOD 200: geometria approssimativa*;
- *LOD 300: geometria precisa*;
- *LOD 350: geometria precisa definita (via di mezzo tra LOD 300 e LOD 400)*;

¹⁶⁷ *AIA, Document G202 - Project Building Information Modeling Protocol Form, 2013.*

- **LOD 400:** adeguato alla realizzazione;
- **LOD 500:** “as built”, come realizzato.

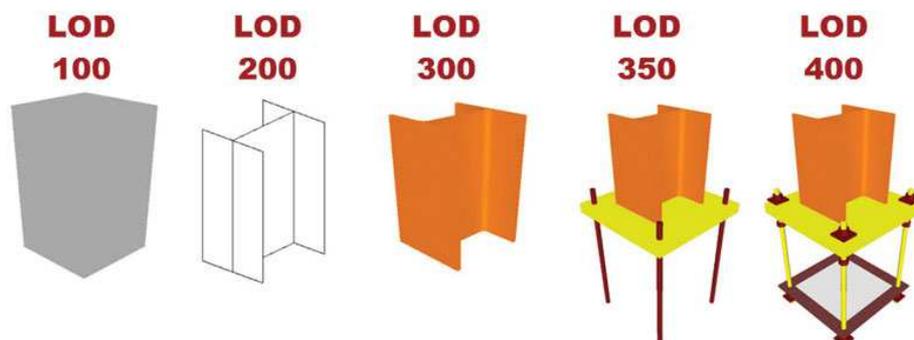


Figura 137: schema grafico dei differenti LOD. La sola visualizzazione grafica, senza le informazioni del database genera confusione, rendendo più facile a un utilizzatore non esperto lo scambio dei Livelli di Dettaglio con i Livello di Sviluppo. Fonte: <http://www.ibimi.it/lod-livello-di-dettaglio-per-il-bim/>.

Ciascun *LOD* è pensato per essere adeguato all’uso che ne verrà fatto. Dato che il *BIM* è uno strumento al servizio del processo edilizio e quest’ultimo si compone di fasi, progressivamente sempre più evolute, dalla concezione dell’opera alla sua realizzazione, il criterio di costruzione della scala di classificazione è funzionale a tutti questi aspetti di pianificazione progettuale.

Una più ampia distinzione tra un livello e l’altro viene esposta nella seguente tabella di esempio pensato per un muro perimetrale, soffermandosi maggiormente sugli aspetti inerenti a geometria, rappresentazione e attributi tralasciando l’ultimo livello “as built”¹⁶⁸.

<i>LOD 100</i>	<i>LOD 200</i>	<i>LOD 300</i>	<i>LOD 350</i>	<i>LOD 400</i>
Geometria	Geometria	Geometria	Geometria	Geometria
Elemento	Elemento	Elemento	Elemento	Geometria <i>LOD</i>
architettonico	architettonico	architettonico	architettonico	350 + inclusione
verticale	verticale	verticale	verticale	di tutte le
rappresentato	rappresentato	rappresentato	rappresentato	stratigrafie, i dati
mediante simbolo	mediante solido	con ingombri	mediante un	dei materiali del
2D o massa 3D	generico con	calcolati secondo	solido avente	fornitore e le
	forma, spessore e	la normativa	dimensioni reali	finiture.
	posizione	tecnica	in scala. Sono	
	approssimata		modellate tutte le	
			stratigrafie	
Rappresentazione	Rappresentazione	Rappresentazione	Rappresentazione	Rappresentazione
Grafica 2D o 3D	Solido 3D	Solido 3D	Solido 3D	Solido 3D
(solo masse)		strutturato	complesso	complesso

¹⁶⁸ Fonte: <http://www.harpaceas.it/il-bim-e-il-concetto-di-dettaglio-e-lod/>.

Attributi	Attributi	Attributi	Attributi	Attributi
Posizionamento di massima	Semplici geometrie di ingombro	Definizione del sistema architettonico: - spessore - lunghezza - larghezza - volume - definizione materiali - definizione stratigrafie principali	Dettaglio dei componenti per gruppi, senza riferimenti a singoli prodotti: - stratigrafie dettagliate - spessori componenti - struttura - isolamento - camera d'aria - finitura - dettagli costruttivi	Dettaglio LOD 350 + Info montaggio + schede tecniche singoli prodotti: - tipo e superficie finitura interna ed esterna - composizione materiale o componente - capacità strutturale - trasmissione acustica - altri

Tabella 66: esempio di differenziazione dei LOD per un muro perimetrale.

In Italia la definizione e gestione dei *LOD* è demandata alla norma *UNI 11337/2017 "Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti"*.

L'approvazione della norma avvenuta nel dicembre 2016 e la conseguente pubblicazione nel gennaio 2017 ha interessato soltanto le parti 1, 4, e 6 che costituiscono l'ossatura portante della regolamentazione italiana in materia di *BIM*.

Essa cambierà il proprio nome in "*Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni*" al completamento finale.

I *LOD* italiani a differenza di quelli americani vengono suddivisi in *LOI (Level of Information)* e *LOG (Level of Geometry)*. Il *LOG* riguarda le informazioni grafiche dell'elemento del modello, mentre il *LOI* gli attributi caratteristici.

Questa distinzione di base facilita notevolmente la distinzione tra *Level of Detail* e *Level of Development*.

Ulteriore distinzione con le disposizioni americane è la codifica utilizzata per classificare differenti livelli di sviluppo. I numeri da 100 a 500 vengono sostituiti dalle lettere alfabetiche da A a G. Le classi dalla A alla E risultano essere simili a quelle americane.

Di seguito si espongono le caratteristiche di ciascun *LOD*¹⁶⁹:

1. *LOD A*: rappresentazione simbolica in 2D o anche in 3D se necessario. Non esprime vincoli di geometria. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono puramente indicative.
2. *LOD B*: rappresentazione geometrica generica o la geometria d'ingombro. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono approssimate.

¹⁶⁹ UNI, *UNI 11337/2017: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti*, 2017.

3. *LOD C*: rappresentazione geometrica definita. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono definite in via generica. Sono applicabili a tutte le entità similari.
4. *LOD D*: Rappresentazione geometrica dettagliata. Le caratteristiche qualitative e quantitative sono specifiche di una pluralità di prodotti similari. Vengono inserite informazioni utili al monitoraggio e alla manutenzione.
5. *LOD E*: 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).
6. *LOD F*: 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.
7. *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.

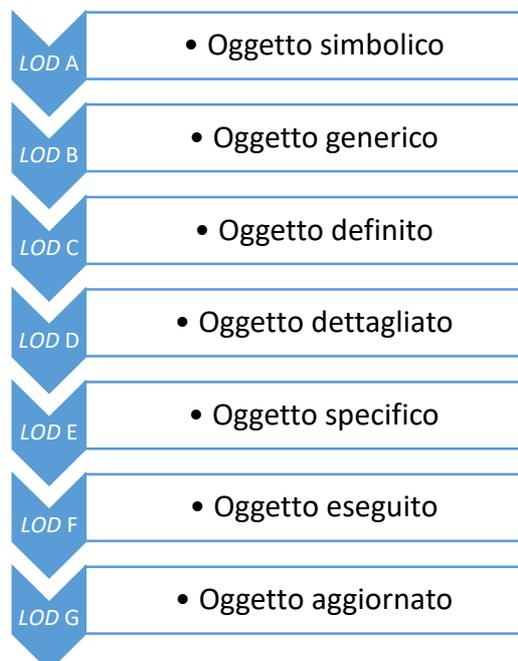


Figura 138: LOD della normativa italiana.

Grazie all'introduzione di due nuovi LOD (F e G), la normativa italiana ha introdotto una sostanziale distinzione tra la fase di progettazione (LOD A - LOD E), la fase di manutenzione e monitoraggio *post* produzione (LOD F) e quella di manutenzione, monitoraggio e restauro del patrimonio culturale edilizio (LOD G).

7.4. Il software parametrico Autodesk Revit

Assodate le nozioni che definiscono cosa è BIM e cosa HBIM e la gestione degli elementi di un modello, è stato necessario adoperare un programma commerciale per poter iniziare la modellazione parametrica della Torre degli Smeducci. La scelta è ricaduta su Autodesk Revit 2015, in quanto grazie ad accordi con il Politecnico di Torino, la software house californiana garantisce agli studenti universitari una licenza studente triennale (così come per il programma Autodesk AutoCAD utilizzato in precedenza).

Revit è un programma parametrico che può gestire tre differenti settori di progettazione: quello architettonico (*architecture*), quello strutturale (*structure*) e quello impiantistico (*MEP*). Ciascun settore può essere messo in relazione con gli altri e con differenti programmi e *plug-in* esterni.

Oltre alle differenti tipologie di progetto si possono creare anche *file* di tipo famiglia che costituiscono l'ossatura portante di ciascun modello da creare.

Il software imposta la schermata principale secondo le canoniche viste di riferimento dettate dalle regole di restituzione grafica: piante, prospetti e sezioni, oltre a quella 3D predefinita. Può essere presa visione anche degli abachi (*database*), delle famiglie di sistema e delle eventuali impaginazioni delle tavole di progetto.

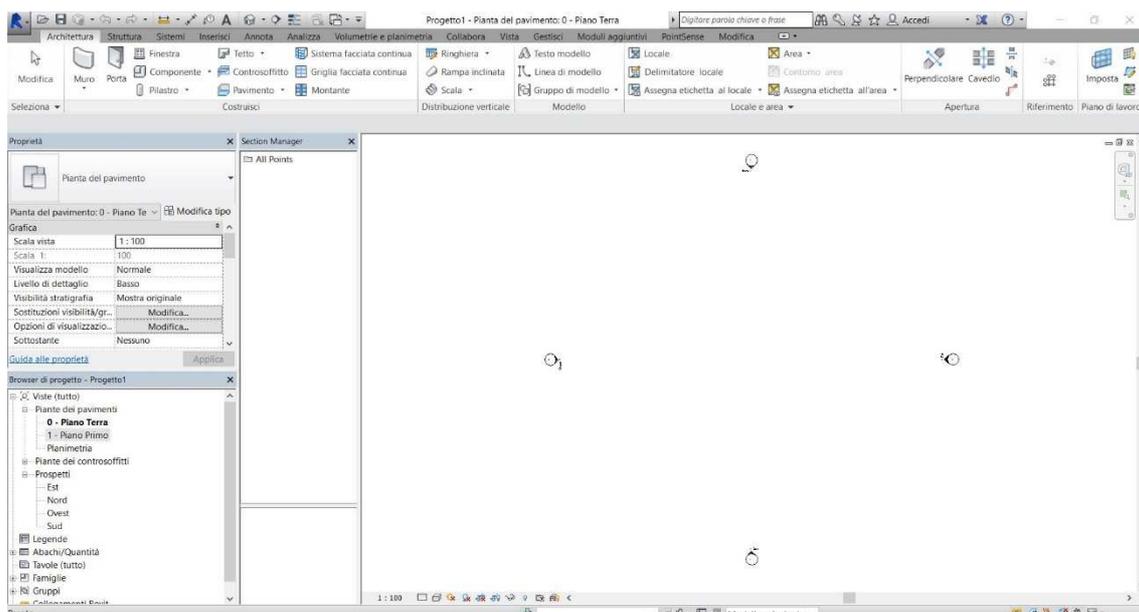


Figura 139: schermata principale di Autodesk Revit 2015.

Quando si crea un documento di lavoro, è normale che ad esso vengano aggiunti elementi costruttivi parametrici. *Revit* li classifica nel seguente modo:

- *Category* (categoria): è un gruppo di elementi che vengono usati per modellare un edificio, per esempio lo sono un pilastro, una finestra o una porta.
- *Family* (famiglia): è ogni singola classe di elementi che fa parte di una categoria, ovvero un gruppo di elementi accomunati dai medesimi parametri, usi e rappresentazioni grafiche. Un esempio di famiglie differenti per una categoria 'muri', presenti nel sistema del programma, possono essere: i *basic wall* (muri perimetrali) e i *curtain wall* (pareti divisorie).
- *Type* (tipo): è una sottocategoria delle famiglie e corrisponde a una differenza di caratteristica rispetto a quest'ultima, come dimensioni, allineamenti, ecc. Un esempio di diversi tipi di famiglie inerenti alla categoria muri è rappresentato da un muro perimetrale di 40 cm rispetto ad uno di 30 cm.
- Istanza (istanza): è l'elemento reale singolo collocato nel progetto avente una specifica posizione nell'edificio (istanza di modello) o nel drawing sheet¹⁷⁰ (istanza di annotazione)¹⁷¹.

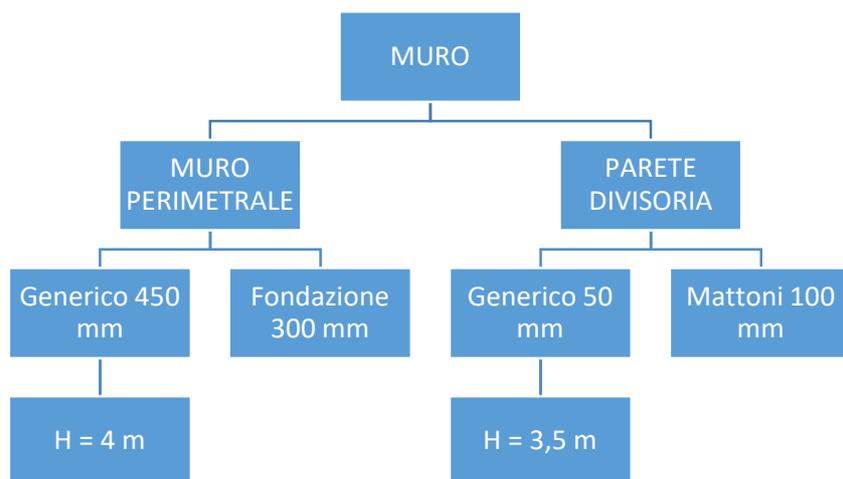


Figura 140: esempio di distinzione tra elementi costruttivi parametrici a partire dalle categorie fino alle istanze.

A sua volta le famiglie si suddividono in: famiglie di sistema, famiglie caricabili e famiglie locali.

Le famiglie di sistema o *system families* sono interamente definite dagli sviluppatori del programma. All'avvio di un nuovo progetto, il *file* di modello attinge a una raccolta personale di famiglie. Queste non possono essere create, copiate, modificate o

¹⁷⁰ Tavola di progetto.

¹⁷¹ A. OSELLO, *Revit Architecture - Part 01*, Dispense del corso di Disegno per il Progetto - Progettazione Edile, Politecnico di Torino, 2014, pag. 24.

eliminate, tuttavia è consentito duplicare e modificare le loro sotto classificazioni (*types*), personalizzandone le caratteristiche. Inoltre è permessa l'eliminazione di tutti i tipi tranne uno, necessario per l'esistenza della famiglia stessa.

Le famiglie caricabili o *loadable families* sono utilizzate per progettare:

- particolari componenti che di solito, nel processo edilizio, saranno acquistati, consegnati e installati in un edificio, come finestre, porte, infissi, mobili piantagioni e altri;
- particolari componenti impiantistici che di solito, nel processo edilizio, saranno acquistati, consegnati e installati in un edificio, come le caldaie, condotte d'aria, *fan coil*, elementi idraulici e altri;
- particolari elementi di annotazione grafica personalizzati in modo ordinario, tipo simboli, blocchi di titoli a altri.

A causa della loro natura altamente personalizzabile, le famiglie caricabili sono la tipologia più comunemente creata e modificata in *Revit*.

A differenza delle famiglie di sistema, quelle caricabili vengono create in *file* esterni con formato *.rfa* e caricate nei progetti.

Infine le famiglie locali o *in - place families* sono costruite utilizzando gli stessi strumenti delle famiglie caricabili, ma all'interno del *file* di progetto generale. Il fruitore del programma le crea quando ha bisogno di ricreare un elemento con una geometria unica non riutilizzabile in futuro. È possibile creare e successivamente copiare svariati elementi appartenenti a questa tipologia di famiglia in ciascun progetto. Non è però concesso duplicare la famiglia in questione per creare differenti tipi.

Anche se è possibile trasferire o copiare le famiglie locali tra i progetti, è bene farlo solo quando strettamente necessario, in quanto queste possono aumentare la dimensione del file e inficiare notevolmente sulle prestazioni del programma¹⁷².

7.5. La costruzione del modello tridimensionale

Uno dei dati di base, che può essere utilizzato per realizzare un modello tridimensionale e successivamente *BIM*, è una nuvola di punti derivante da processi di rilievo mono o multi sensoriali. Nel caso in questione, per la Torre degli Smeducci, è stata utilizzata la nuvola di punti impiegata per definire le piante e le sezioni degli elaborati grafici 2D.

Per importarla in *Revit* è stato necessario convertire il file dal formato *.las* al formato *.rcp*, operazione possibile soltanto utilizzando il programma *Autodesk ReCap*.

ReCap permette di svolgere una serie di azioni sulle nuvole inserite come per esempio la navigazione interna del modello tridimensionale di punti, la preselezione automatica e successiva registrazione di piani in particolari *layer* o la pulizia e separazione della

¹⁷² ibidem.

nuvola stessa. Tutto ciò nel caso in questione non ha avuto alcun riscontro pratico, soprattutto la preselezione di piani, in quanto la Torre possiede un'inclinazione caratteristica per ciascuno dei quattro lati.

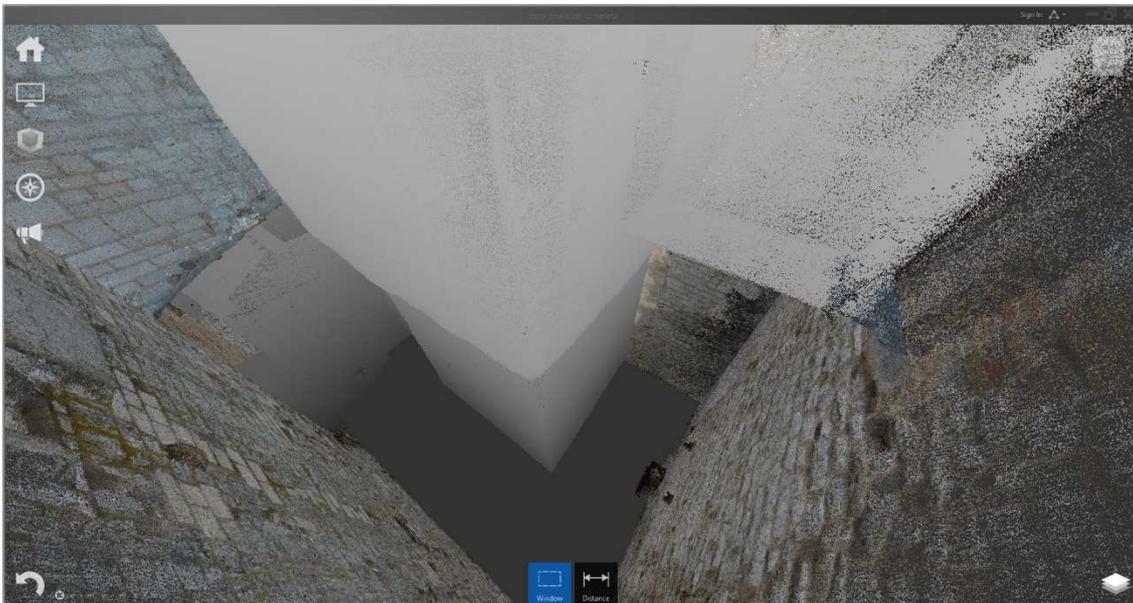


Figura 141: navigazione interna della Torre degli Smeducci. In grigio la nuvola di punti rilevata con tecnica SLAM, a colori la nuvola unione, frutto delle elaborazioni effettuate con tecnica Laser Scanner e Fotogrammetria da drone.

La nuvola è stata caricata in *Revit* attraverso il comando da barra degli strumenti “inserisci: nuvola di punti”. Successivamente come sistema di posizionamento è stato scelto quello “automatico: a coordinate condivise” in modo da posizionare la nuvola secondo le proprie coordinate.

7.5.1. Restituzione della muratura

Compiuto il caricamento, la problematica inerente all'inclinazione dei muri perimetrali si è verificata in tutta la sua imponenza, frutto delle limitazioni dei *plug-in* in commercio.

Il programma utilizzato per restituire i muri è *PointSense* facente parte del pacchetto di vendita del *Laser Scanner Faro CAM2*.

Il comando utilizzato è “*fit wall*” presente nella sezione *PoitSense* di *Revit* che appare dopo aver installato il programma. Una prima finestra di dialogo interroga l'operatore, chiedendogli di impostare il livello a cui riferire il muro. Successivamente si procede al tracciamento dell'elemento murario e alla scelta del tipo includendo scelte inerenti a stratigrafie, materiali, spessori, altezze, ecc.

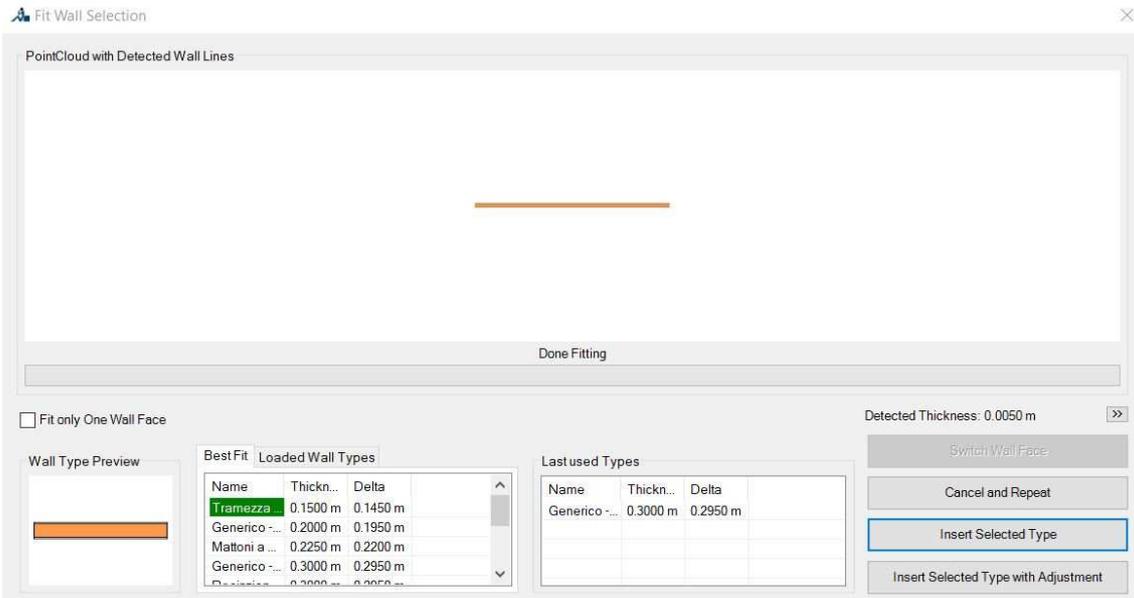


Figura 142: creazione di un muro e definizione dei propri tipi.

Il muro creato però risulta essere discostante non di poco, rispetto alla nuvola di punti di riferimento, lungo la verticale, nei tratti dove viene accentuata la pendenza o lo spanciamento delle pareti.

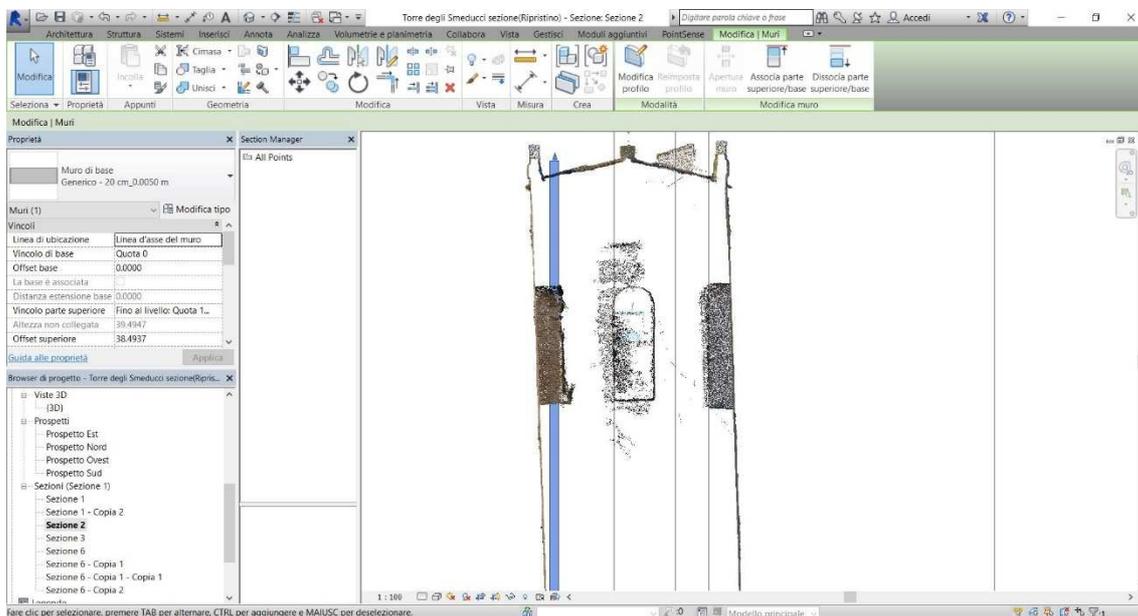


Figura 143: differenza di inclinazione tra il filo del muro della nuvola di punti e quello creato con PointSense.

Inoltre, *PointSense* per quanto riguarda la creazione dei muri non consente altre funzionalità che possano modificare la famiglia lungo piani di sezione verticale in maniera tale da ricostruire il profilo corretto della parete. Stando alle nozioni di base

questo è difatti impossibile per una normale famiglia di sistema, indipendentemente dal *plug - in* utilizzato.

Dunque questo programma, così come tutti gli altri che si basano sulla stessa metodologia di tracciamento, nel caso di estrusione di elementi murari verticali rettilinei risulta essere indubbiamente utile, ma per quelli inclinati o con forti spancamenti, come per la Torre degli Smeducci, non può essere utilizzato.

Per ovviare a questo problema e restituire ugualmente un modello da utilizzare per generare un *HBIM* o eseguire analisi di scostamento tra la superficie del modello e la nuvola di punti, è stato pensato un sistema alternativo basato sulla scomposizione della Torre in tanti segmenti l'uno distante dall'altro 1 m. Ogni singolo segmento è servito come base per creare una porzione unitaria della Torre sotto forma di modello.

La scomposizione della torre è stata portata avanti grazie al programma *PointCab* già utilizzato per estrarre delle sezioni in formato *raster* dalla nuvola di punti. In questo caso le sezioni (in pianta) sono state elaborate ogni metro a partire da una quota di 341 m fino allo sommità della Torre, più altre aggiuntive a causa della variazione della sezione in pianta, come per esempio quelle a quota 347,271 m e 348,349 m circa (coincidenti rispettivamente con l'inizio della piccola copertura a falda singola e di quella superiore a due falde della costruzione adiacente al corpo principale della Torre).

Tutte le sezioni sono state caricate su *AutoCAD* per convertire il dato *raster* in vettoriale e quindi poter lavorare su *Revit* comodamente con gli *snap*¹⁷³.

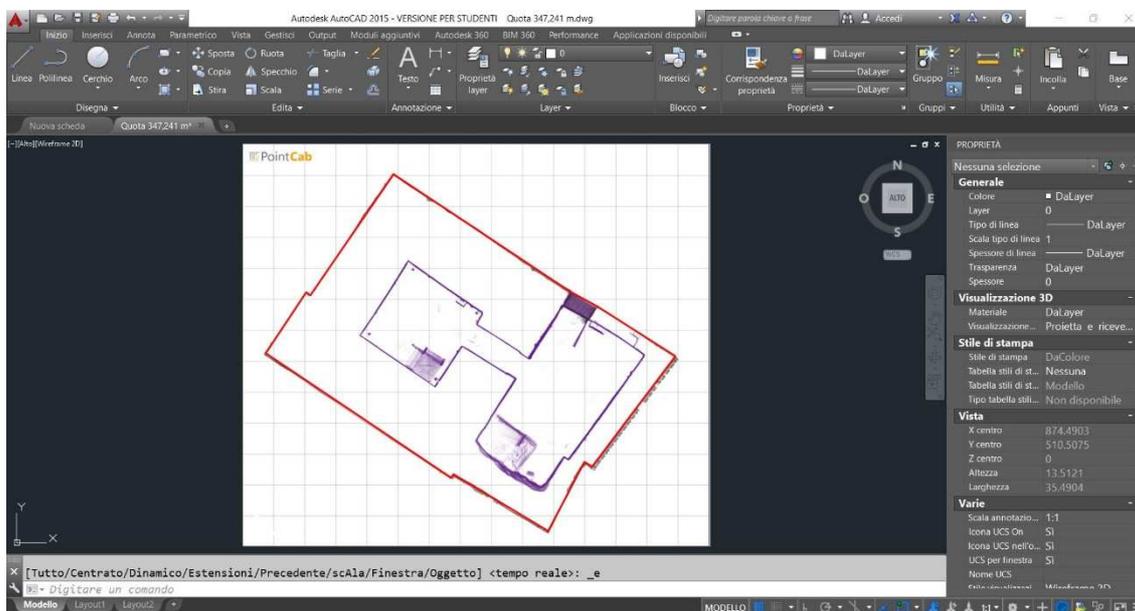


Figura 144: in rosso la sezione a quota 347,241 m vettorializzata in AutoCAD.

¹⁷³ Lo *snap* in inglese significa agguantare. Nella terminologia di restituzione grafica digitale corrisponde alla capacità di un puntatore di essere attratto da un particolare punto significativo di un elemento vettoriale. Esempio, punto centrale o finale di una linea retta.

In Revit è stata creata una nuova famiglia a partire da un “modello generico metrico” in formato *.rft* (*revit family template*). Il modello scelto è quello base per iniziare a generare famiglie caricabili nel sistema del programma.

Dopo aver aperto il nuovo modello, per ciascun pezzo di Torre alto 1 m sono state caricate in serie coppie di sezioni vettorializzate e posizionate nella “pianta dei pavimenti” (nome della pianta di riferimento base) tutte secondo lo stesso orientamento di base, ricreato su *AutoCAD* tramite un vettore comune a tutte le sezioni. Dunque per il primo pezzo, quello compreso tra le quote 342 m e 343 m, sono stati inseriti i file *CAD* inerenti alle sezioni riferite a quelle quote ed è stata creata una massa che le unisce.

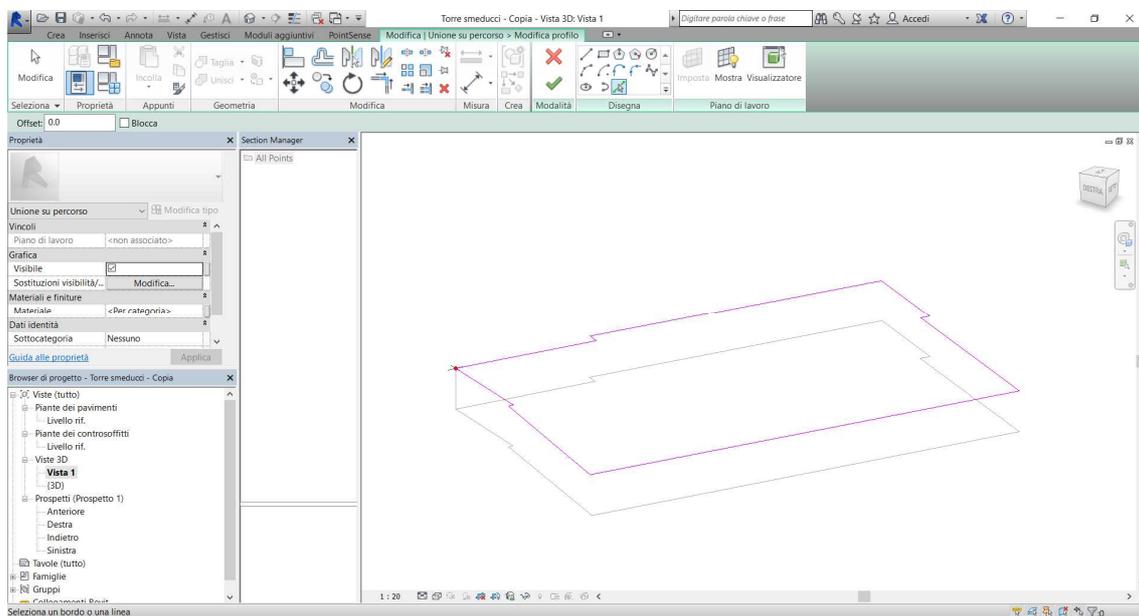


Figura 145: realizzazione del primo pezzo di segmento della Torre degli Smeducci con il comando “unione su percorso”.

Per creare la massa è stato utilizzato il comando “unione su percorso”. Il programma chiede di disegnare il percorso di unione tra le due sezioni (in questo caso rettilineo pari a 1 m) e successivamente di selezionare i due profili da unire (ovvero le sezioni vettorializzate). La selezione dei profili è avvenuta utilizzando l’opzione “seleziona linee” che permette di creare segmenti in base a linee esistenti identificate nell’area di disegno.

La stessa procedura è stata eseguita per tutti i pezzi di Torre seguenti, così facendo si è ottenuto una massa generale costituita da svariati sotto - modelli.

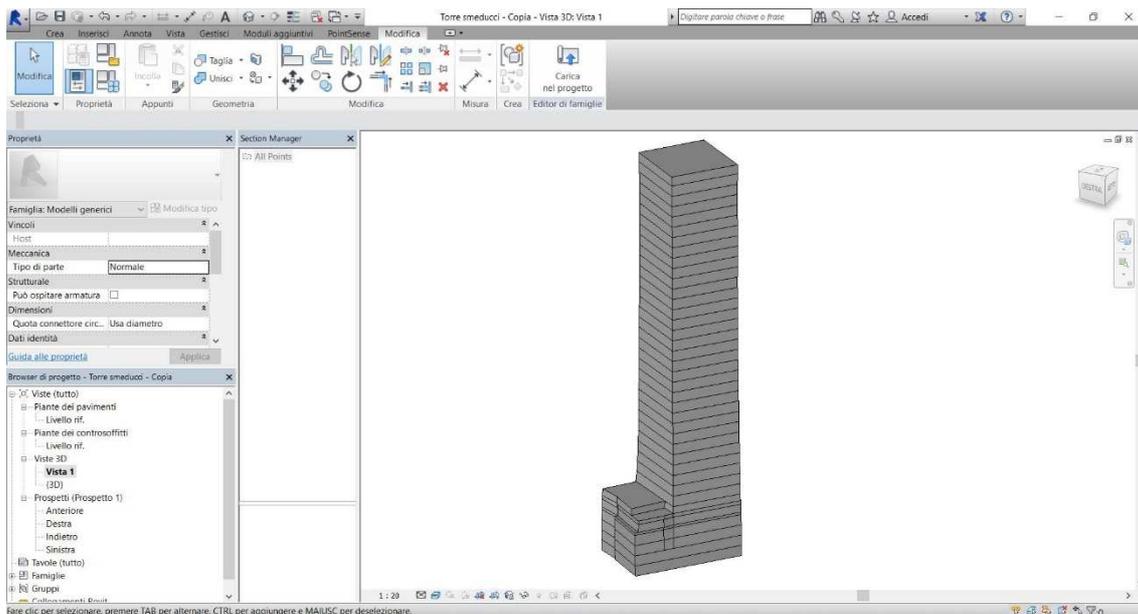


Figura 146: stato di avanzamento della costruzione del modello generale attraverso la metodologia della segmentazione della Torre.

Ultimato l'iter, è stata eseguita la stessa metodologia per ricreare i vuoti interni derivanti dalla nuvola di punti ricavata dal rilievo con tecnica *SLAM*. Il comando è sempre lo stesso e funziona nella medesima maniera di quello precedente con l'unica differenza che si trova sotto la voce "vuoti: unione su percorso".

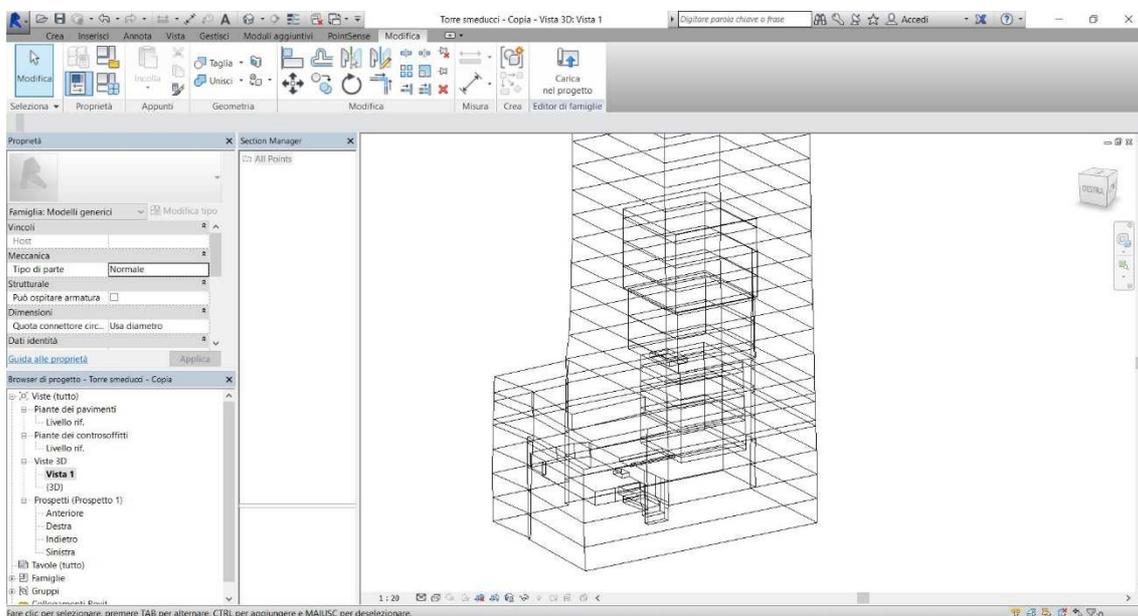


Figura 147: creazione degli ambienti interni della Torre mediante sottrazione dei vuoti.

La particolarità negativa di questa tecnica riguarda tanto l'impossibilità di concepire il modello risultante come un insieme di muri da poter analizzare separatamente uno per

uno (stratigrafie, volumi, efficienza termica, ecc.), quanto quella di restituire le aperture ad arco presenti sui quattro lati del monumento.

Terminate queste procedure, la famiglia creata, relativa la muratura della Torre, è stata caricata nel progetto contenente la nuvola di punti.

Il completamento del modello è avvenuto nel file di progetto aggiungendo alla famiglia caricata sia le coperture sia il cornicione e i merli in sommità all'edificio.

7.5.2. Restituzione delle coperture

L'edificio, come già illustrato, presenta tre differenti tipologie di coperture: una in sommità a due falde con la stessa inclinazione, una a due falde con diversa inclinazione e diversa altezza di gronda a protezione dell'edificio secondario, e infine l'ultima ad una sola falda (composta da una singola fila di coppi) con funzione di scolo delle acque insistenti sulla parte bassa dell'edificio secondario lato Est.

La prima copertura è stata ottenuta modellando un "tetto da perimetro" con il programma *PointSense*. Per far ciò è stata disegnata una linea di modello con il comando "*model line*", la quale ha seguito l'andamento della linea di colmo della nuvola di punti. In seguito la copertura piana è stata deformata sulla base della linea di modello con il comando "*deform shape*". Entrambi i comandi si trovano nella sezione della barra degli strumenti dedicata al *plug-in*.

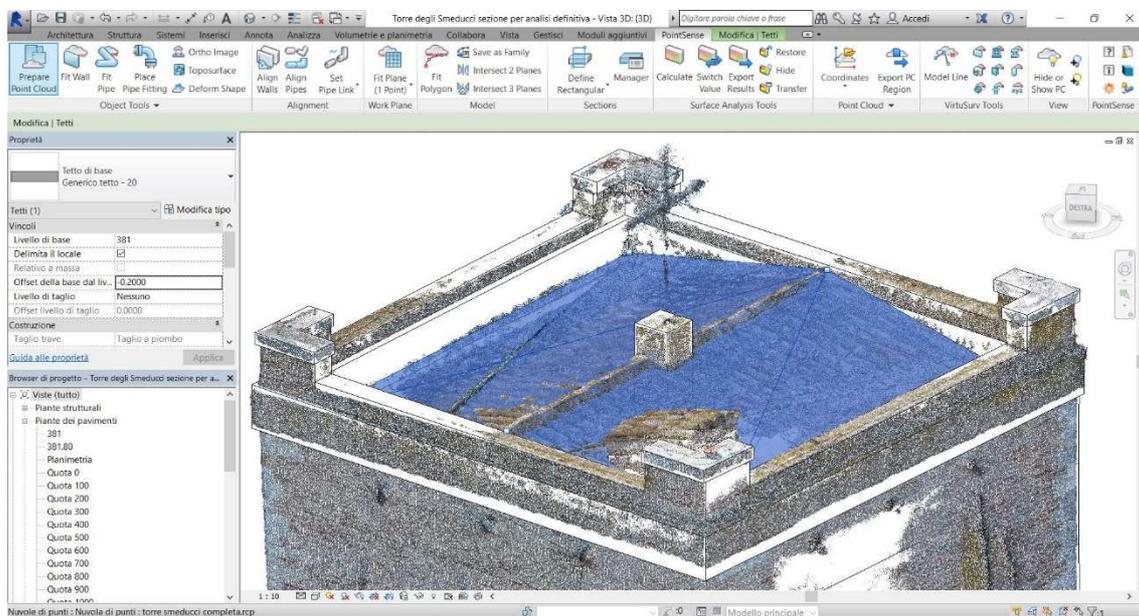


Figura 148: modellazione della copertura della Torre con il comando *deform shape* di *PointSense*.

Per la seconda e la terza copertura è stata vagliata una differente metodologia di deformazione della copertura, a seguito di molteplici tentativi falliti con il comando "*deform shape*", a causa forse dell'irregolarità geometrica degli elementi.

I comandi utilizzati sono stati “modifica perimetro” per lo spostamento in pianta dei vertici e modifica elementi secondari per quello in quota. Così facendo è stato possibile posizionare la gronda e le due parti terminali delle falde a tre altezze differenti, sulla base della nuvola di punti.

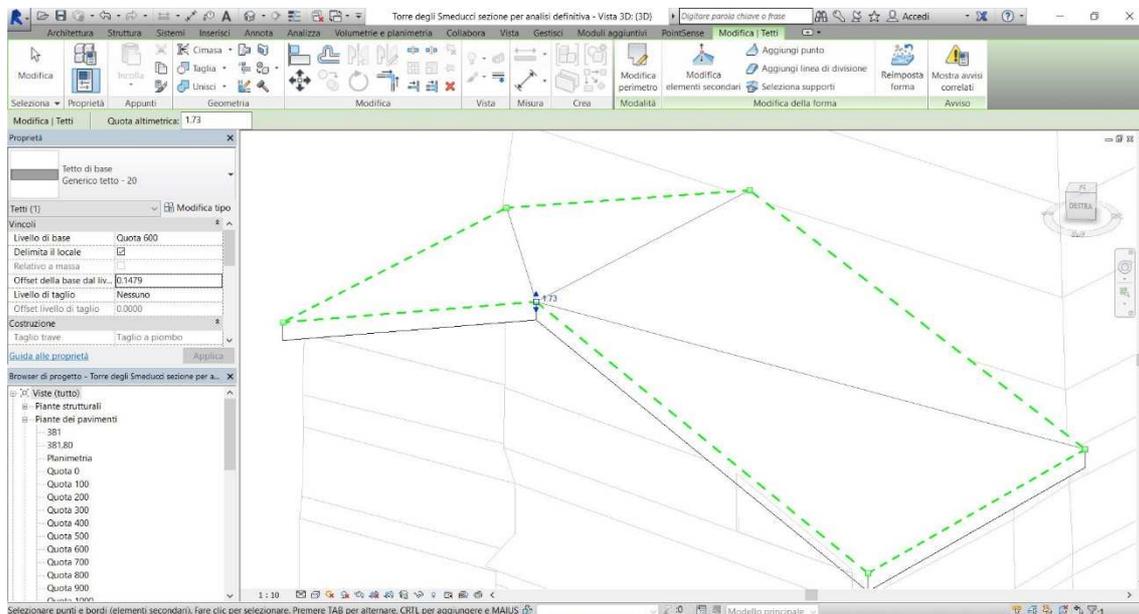


Figura 149: modellazione della copertura del basso fabbricato adiacente alla Torre. Lo spostamento dei vertici è avvenuto sulla nuvola di punti. In questo caso per semplicità di visualizzazione dell'elemento, la nuvola è stata momentaneamente rimossa.

7.5.3. Restituzione della sommità

Per completare la geometria della Torre gli ultimi elementi modellati sono stati i merli e il cornicione in cima.

Le misure sono state ottenute direttamente su *Revit* grazie alla sovrapposizione della nuvola di punti al modello base concepito con la famiglia caricata in precedenza.

Il cornicione è stato concepito come un solaio forato in maniera tale da poter cingere appieno la massa d'ingombro della copertura a due falde e contemporaneamente fare da base d'appoggio alla muratura terminale della Torre.

La pendenza della Torre ha inficiato notevolmente sulla restituzione di questo elemento. Non potendolo restituire inclinato, è stato pensato e posizionato in maniera tale che il proprio asse longitudinale potesse compensare al meglio le parti più alte con quelle più basse, pur restando pienamente orizzontale.

Sopra al cornicione sono stati posti i quattro merli concepiti come muri nella loro parte verticale e come solai per la materializzazione delle mensole in pietra.

Ciascun merlo possiede una propria altezza dovuta dalla pendenza della Torre e dalla compensazione geometrica piana fatta sul cornicione. Infatti risultano essere più bassi verso i lati più pendenti.

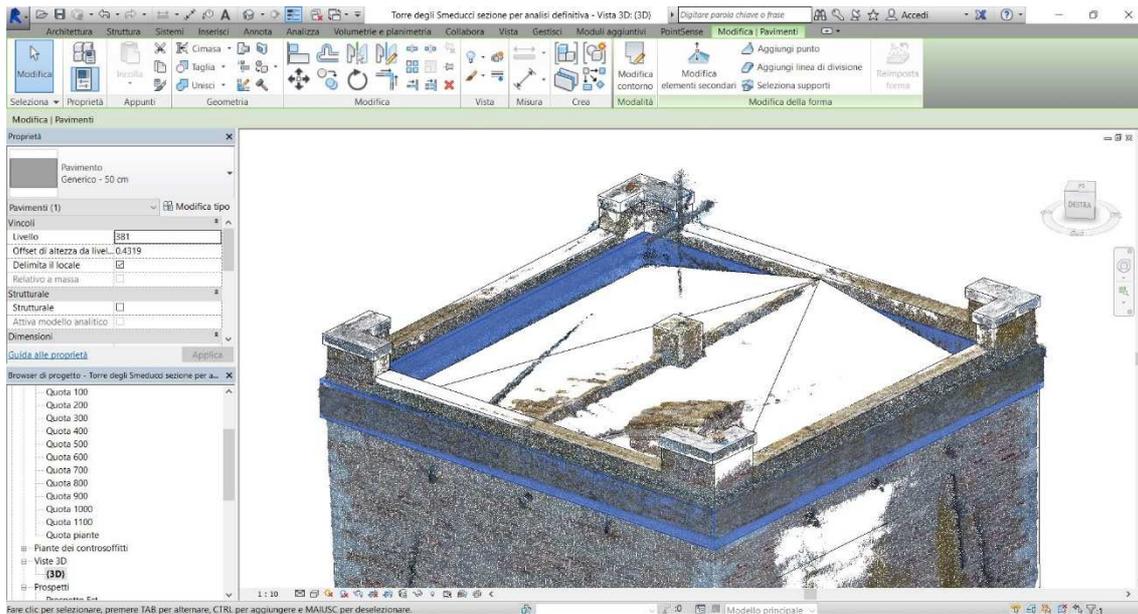


Figura 150: realizzazione del cornicione. Si nota come in alcuni parti il cornicione della nuvola sia più alto e in altre più basso di quello del modello a causa della compensazione fatta per contrastare la pendenza.

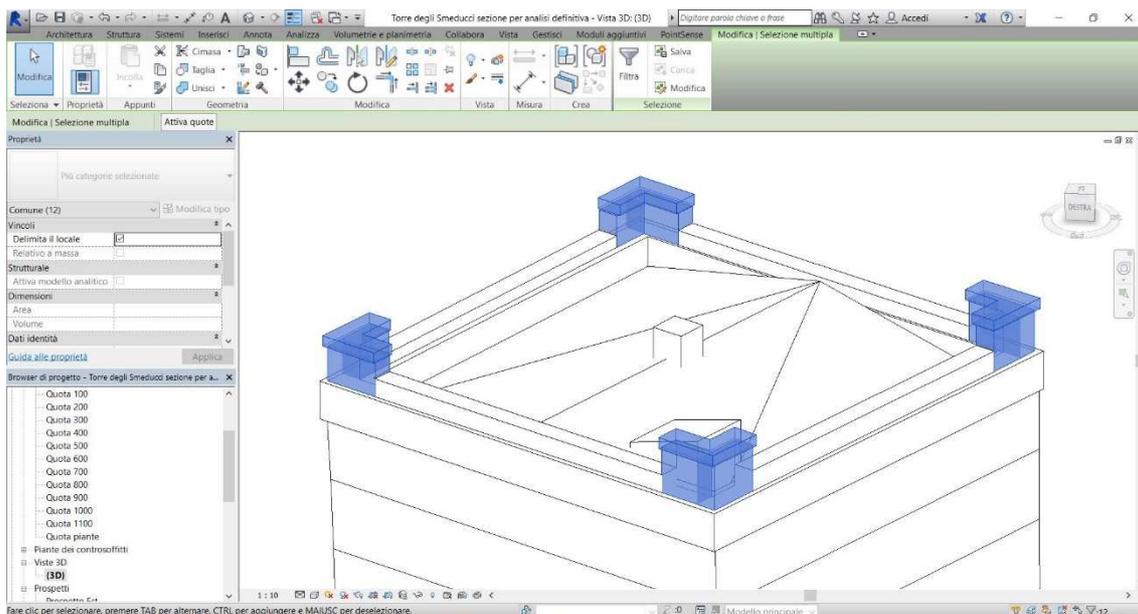


Figura 151: modellazione dei merli.

Il tutto è stato completato collegando ciascun merlo all'altro da una muratura e realizzando la muratura di sostegno della croce della Torre.

La restituzione delle aperture non è stata possibile neanche nel *file* di progetto. Era stato pensato l'utilizzo di una famiglia locale per generare componenti sotto forma di vuoti come per la realizzazione degli spazi interni della Torre. Ciò non è stato possibile in quanto anche in questo caso il comando permette la materializzazione delle superfici da estrarre solamente partendo da viste di piani orizzontali.

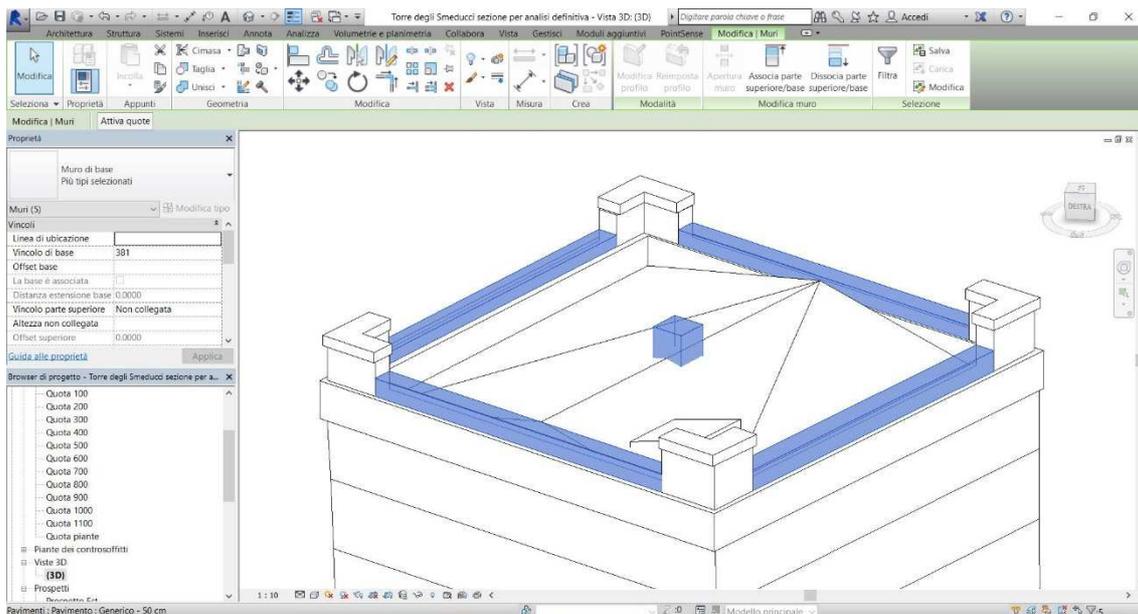


Figura 152: modellazione dei collegamenti murari tra i merli e del sostegno in muratura della croce della Torre degli Smeducchi.

Con questa metodologia il livello di dettaglio del modello corrispondente è risultato essere pari ad una rappresentazione in scala 1:200 circa, in quanto non permette la restituzione grafica di elementi di dettaglio per scale più grandi.

Il livello di sviluppo del modello corrispondente risulta essere invece pari a un *LOD 200* circa.

7.6. HBIM: mappatura delle patologie di degrado

I vantaggi di uno studio visivo del degrado di un edificio e conseguente mappatura in un sistema *BIM* sono i seguenti:

1. visione tridimensionale delle patologie;
2. archiviazione in database delle aree degradate (superfici, tipologia del degrado, tipologia degli interventi, costi ecc.);
3. monitoraggio nel tempo dell'evoluzione del degrado.

Per materializzare sul modello le aree fisiche interessate dai degradi, è stato necessario creare una nuova famiglia partendo da un "modello generico metrico adattivo". Questo permette di realizzare un componente adatto a qualsiasi tipologia di superficie, da quelle piane a quelle curve (attraverso l'utilizzo di più modelli adattivi sotto forma di triangoli).

La procedura di costruzione del modello adattivo è la seguente:

- sono stati posizionati, nel piano di lavoro, un numero di punti sufficiente a descrivere l'area interessata dal degrado (sono state create tre tipologie di

modelli differenti a seconda dell'estensione: una con 5 punti, una con 10 e una con 20);

- i punti sono stati resi adattivi tramite apposito comando, l'ordine con cui sono stati resi adattivi determina la conseguente successione di posizionamento nel *file* di progetto;
- tra un punto e l'altro sono state materializzate "linee di riferimento" con il comando "*spline* passante per due punti".
- dal poligono derivante, è stato generato un volume con il comando "crea forma: solido" al qual è stato assegnato uno spessore di 1 mm per poterlo intendere a schermo come superficie e non farlo sovrapporre al modello generale.

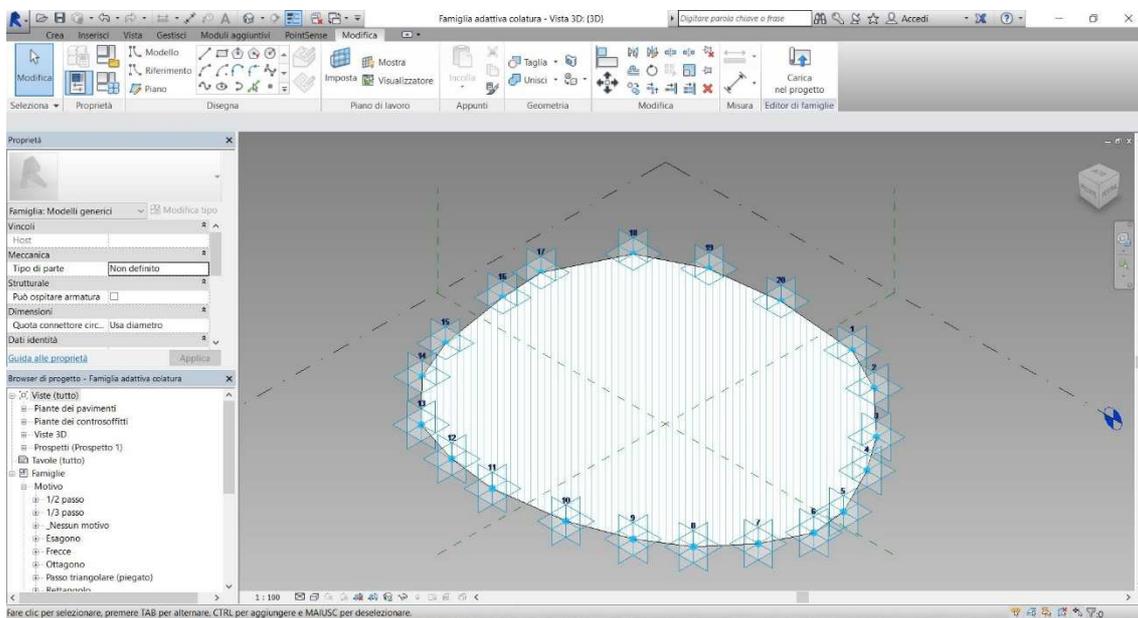


Figura 153: modellazione della famiglia parametrica da 20 vertici.

A ciascuno dei tre differenti modelli adattivi (caratterizzati dalla presenza di 5, 10 e 20 vertici) sono stati aggiunti parametri inerenti a:

- nome patologia,
- area patologia,
- campitura patologia,

in modo tale da poter archiviare tutti i dati negli abachi del *file* di progetto una volta caricato il componente, seguendo sempre la *UNI 11182*.

Conclusasi questa procedura la famiglia adattiva è stata caricata nel progetto e richiamata col comando "componente: posiziona componente" ogni qualvolta fosse necessario introdurre una superficie di degrado.

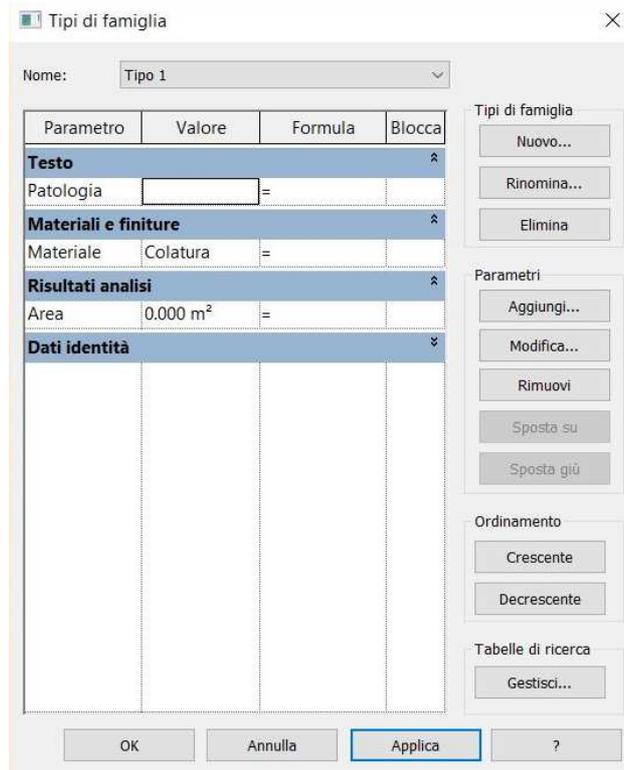


Figura 154: impostazione dei parametri della famiglia adattiva.

Il posizionamento dei vertici delle famiglia adattive corrispondenti alle superfici di degrado è avvenuto servendosi dell'inserimento, in viste di sezione parallele ai prospetti, dei file AutoCAD di mappatura dei degradi della restituzione 2D.

Questo stratagemma è stato escogitato per poter controllare l'esatto inserimento dei vertici e descrivere al meglio le aree interessate dalle patologie.

La nuvola non è stata usata in quanto, una volta ingrandita per evidenziare superfici specifiche, si smarrivano informazioni grafiche a causa della perdita di infittimento della maglia di punti che la compone.

Inoltre l'inserimento delle superfici adattive è consentito solamente nelle viste di progetto piane e 3D, perciò anche se si vuole caricare delle ortofoto nei prospetti o in viste di sezione per una eventuale vettorializzazione successiva, le suddette superfici non possono essere posizionate in alcun modo.

In alcuni casi è possibile vestire superfici piane del modello con immagine esterne, ma nel caso in questione le superfici sono molteplici (circa 315) con inclinazioni diverse caso per caso e quindi anche questa ipotesi è stata scartata.

Dunque, con il metodo utilizzato, si tengono aperte due viste del file di progetto, una 3D per posizionare il modello adattivo, e quella di sezione 2D con il file AutoCAD per rendere visibile gli spostamenti dei vertici della superficie in tempo reale.

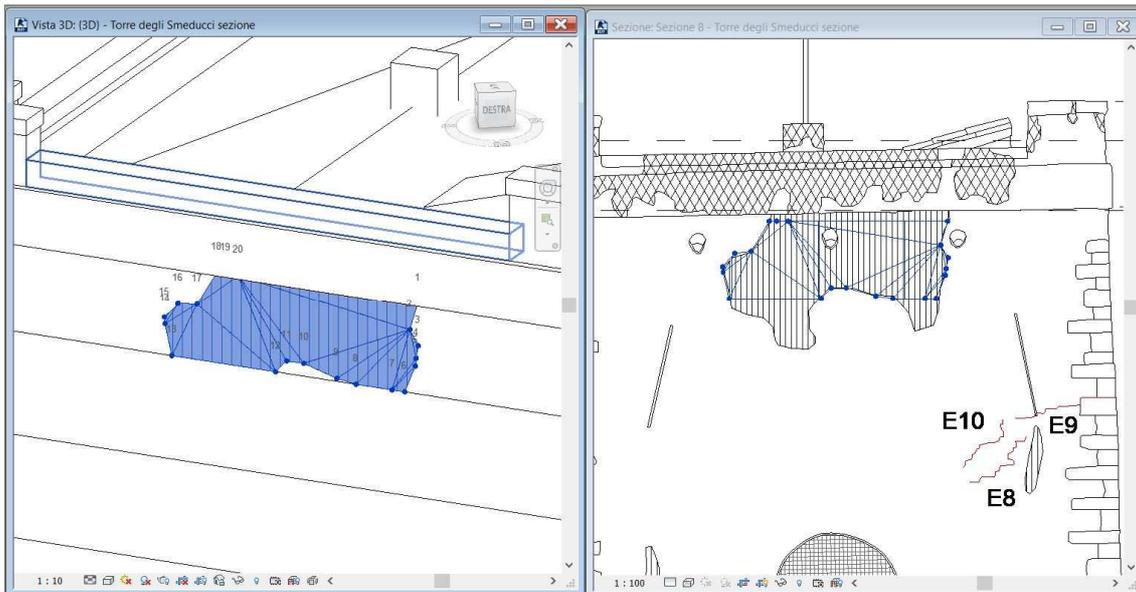


Figura 155: posizionamento delle superfici rappresentanti i degradi con l'utilizzo di due viste grafiche.

La disposizione delle superfici rappresentanti i degradi può essere compiuta soltanto livello dopo livello a causa della diversa inclinazione dei piani che li compongono.

In conclusione, nel caso in questione, la precisione è indubbiamente inferiore alla metodologia di mappatura bidimensionale, senza la quale non potrebbe comunque avere luogo, se non accoppiando alla vista 3D una vista non riferita dell'ortofoto di un prospetto. In questo modo però il controllo delle giuste forme non sarebbe possibile, sbagliando di molto il valore di misura delle aree e rendendo superflua l'archiviazione di dati che si basano su questo determinato conteggio (costi, quantità del materiale di intervento, ecc.).

Dunque, stando allo stato attuale dello sviluppo dei software parametrici (in questo caso *Revit*), applicare uno studio del degrado su piattaforma *BIM*, in casi di opere architettoniche slanciate con forti pendenze dei fronti murari, risulta quindi sconveniente e ridondante.

Nonostante ciò con l'introduzione e lo sviluppo di nuovi comandi che permettano di inserire non solo nuvole di punti derivanti da rilievi multi - sensore, ma anche *mesh* con *texture* o modelli 3D, come quello generato dal programma *Photoscan (Tiled model)*, si potrebbe ovviare al problema della vettorializzazione tridimensionale in campo parametrico.

7.7. HBIM: surface analysis

La creazione di un modello 3D a partire da una nuvola di punti ha fatto sì che, una volta conclusasi l'operazione, quest'ultima venisse comparata alle superfici esterne del modello stesso.

L'applicazione di questa tipologia di analisi è stata possibile grazie all'utilizzo della funzione "surface analysis" presente nel *plug - in* del programma *PointSense*. Essa permette di calcolare la distanza di ciascun punto della nuvola rispetto ad una superficie presa in considerazione, lungo la normale.

L'elaborazione è avvenuta suddividendo la Torre in sei zone di confronto differenti:

1. le tre coperture,
2. le parti della sommità (merli, cornicione, ecc.),
3. il fronte nord,
4. il fronte sud,
5. il fronte ovest,
6. il fronte est.

A ciascuna di queste zone è stata applicata la funzione sopra citata, la quale ha permesso di eseguire il confronto di distanza di tutti i punti della Torre che si trovano in un intorno delle superfici selezionate. Per non far nascere delle interferenze tra l'elaborazione della nuvola di punti esterna con quella interna quest'ultima è stata eliminata dal programma. Ogni superficie analizzata, nelle 6 differenti elaborazioni, è stata "evidenziata" secondo una scala di colori che ha restituito visivamente le più o meno elevate distanze, positive e negative, della nuvola di punti dal modello.

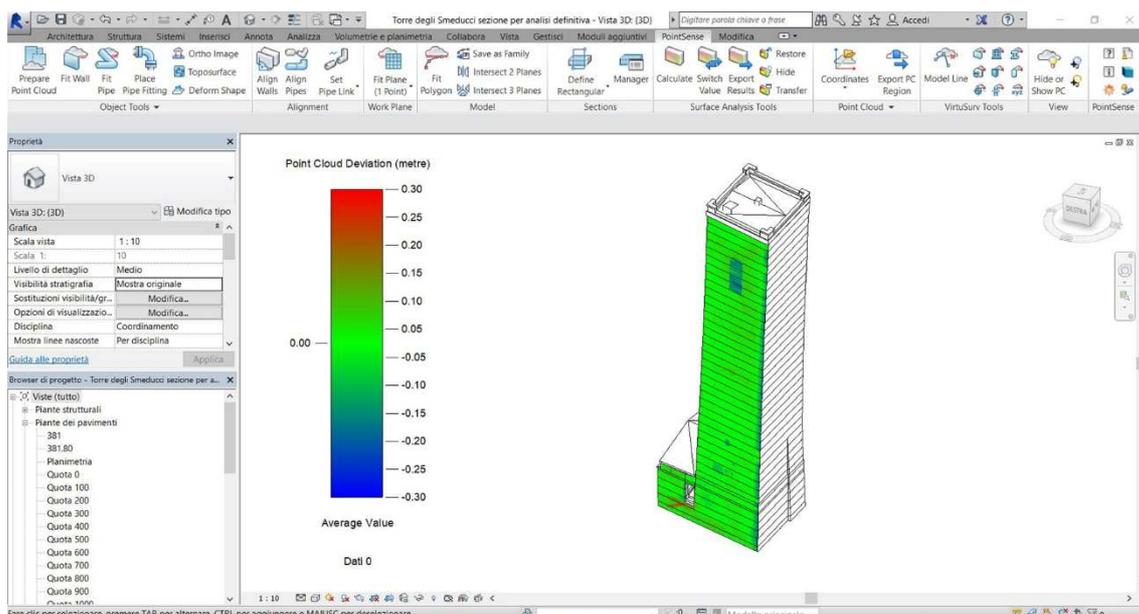


Figura 156: surface analysis del fronte nord della Torre degli Smeducchi con annessa la scala di colori suddivisa in intervalli di 0,05 m.

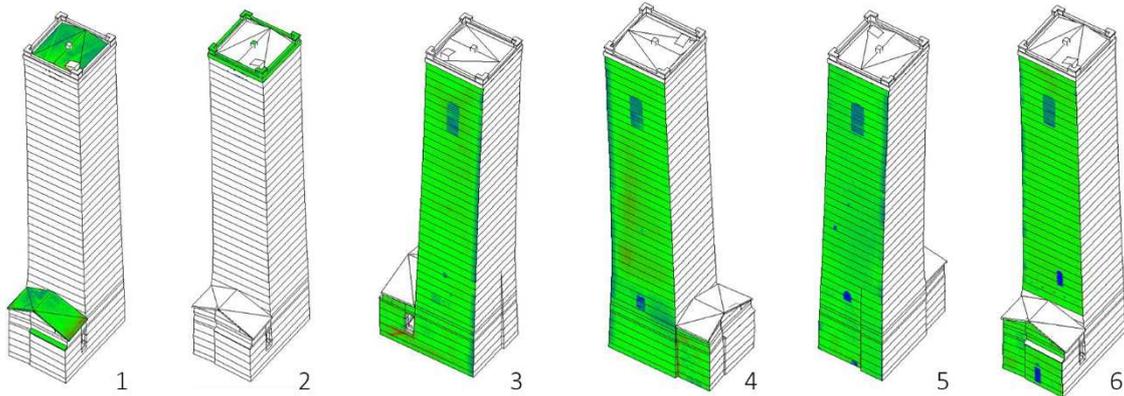


Figura 157: surface analysis su: 1) le tre coperture, 2) le parti della sommità, 3) il fronte nord, 4) il fronte sud, 5) il fronte ovest, 6) il fronte ovest della Torre degli Smeducchi.

I risultati delle distanze, ottenuti dalle 6 elaborazioni, sono stati successivamente esportati sotto forma di *file .txt*. Per ciascun documento di testo ne è stato creato uno *excel* in modo da poter calcolare i seguenti valori:

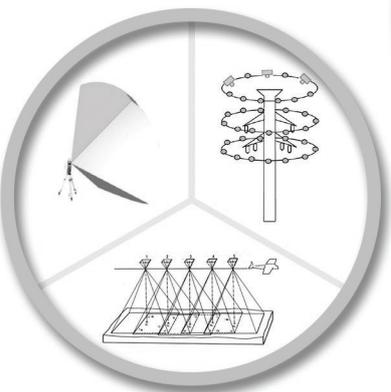
- media aritmetica;
- deviazione *standard*;
- *Root Mean Square Error*.

Tutte le distanze computate (circa 500'000 come il numero di punti componenti la Torre), sono state poi unite in un unico *file excel* per poter calcolare e avere un riferimento degli indici appena esposti rispetto alla totalità del monumento.

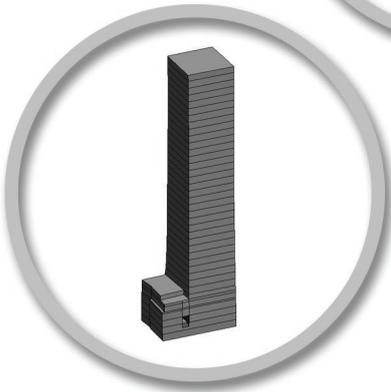
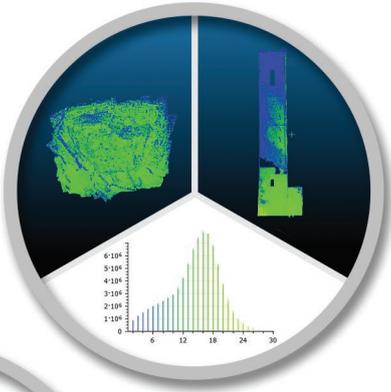
Valori	Tetti	Sommità	Nord	Sud	Ovest	Est	Torre
Media [m]	0,0606	0,0371	0,0110	0,0225	0,0281	0,0292	0,0267
σ [m]	0,0433	0,0507	0,0229	0,0254	0,0240	0,0303	0,0296
RMSE [m]	0,0745	0,0628	0,0283	0,0339	0,0369	0,0421	0,0399

Tabella 67: risultati della surface analysis sotto forma di media aritmetica, deviazione standard e RMSE.

Il risultato finale esprime un errore totale di scostamento dell'intera struttura, rispetto alla nuvola di punti, pari a 4 cm, esattamente identico in valore alla precisione della scala di rappresentazione 1:200. Ciò permette di confermare la congruenza dell'errore con i *LOD* precedentemente suggeriti.



CONCLUSIONI



La presente tesi ha elaborato dati acquisiti con differenti tecniche di rilievo, tra le quali quella fotogrammetrica da *UAV*, quella terrestre, quella *laser scanner* terrestre e quella *SLAM* di più recente sviluppo tecnologico. Queste sono servite per rilevare il caso studio in tutta la sua completezza sia esternamente, attraverso il lavoro congiunto delle prime tre, sia internamente, con la tecnica *SLAM*; oltre all'area del colle Monte Nero attraverso la sola tecnica fotogrammetrica da *UAV*.

L'acquisizione delle immagini della Torre degli Smeducci, mediante drone *UAV*, ha presentato difficoltà riguardanti l'inquadramento della parte inferiore dei fronti sud e ovest a causa della presenza di vegetazione arborea ad alto fusto e del muraglione limitrofo. Per la stessa motivazione nel rilievo fotogrammetrico terrestre, lungo i fronti sopraccitati, è stata compiuta un'acquisizione parziale delle immagini, senza poter seguire il corretto schema di inquadratura studiato per i fronti nord ed est; inoltre l'elevata altezza del manufatto ha portato a una significativa deformazione prospettica dei fotogrammi inquadranti le parti superiori.

I dati elaborati hanno permesso l'estrazione di più nuvole di punti. Quelle del rilievo a scala urbana sono servite a generare un Ortofoto in scala 1:500 inquadrante la zona limitrofa alla Torre degli Smeducci. Quelle del rilievo a scala architettonica sono servite come base per la restituzione grafica bidimensionale e la modellazione 3D intrapresa con la tecnica *HBIM*, volta a una più rapida programmazione di intervento sul monumento.

La rapidità è di fatto uno degli aspetti a cui lo scritto ha rivolto particolare attenzione. La celerità con la quale sono stati effettuati i rilievi ha dovuto scontrarsi con una dilatazione maggiore dei tempi della fase successiva, l'elaborazione dei dati, che è stata portata avanti tramite l'utilizzo di differenti programmi a seconda della tecnica di rilievo impiegata.

I dati acquisiti con tecnica fotogrammetrica sono stati elaborati tramite i due programmi commerciali, *agisoft Photoscan* e *Pix4D mapper* (sia per il rilievo a scala urbana sia per quello a scala architettonica), e uno *open source*, *Visual SFM* (solo per il rilievo a scala urbana). Invece quelli acquisiti con le tecniche *TLS* e *SLAM* sono stati elaborati rispettivamente tramite l'utilizzo dei *software Faro SCENE* e *GeoSLAM Desktop*, sviluppati della relative case di produzione degli strumenti adoperati sul campo.

Se in fase di rilievo le tecniche citate impiegano più o meno lo stesso tempo per acquisire una notevole quantità di dati, in fase di elaborazione quelle che si basano sul principio di funzionamento della scansione *laser* (*TLS* e *SLAM*) restituiscono il prodotto desiderato in tempi nettamente minori rispetto a quelle fotogrammetriche: nel caso in questione meno di un'ora per la tecnica *SLAM*, circa mezza giornata lavorativa per quella *TLS*, da una alle sei giornate lavorative per quella fotogrammetrica.

L'ampia forbice di quest'ultima tipologia di elaborazione dei dati dipende dalla complessità del caso, dal *software* e dal processore utilizzati.

Il secondo aspetto preso in considerazione è la bontà del dato di *output*. Per verificare l'accuratezza di georeferenziazione, la qualità e la precisione delle nuvole di punti prodotte con i vari programmi delle differenti tecniche di rilievo impiegate (tranne quella *SLAM*), sono state compiute analisi di densità e di comparazione *cloud to cloud*.

Nel caso studio, per quanto riguarda la georeferenziazione, la tecnica *TLS* e la relativa elaborazione dati raggiungono un'accuratezza maggiore rispetto a quelle fotogrammetriche (circa il 60% in meno di errore, inteso come *RMSE*). Tra le due tecniche fotogrammetriche invece non si notano grandi differenze, se non nell'utilizzo dei due *software* commerciali: *Pix4D Mapper* permette di generare una nuvola densa di punti più accurata di *Agisoft Photoscan*, dal punto di vista del posizionamento spaziale, di circa il 25% (dato riferito agli *RMSE*). Nonostante ciò, ciascuna nuvola di punti estratta risulta possedere un *RMSE* inferiore alla tolleranza attesa, cioè quella imposta dalla scala di rappresentazione 1:50, sulla quale era stato impostato anche il progetto di rilievo.

Per quanto riguarda la precisione, analizzata con la funzione *cloud to cloud* del programma *CloudCompare*, si può asserire che:

- elaborazioni di dati acquisiti con tecniche di rilievo da *UAV* e terrestri discordanti tra loro (es. tecnica fotogrammetrica da *UAV* con tecnica *TLS*), portano ad un maggiore scostamento dei modelli di *output*, rispetto ad elaborazioni di dati acquisiti con tecniche di rilievo da *UAV* e terrestri concordanti tra loro (es. tecnica *TLS* con tecnica fotogrammetrica terrestre), indipendentemente dal programma utilizzato;
- elaborazioni conseguite con l'uso di differenti *software* commerciali di buona qualità (in questo caso *Agisoft Photoscan* e *Pix4D*) e acquisizioni dati effettuate con le medesime tecniche di rilievo fotogrammetrico, portano ad un valore di scostamento tra i modelli di *output*, pari a circa 0,007 m, inferiore alla precisione richiesta.

Invece, per quanto riguarda la qualità, dalle analisi effettuate su tutti e quattro i fronti della Torre degli Smeducci, le elaborazioni dei dati acquisiti con le tecniche di rilievo terrestre (fotogrammetrica e *laser scanner*), hanno generato delle nuvole maggiormente dense rispetto a quelle ottenute dalle elaborazioni dei dati acquisiti con le tecniche di rilievo da *UAV*. Inoltre, per le prime menzionate, è stata evidenziata una maggiore densità nelle parti inferiori, mentre per le altre la densità è risultata essere distribuita più uniformemente lungo tutte le superfici, tranne nei punti dove la presa era maggiormente disturbata dalla presenza del terreno o da quella di ostacoli fisici, oppure negli spigoli dei prospetti dove il volo del drone stazionava per più tempo.

Stando ai risultati ottenuti, nel caso di futuri rilievi (effettuati con tecniche fotogrammetriche da UAV e terrestri), destinati ad analisi della precisione e della qualità, converrebbe in primo luogo utilizzare camere fotografiche con le stesse caratteristiche (soprattutto stessa risoluzione) in modo tale da appianare alla base le divergenze dovute alle strumentazioni e valutare nel migliore dei modi il confronto tra le singole tecniche. Infatti, in alcuni casi, la migliore risoluzione della camera *Nikon* (utilizzata per il rilievo terrestre) rispetto a quella della camera *Canon* (utilizzata per quello da drone) non ha permesso di restituire risultati numerici ben definiti, lasciando spazio ad interpretazioni dei dati finali. Un esempio è la maggiore densità, riscontrata nelle zone superiori della Torre, delle nuvole di punti frutto del rilievo fotogrammetrico terrestre, rispetto a quelle derivanti da un rilievo da drone, quando nella realtà del caso ci si aspetterebbe il risultato opposto.

Da questa serie di considerazioni è stato possibile scegliere quali parti di nuvole di punti usare per poter realizzare un modello tridimensionale della Torre. La scelta è dunque ricaduta sulla nuvola di punti generata dall'elaborazione dei dati acquisiti con tecnica fotogrammetrica da UAV per poterne rappresentare al meglio le parti alte e le relative coperture (mancanti nelle altre nuvole), e su quella generata dall'elaborazione dei dati acquisiti con tecnica fotogrammetrica terrestre, per poterne rappresentare al meglio le parti basse. Il tutto unito con la nuvola degli ambienti interni elaborata dalla tecnica *SLAM*.

Le caratteristiche geometriche del caso studio, come la rilevante pendenza e non linearità delle pareti murarie, non hanno permesso una classica realizzazione del modello 3D. Infatti per erigere il corpo principale (per di più indirettamente, realizzando col *software PointCAB* sezioni progressive della nuvola di punti distanti tra loro 1 m), al posto dei classici muri parametrici, regolati da proprietà modificabili di volta in volta, sono state utilizzate singole masse sovrapposte l'una all'altra, generando di fatto un unico componente, completato in seguito all'utilizzo del *plug - in PointSense*, atto al riconoscimento semi - automatico delle nuvole di punti sulla piattaforma di modellazione *BIM Autodesk Revit*.

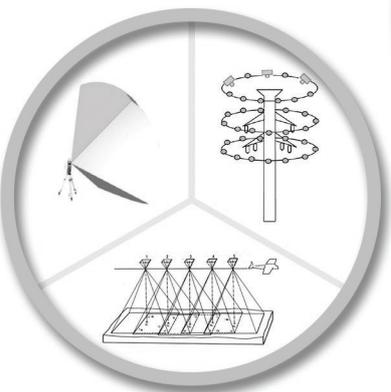
Ciò ha portato, in campo tridimensionale, a un'ulteriore aumento della scala di rappresentazione, rispetto a quella pensata in fase di progetto di rilievo, dovuto all'impossibilità di realizzazione di alcuni elementi e delle relative informazioni. Dalla scala 1:50 si è passati alla scala 1:100 in fase di restituzione 2D (piante, prospetti e sezioni) per adoperarsi di quella 1:200 in fase di modellazione 3D, supportata inoltre dall'analisi di scostamento delle distanze tra la nuvola di punti utilizzata per creare il modello e il modello stesso ($RMSE = 4$ cm, pari alla precisione della scala 1:200).

Lo stesso livello di sviluppo del modello non può essere superiore ad un *LOD200*, non solo per quanto appena spiegato, ma anche per la carenza di numerose e dettagliate

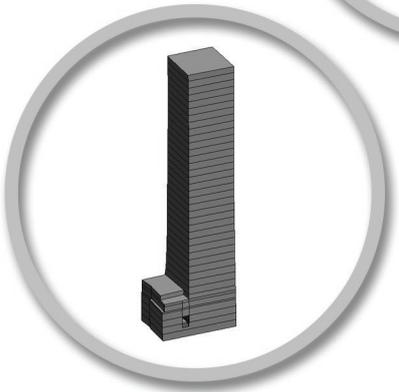
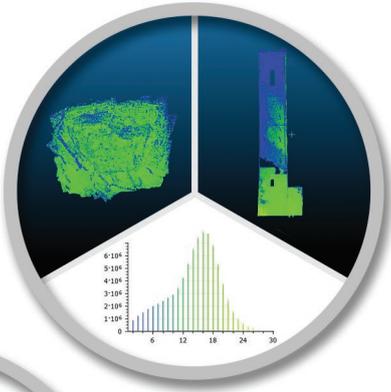
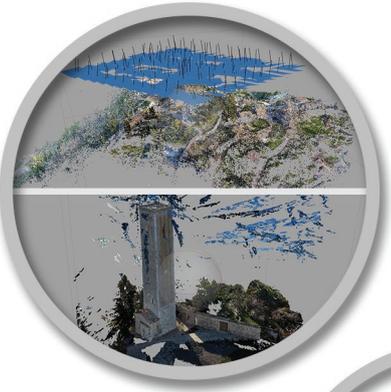
informazioni stratigrafiche, materiche, strutturali e altre, che in un processo *BIM* completo sarebbero a disposizione di tutte le figure professionali coinvolgibili.

Ulteriore problematica in campo *HBIM*, conseguenza delle difficoltà incontrate nello studio della realizzazione del modello, è stata l'applicabilità alle superfici della costruzione 3D della mappatura delle patologie di degrado. Per ottenere un risultato consono alle aspettative e generare un *database* da poter aggiornare in seguito a ipotetici interventi futuri di restauro o di manutenzione programmata, per ciascun fronte è stata necessaria la produzione preventiva di elaborati 2D di mappatura del degrado, serviti come supporto per quella 3D.

In conclusione, con l'introduzione e lo sviluppo di nuovi comandi nei *software* di modellazione parametrica, che permettano di inserire ed editare, non solo nuvole di punti derivanti da rilievi multi - sensore, ma anche *mesh* con *texture* o modelli 3D, come quello generato dal programma *Photoscan (Tiled model)*, si potrebbero ovviare alcuni dei numerosi problemi riscontrati nella fase di modellazione tridimensionale *HBIM*.



BIBLIOGRAFIA



CAPITOLO 1 - SAN SEVERINO MARCHE

- V. E. ALEANDRI, *L'antico statuto municipale di Sanseverino Marche fatto nel 1426*, Sanseverino, 1890;
- G. ANNIBALDI, *La necropoli picena di Pitino di San Severino, in Ricerche sull'età romana e preromana nel maceratese. Atti del IV Convegno del Centro di Studi Storici Maceratesi, San Severino 1968*, Macerata, 1970;
- C. BARBIERI, *Sopra la topografia fisico-medica della città di Sanseverino*, Macerata, 1841;
- G. BARTOLOMMEI, *Didascalìa cioè dottrina comica libri tre (1658-1661): l'opera esemplare di un 'moderato riformatore'. Saggio introduttivo, edizione critica e note di Sandro Piazzesi*, Firenze University Press, Firenze, 2016;
- C.C.C.V.R. (a cura di), *La Resistenza in San Severino Marche (8 settembre 1943-1 luglio 1944)*, Bellabarba, San Severino Marche, 1965.
- B. P. GENTILI, *Dissertazione sopra le antichità di Settempeda, ovvero Sanseverino*, stamperia di Gio Zempel, Monte Giordano, 1742;
- G. C. GENTILI, *De ecclesia septempedana libri III*, ex Officina Alessandro Mancini, Macerata, 1838;
- M. LANDOLFI, *Settempeda e l'agro septempedano: contributi alla ricostruzione della rete viaria antica, in Le strade nelle Marche. Il problema nel tempo. Atti del Convegno, Fano-Fabriano-Pesaro-Ancona 1984*, Ancona, 1987;
- M. LANDOLFI, *Settempeda. Il parco archeologico*, San Severino, 1991;
- L. LOSITO, *San Severino Marche, un gioiello da scoprire*;
- M. MORETTI, *I Piceni a Pitino, in Miscellanea Septempedana*, Severino Marche, 1976;
- G. MORONI, *Sanseverino, città vescovile dello Stato pontificio*, Venezia, 1854;
- R. PACIARONI, *Il campanone della torre comunale di Sanseverino*, San Severino Marche, 1985;
- R. PACIARONI, *La torre del castello di Sanseverino e le sue funzioni di avvistamento e di segnalazione*, Associazione Palio dei Castelli, Sanseverino Marche, 2014;
- G. PIANGATELLI, *Tempi e vicende della Resistenza a San Severino Marche*, ANPI, Macerata, 1985;
- S. SERVANZI COLLIO, *Relazione storica sulla chiesa di S. Lorenzo in S. Severino*, Macerata, 1838;
- D. VALENTINI, *Il forastiere in Sanseverino-Marche, ossia brevi indicazioni degli oggetti di belle arti e altre cose notevoli esistenti in detta città*, San Severino, 1868;

- D. VALENTINI, *Saggio di bibliografia storica della città di Sanseverino nelle Marche*, Sanseverino, 1875.

CAPITOLO 2

- AA. VV., *Ortoimmagini 10K e modelli altimetrici*, CISIS;
- D. BARTOLUCCI, *Principi di laser scanning 3D: hardware - metodologie - esempi*, Dario Flaccovio Editore, 2009;
- G. BASSANELLO, *La tecnica del laser a scansione nel rilevamento di strutture: un caso studio*, Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, Università di Bologna, A. A. 2006/2007;
- Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI), *Norma EN 60825 - 1: Sicurezza degli apparecchi laser: classificazione delle apparecchiature, prescrizioni e guida per l'utilizzatore*, 2009;
- E. DUFF, *Recent development in SLAM: Technology and its impact on mine automation*, QLD Mining&Energy, 2011;
- H. DURRANT - WHYTE, T. BAILEY, *Simultaneous Localization and Mapping: Part I*, IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006;
- A. FUSIELLO, *Visione computazionale, tecniche di ricostruzione tridimensionale*, Franco Angeli, Milano 2013;
- F. GUERINI, *Rilievo: classificazione e metodologie*, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura e Società, dispense del corso Laboratorio di Rappresentazione 1;
- N. HAALA, *High density image matching, Module 1: Image Orientation and Object to Image Mapping, Part a: Computation of orientation parameters*, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart;
- A. M. LINGUA, *Capitolati per la produzione di cartografia numerica, i metadati, fotogrammetria diretta, droni*, Politecnico di Torino, dispense del corso di cartografia numerica e GIS, a.a. 2016/2017;
- A. M. LINGUA, *Elaborazione dei dati acquisiti: fotogrammetria e Structure from Motion*, Politecnico di Torino, 2017;
- A. M. LINGUA, *Fotogrammetria da drone: basi teoriche della presa, requisiti di precisione e piano di volo*, Conferenza ASITA, Cagliari, 2016;
- A. M. LINGUA, *Fotogrammetria digitale*, Politecnico di Torino, dispense del corso di cartografia numerica e GIS, a.a. 2016/2017;
- A. M. LINGUA, *La fotogrammetria*, Politecnico di Torino, dispense del corso di cartografia numerica e GIS, A.A. 2016/2017;
- M. LO BRUTTO, *Geomatica e modellazione digitale del terreno, elementi di fotogrammetria digitale*, 2005;
- E. NOCERINO, F. REMONDINO, *Uso consapevole di software speditivi per ricostruzioni 3D*, GEOmedia, 2016;
- A. PIEMONTE, *Introduzione al laser scanner*, Università di Pisa;

- M. SGRENZAROLI, G. P. M. VASSENA, *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner: Volume 1 - Introduzione generale*, Università degli Studi di Brescia;
- D. ULLMAN, *High - level Vision*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1996.

CAPITOLO 3

- A. M. LINGUA, *Capitolati per la produzione di cartografia numerica, I metadati, fotogrammetria diretta, droni*, Dispense del corso di “Cartografia numerica e GIS”, Politecnico di Torino.

CAPITOLO 4

- Agisoft LLC, *Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 1.2*, 2016;
- Pix4D SA, *Pix4D software manual*, 2015;
- Faro Technologies Inc., *SCENE 5.1 - User manual*, 2012.

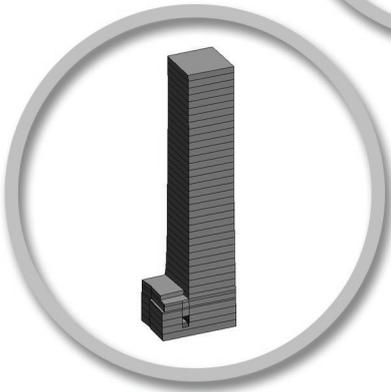
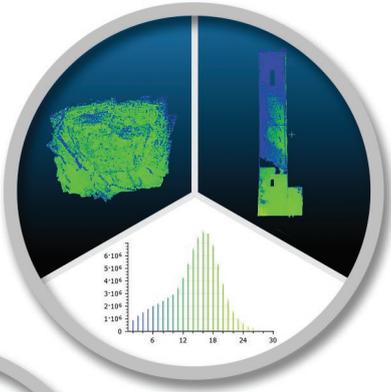
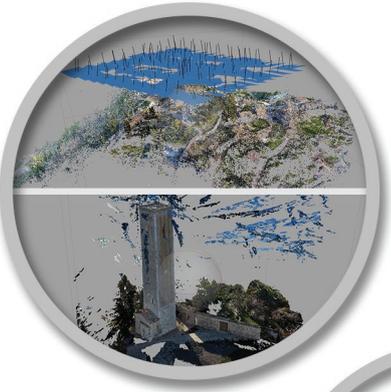
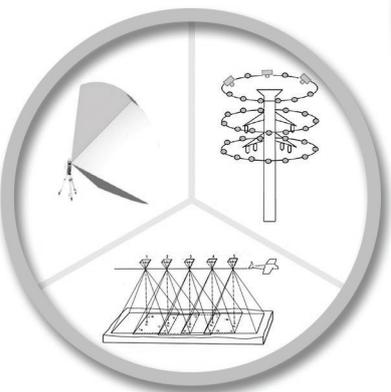
CAPITOLO 6

- AA.VV., *Norma UNI 11182*, 2006;
- C. BRANDI, *Teoria del restauro*, Einaudi, Torino, 1977;
- B. P. TORSELLO, *La materia del restauro*, Marsilio, Venezia, 1988.

CAPITOLO 7

- AIA, *Document G202 - Project Building Information Modeling Protocol Form*, 2013;
- 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 in Beni Architettonici e del Paesaggio, Politecnico di Torino, A. A. 2015/2016;
- A. OSELLO, *From CAD to BIM*, Dispense del corso di Disegno per il Progetto - Progettazione Edile, Politecnico di Torino, 2014;
- A. OSELLO, *Revit Architecture - Part 01*, Dispense del corso di Disegno per il Progetto - Progettazione Edile, Politecnico di Torino, 2014;

- P. RANIERI, *L'approccio BIM per la documentazione dell'architettura storica: una proposta applicativa del Castello del Valentino*, tesi di laurea magistrale in Architettura, Politecnico di Torino, A. A. 2014/2015;
- UNI, *UNI 11337/2017: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti*, 2017.



SITOGRAFIA

CAPITOLO 1 - SAN SEVERINO MARCHE

- http://www.treccani.it/enciclopedia/san-severino-marche_%28Enciclopedia-Italiana%29/
- <https://quintaregio-picenum.it/gg/Septempeda.htm>
- http://www.italiapedia.it/comune-di-san-severino-marche_Storia-043-047
- http://www.archeologiamacerata.sinp.net/siti_potenza/testi/septempeda.html
- http://spazioinwind.libero.it/popoli_antichi/altro/Septempeda.html
- http://www.treccani.it/enciclopedia/septempeda_%28Enciclopedia-dell%27-Arte-Antica%29/
- <http://www.santiebeati.it/dettaglio/90943>
- <http://rm.univr.it/iper/infomatio/pagine/pers14.htm>
- http://www.storiamarche900.it/main?p=storia_territorio_sanseverino
- <http://www.turismomacerata.it/it/abbazie/abbazia-di-san-lorenzo-doliolo>
- https://it.wikipedia.org/wiki/Concattedrale_di_Sant%27Agostino
- https://it.wikipedia.org/wiki/San_Severino_Marche
- <http://www.provincia.mc.it/curiosita-cms/le-mura-e-la-torre-torre-civica-di-s-severino/>

CAPITOLO 2

- <http://www.lundici.it/2010/05/50-anni-e-non-li-dimostra/>
- https://it.wikipedia.org/wiki/Laser_scanner#/media/File:Principio_Laser_scanner_distanziometrici.jpg
- <https://research.csiro.au/robotics/research-areas/>
- https://it.wikipedia.org/wiki/Geometria_epipolare

CAPITOLO 3

- http://www.geomax-positioning.it/Serie-Zenith25-Pro_1336.htm
- <http://www.edilmaco.it/it/prodotto/leica-1200-gps/>
- <https://www.sensefly.com/drones/ebee.html>
- <https://www.dji.com/phantom-4>
- <http://www.nikonusa.com/en/nikon-products/product-archive/dslr-cameras/d800e.html>
- <http://www.faro.com>
- <https://geoslam.com/>

- <https://geoslam.com/hardware/zeb-revo/>

CAPITOLO 4

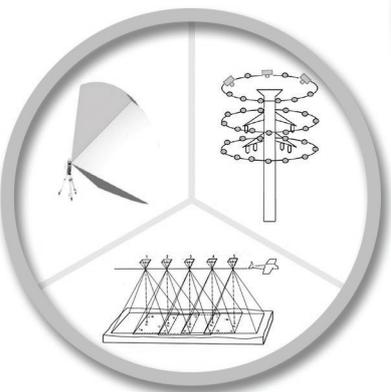
- <http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=3559.0>
- <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/208194103#label2&gsc.tab=0>
- <http://ccwu.me/vsfm/>

CAPITOLO 5

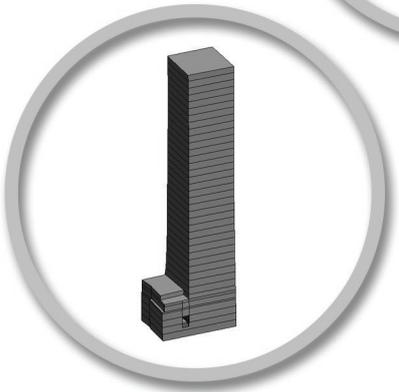
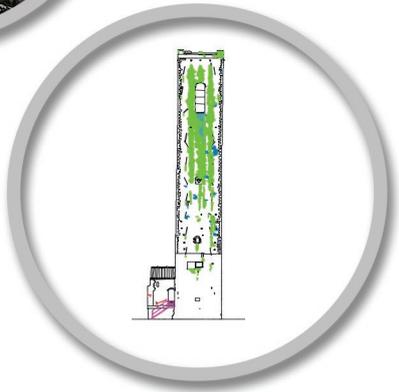
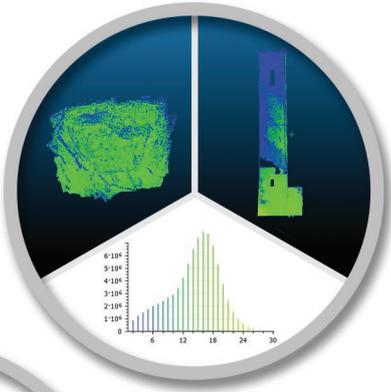
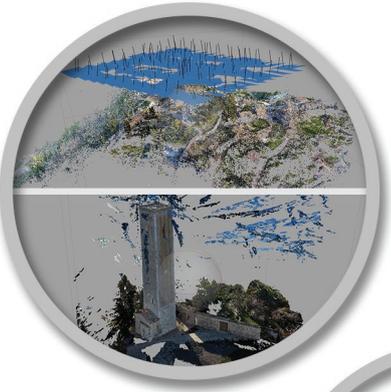
- <http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Density>

CAPITOLO 7

- <http://commenta.formez.it/ch/CodiceAppalti>
- <http://www.ibimi.it/lod-livello-di-dettaglio-per-il-bim/>
- <http://www.harpaceas.it/il-bim-e-il-concetto-di-dettaglio-e-lod/>



ALLEGATI





Indagini geomatiche e geofisiche

Luogo: SAN SEVERINO MARCHE

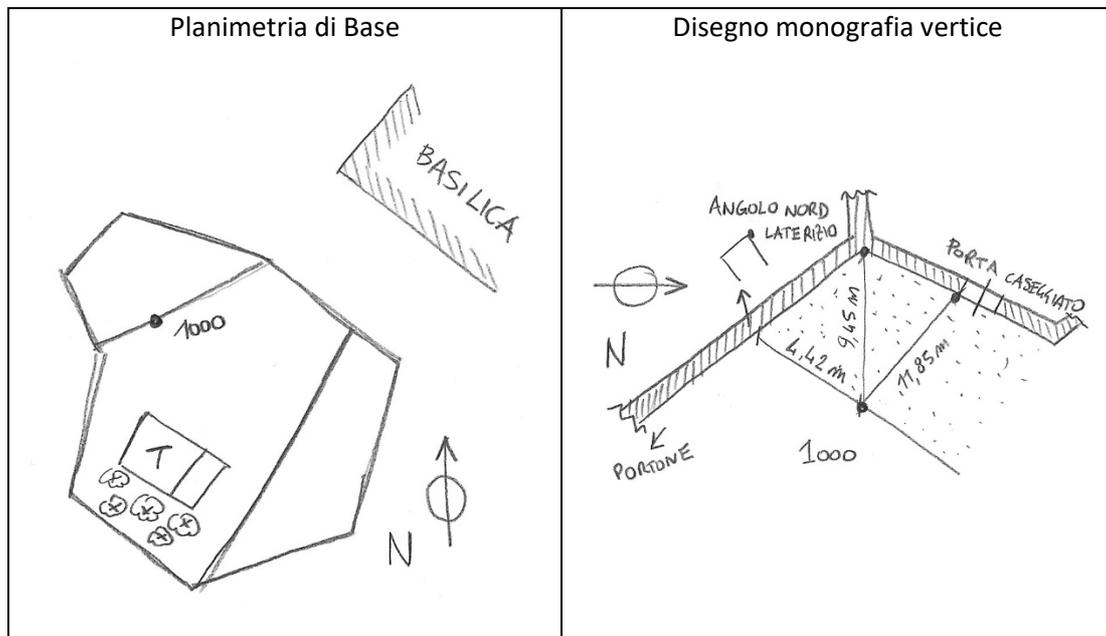
Data: 21/02/2017

POLITECNICO DI TORINO

Operatori: STEFANO PERRI, ALESSIA ROSIGNUOLO

MONOGRAFIA DI VERTICE DELLA RETE PRINCIPALE DI INQUADRAMENTO

NOME VERTICE: 1000



Tipo di materializzazione: CHIODO CON PIATTELLO

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): ALESSIA (IPHONE 7) ORE 9:55

Strumento di rilievo: GPS GEOMAX ZENITH25

Altezza strumentale: INCLINATA 1,506 m - VERTICALE 1,499 m

Tipo di antenna: Z 1011

Ora inizio acquisizione e operatore: 10:18 GIULIA

Ora fine acquisizione e operatore: 11:45 LORENZO

RMS: /

Problemi eventuali: /

Note: /

Coordinate: /

Sistema: UTM WGS84



Indagini geomatiche e geofisiche

Luogo: SAN SEVERINO MARCHE

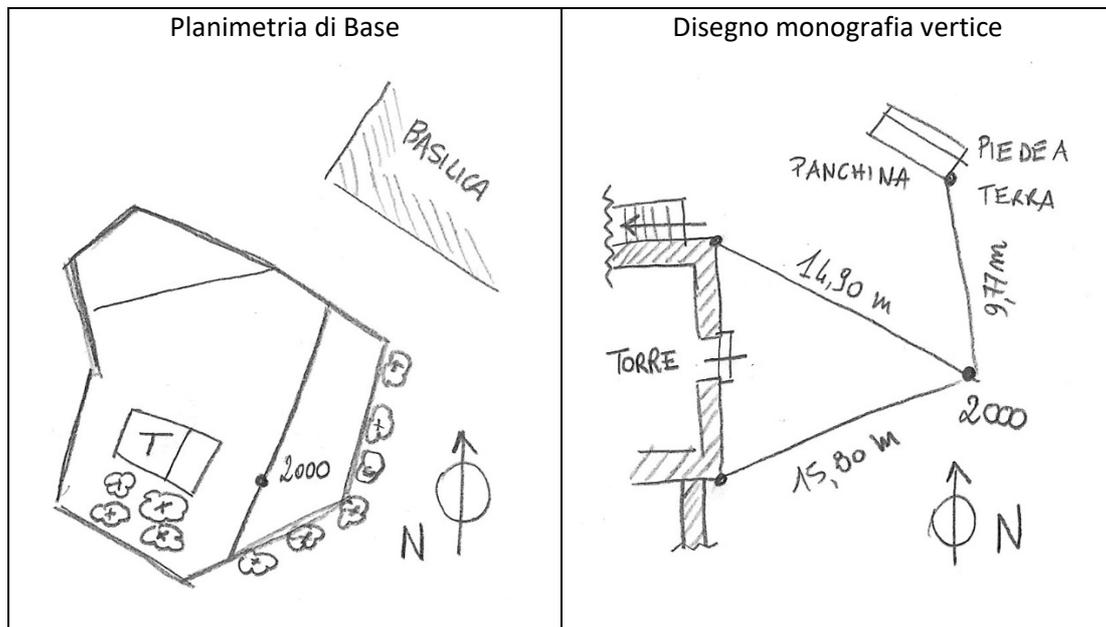
Data: 21/02/2017

POLITECNICO DI TORINO

Operatori: STEFANO PERRI, ALESSIA ROSIGNUOLO

MONOGRAFIA DI VERTICE DELLA RETE PRINCIPALE DI INQUADRAMENTO

NOME VERTICE: 2000



Tipo di materializzazione: CHIODO CON PIATTELLO

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): ALESSIA (IPHONE 7) ORE 10:33

Strumento di rilievo: GPS GEOMAX ZENITH25

Altezza strumentale: INCLINATA 1,598 m - VERTICALE 1,591 m

Tipo di antenna: Z 1011

Ora inizio acquisizione e operatore: 10:25 LORENZO

Ora fine acquisizione e operatore: 14:00 LORENZO

RMS: /

Problemi eventuali: /

Note: /

Coordinate: /

Sistema: UTM WGS84



Indagini geomatiche e geofisiche

Luogo: SAN SEVERINO MARCHE

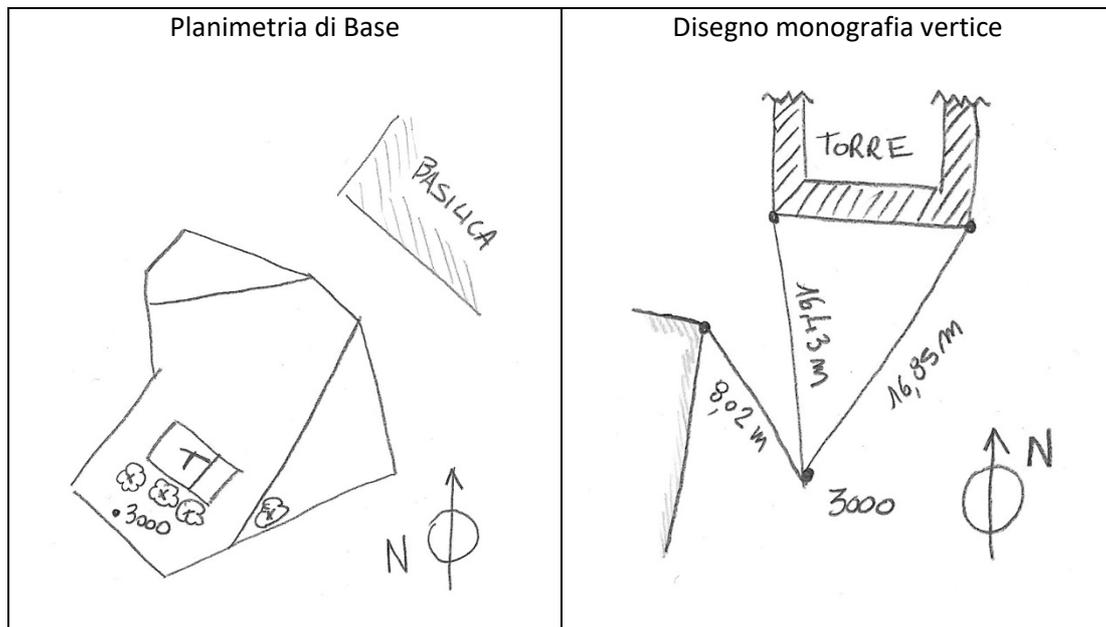
Data: 21/02/2017

POLITECNICO DI TORINO

Operatori: STEFANO PERRI, ALESSIA ROSIGNUOLO

MONOGRAFIA DI VERTICE DELLA RETE PRINCIPALE DI INQUADRAMENTO

NOME VERTICE: 3000



Tipo di materializzazione: TONDINO IN ACCIAIO

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): ALESSIA (IPHONE 7) ORE 10:20

Strumento di rilievo: GPS LEICA 1200 SERIES

Altezza strumentale: 1,223 m + UNCINO

Tipo di antenna: GPS

Ora inizio acquisizione e operatore: 10:15 LORENZO, ALBERTO

Ora fine acquisizione e operatore: 12:05 LORENZO

RMS: /

Problemi eventuali: /

Note: /

Coordinate: /

Sistema: UTM WGS84



Indagini geomatiche e geofisiche

Luogo: SAN SEVERINO MARCHE

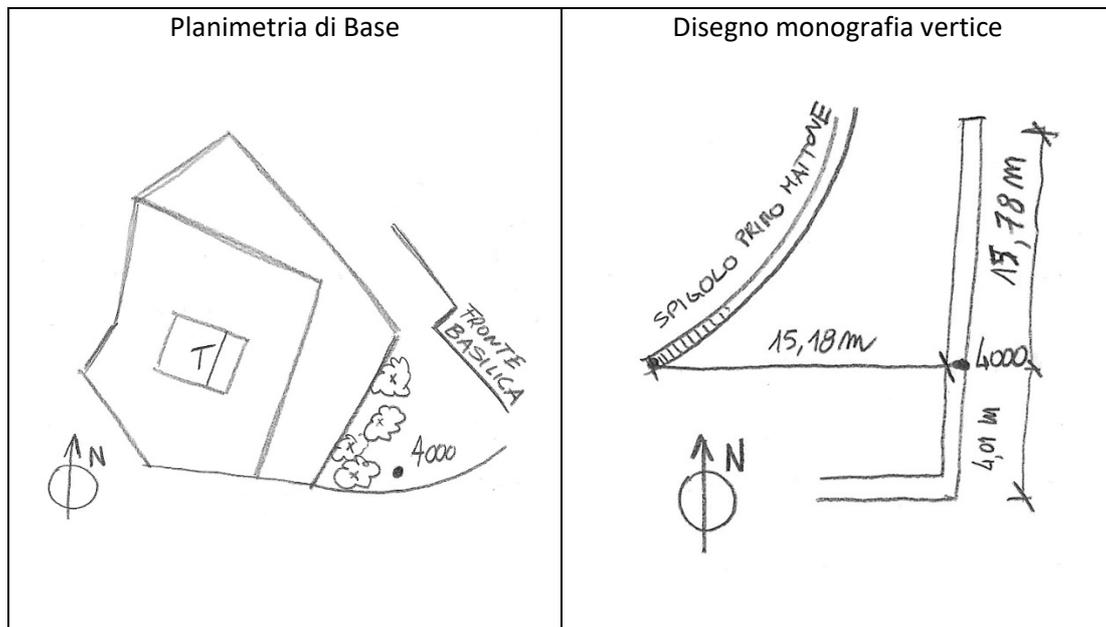
Data: 21/02/2017

POLITECNICO DI TORINO

Operatori: STEFANO PERRI, ALESSIA ROSIGNUOLO

MONOGRAFIA DI VERTICE DELLA RETE PRINCIPALE DI INQUADRAMENTO

NOME VERTICE: 4000



Tipo di materializzazione: CHIODO CON PIATTELLO

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): ALESSIA (IPHONE 7) ORE 10:47

Strumento di rilievo: GPS LEICA 1200 SERIES

Altezza strumentale: 1,082 m + UNCINO

Tipo di antenna: GPS

Ora inizio acquisizione e operatore: 10:18 ALBERTO, ALBERTO

Ora fine acquisizione e operatore: /

RMS: /

Problemi eventuali: /

Note: /

Coordinate: /

Sistema: UTM WGS84



Indagini geomatiche e geofisiche

Luogo: SAN SEVERINO MARCHE

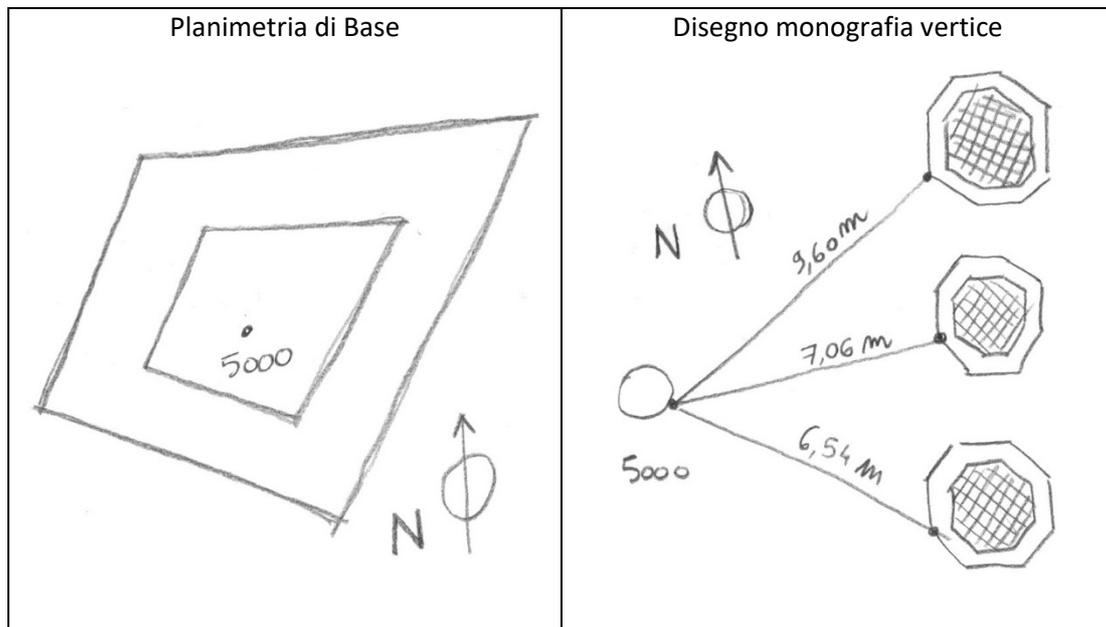
Data: 21/02/2017

POLITECNICO DI TORINO

Operatori: STEFANO PERRI

MONOGRAFIA DI VERTICE DELLA RETE PRINCIPALE DI INQUADRAMENTO

NOME VERTICE: 5000



Tipo di materializzazione: PUNTO NATURALE ANTROPICO

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): STEFANO (CANON PC 1354)

Strumento di rilievo: GPS LEICA 1200 SERIES

Altezza strumentale: 1,362 m + UNCINO

Tipo di antenna: GPS

Ora inizio acquisizione e operatore: 10:28 LORENZO, ANDREA

Ora fine acquisizione e operatore: /

RMS: /

Problemi eventuali: /

Note: /

Coordinate: /

Sistema: UTM WGS84



Indagini geomatiche e geofisiche

Luogo: SAN SEVERINO MARCHE

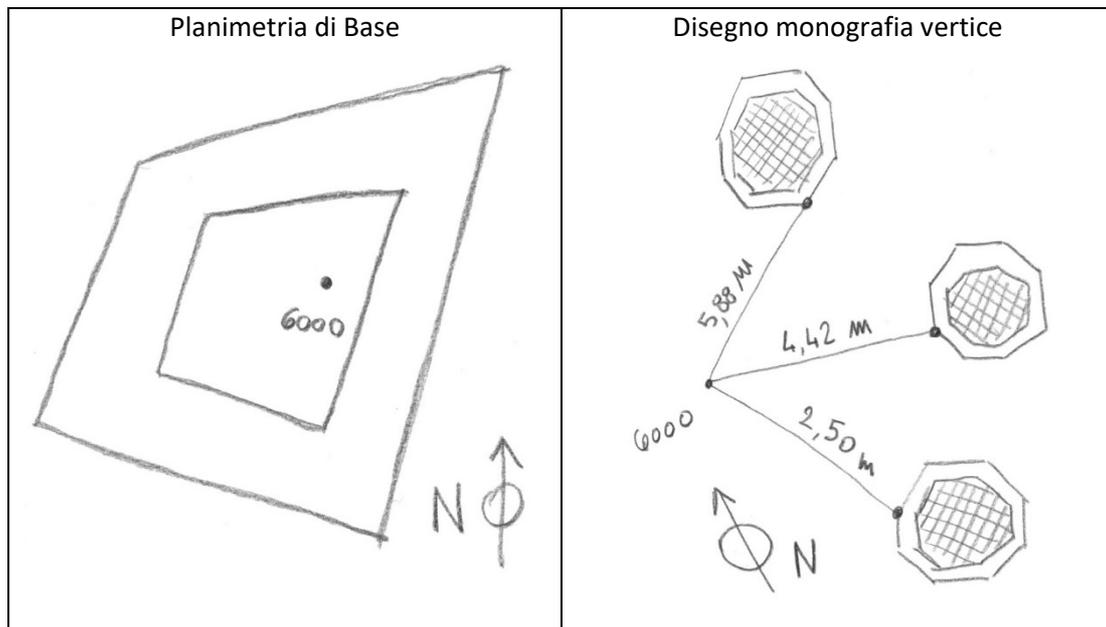
Data: 21/02/2017

POLITECNICO DI TORINO

Operatori: STEFANO PERRI

MONOGRAFIA DI VERTICE DELLA RETE PRINCIPALE DI INQUADRAMENTO

NOME VERTICE: 6000



Tipo di materializzazione: CHIODO

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): STEFANO CANON PC 1354

Strumento di rilievo: GPS GEOMAX ZENITH25

Altezza strumentale: INCLINATA 1,537 m – VERTICALE 1,529 m

Tipo di antenna: Z 1011

Ora inizio acquisizione e operatore: 10:18 ALBERTO, ALBERTO

Ora fine acquisizione e operatore: /

RMS: /

Problemi eventuali: /

Note: /

Coordinate: /

Sistema: UTM WGS84

Elaborazione dati fotogrammetria da UAV

Scala urbana colle Monte Nero: elaborazione dati con Agisoft Photoscan

CHUNK 1 - VOLO DJI PHANTOM4

Nome marker	Tipologia	E_{XY} [m]	E_z [m]	E_{XYZ} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
M1	Control points	0,0052	0,0026	0,0058	29	1,395
M03	Control points	0,0687	0,0763	0,1027	8	0,700
M15	Control points	0,0390	0,0058	0,0394	19	1,102
M16	Control points	0,0323	0,0188	0,0374	21	1,033
E_{medio}	-	0,0363	0,0252	0,0463	-	1,058
σ	-	0,0226	0,0297	0,0352	-	0,247
RMSE	-	0,0428	0,0394	0,0582	-	1,172
Marker non collimati	M04, M05, M06, M07, M08, M09, M11, M012, M013, M014, M17, M18, M19, M111					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

CHUNK 2 - VOLO SENSEFLY EBEE

Nome marker	Tipologia	E_{XY} [m]	E_z [m]	E_{XYZ} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
M1	Control points	0,0090	0,0030	0,0094	9	0,094
M04	Control points	0,0035	0,0016	0,0038	12	0,053
M05	Control points	0,0069	0,0025	0,0074	19	0,097
M06	Control points	0,0204	0,0076	0,0218	17	0,128
M07	Control points	0,0263	0,0001	0,0294	11	0,430
M08	Control points	0,0274	0,0107	0,0263	17	0,301
M09	Control points	0,0135	0,0071	0,0152	14	0,130
M11	Control points	0,0363	0,0097	0,0376	14	0,252
M012	Control points	0,0182	0,0007	0,0182	18	0,193
M013	Control points	0,0180	0,0099	0,0205	17	0,125
M014	Control points	0,0178	0,0014	0,0179	13	0,056
M15	Control points	0,0118	0,0018	0,0120	12	0,080
M19	Control points	0,0176	0,0031	0,0179	8	0,318
E_{medio}	-	0,0174	0,0046	0,0183	-	0,1736
σ	-	0,0086	0,0037	0,0089	-	0,1127
RMSE	-	0,0195	0,0059	0,0203	-	0,199
M03	Check points	0,0756	0,0727	0,1049	4	0,295
M2	Check points	-	-	-	9	0,132
M18	Check points	-	-	-	14	0,255
RMSE	-	0,0756	0,0727	0,1049	-	0,295
Marker non collimati	M16, M17, M111					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

CHUNK 3 - UNIONE VOLI DJI PHANTOM4 & SENSEFLY EBEE

Nome marker	Tipologia	E_{xy} [m]	E_z [m]	E_{xyz} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
M1	Control points	0,0011	0,0004	0,0012	38	1,222
M04	Control points	0,0055	0,0037	0,0067	12	0,059
M05	Control points	0,0066	0,0023	0,0070	19	0,098
M06	Control points	0,0233	0,0087	0,0248	17	0,143
M07	Control points	0,0273	0,0107	0,0293	11	0,43
M08	Control points	0,0260	0,0000	0,0260	17	0,301
M09	Control points	0,0133	0,0069	0,0149	14	0,13
M11	Control points	0,0364	0,0098	0,0377	14	0,253
M012	Control points	0,0182	0,0006	0,0182	18	0,193
M013	Control points	0,0179	0,0101	0,0206	17	0,125
M014	Control points	0,0189	0,0001	0,0189	13	0,057
M15	Control points	0,0217	0,0091	0,0235	31	0,868
M16	Control points	0,0137	0,0050	0,0146	21	1,032
M19	Control points	0,0178	0,0034	0,0181	8	0,318
E_{medio}	-	0,0177	0,0051	0,0187	-	0,3735
σ	-	0,0090	0,0039	0,0093	-	0,3690
RMSE	-	0,0199	0,0064	0,0209	-	0,662
M03	Check points	0,0627	0,1118	0,1281	12	0,608
M2	Check points	-	-	-	9	0,137
M18	Check points	-	-	-	14	0,255
RMSE	-	0,0627	0,1118	0,1281	-	0,608
Marker non collimati	M17, M111					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

Elaborazione dati fotogrammetria da UAV
Scala urbana colle Monte Nero: elaborazione dati con Pix4D Mapper

PROGETTO 1 - VOLO DJI PHANTOM4

Nome marker	Tipologia	E_{XY} [m]	E_z [m]	E_{XYZ} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
M03	Control points	0,0181	0,0130	0,0223	8	1,089
M1	Control points	0,0057	0,0010	0,0057	29	1,712
M15	Control points	0,0291	0,0020	0,0291	19	1,8
M16	Control points	0,0219	0,0020	0,0220	21	1,671
E_{medio}	-	0,0187	0,0045	0,0198	-	1,568
σ	-	0,0085	0,0049	0,0086	-	0,280
RMSE	-	0,0205	0,0068	0,0216	-	1,593
Marker non collimati	M04, M05, M06, M07, M08, M09, M11, M012, M013, M014, M17, M18, M19, M111					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

PROGETTO 2 - VOLO SENSEFLY EBEE

Nome marker	Tipologia	E_{XY} [m]	E_z [m]	E_{XYZ} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
M1	Control points	0,0071	0,0140	0,0157	9	0,565
M04	Control points	0,0098	0,0070	0,0121	12	0,595
M05	Control points	0,0135	0,0090	0,0162	18	0,381
M06	Control points	0,0348	0,0230	0,0417	17	0,421
M07	Control points	0,0161	0,0090	0,0185	11	0,369
M08	Control points	0,0184	0,0210	0,0279	17	0,358
M09	Control points	0,0194	0,0290	0,0349	12	0,546
M11	Control points	0,0380	0,0140	0,0405	17	0,599
M012	Control points	0,0180	0,0230	0,0292	22	0,462
M013	Control points	0,0244	0,0420	0,0485	17	0,624
M014	Control points	0,0240	0,0030	0,0242	13	0,613
M15	Control points	0,0156	0,0180	0,0238	12	0,527
M19	Control points	0,0222	0,0050	0,0228	9	0,423
E_{medio}	-	0,0187	0,0155	0,0254	-	0,463
σ	-	0,0086	0,0106	0,0109	-	0,102
RMSE	-	0,0218	0,0196	0,0294	-	0,508
M03	Check points	0,1092	0,0057	0,1094	6	0,639
M16	Check points	0,0717	0,0266	0,0764	10	0,442
RMSE	-	0,0924	0,0192	0,0944	-	0,549
Marker non collimati	M2, M17, M18, M111					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

PROGETTO 3 – UNIONE VOLI DJI PHANTOM4 & SENSEFLY EBEE

Nome marker	Tipologia	E_{xy} [m]	E_z [m]	E_{xyz} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
M1	Control points	0,0151	0,0080	0,0171	38	0,924
M04	Control points	0,0184	0,0070	0,0197	12	0,506
M05	Control points	0,0125	0,0070	0,0144	18	0,354
M06	Control points	0,0334	0,0270	0,0430	17	0,366
M07	Control points	0,0150	0,0080	0,0170	11	0,306
M08	Control points	0,0190	0,0180	0,0262	17	0,330
M09	Control points	0,0214	0,0250	0,0329	12	0,503
M11	Control points	0,0372	0,0070	0,0379	17	0,470
M012	Control points	0,0180	0,0210	0,0277	22	0,410
M013	Control points	0,0225	0,0380	0,0441	17	0,574
M014	Control points	0,0225	0,0040	0,0228	13	0,518
M15	Control points	0,0311	0,0040	0,0313	31	0,876
M19	Control points	0,0220	0,0080	0,0234	9	0,359
<i>E_{medio}</i>	-	0,0206	0,0130	0,0255	-	0,464
<i>σ</i>	-	0,0073	0,0104	0,0096	-	0,192
RMSE	-	0,0234	0,0174	0,0292	-	0,552
M03	Check points	0,0472	0,1061	0,1161	14	1,207
M16	Check points	0,0398	0,0603	0,0722	31	0,986
RMSE	-	0,0436	0,0863	0,0967	-	0,956
<i>Marker non collimati</i>	M2, M17, M18, M111					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

Elaborazione dati fotogrammetria da UAV

Scala urbana colle Monte Nero: elaborazione dati con Visual SFM

Marker	Coordinate iniziali			Coordinate stimate		
	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
M1	351886,4490	4787540,0170	342,0100	351886,4561	4787540,0603	342,3915
M04	352090,9590	4787566,0300	312,2300	352091,0036	4787565,6637	311,7155
M05	352026,9800	4787658,2120	262,5990	352027,0110	4787658,0339	262,5353
M07	351800,2510	4787652,0050	304,6100	351800,1794	4787652,1577	304,7170
M08	351821,4540	4787657,0160	298,8630	351821,4636	4787657,2919	299,1042
M09	351732,3580	4787619,1720	311,2530	351732,0693	4787619,2406	311,2193
M11	351740,4350	4787394,3520	287,1900	351740,6588	4787394,3675	287,1502
M012	351724,8870	4787380,6950	285,0320	351725,1632	4787380,7373	284,9489
M013	351820,1790	4787387,0660	300,6600	351820,2903	4787387,1932	300,5774
M014	351944,9730	4787363,0010	326,6550	351944,8246	4787363,1666	326,8675
M15	351967,8360	4787511,3670	336,9010	351967,8076	4787511,2939	337,0652
M19	351654,6350	4787543,2653	303,3810	351654,4685	4787542,3792	303,0920

Errori dei GCP post collimazione

Marker	Tipologia	E_x [m]	E_y [m]	E_z [m]	E_{xyz} [m]	
M1	Control points	0,0071	0,0433	0,0439	0,3840	
M04	Control points	0,0446	0,3663	0,3690	0,6331	
M05	Control points	0,0310	0,1781	0,1808	0,1917	
M07	Control points	0,0716	0,1527	0,1687	0,1997	
M08	Control points	0,0096	0,2759	0,2761	0,3666	
M09	Control points	0,2887	0,0686	0,2967	0,2986	
M11	Control points	0,2238	0,0155	0,2243	0,2278	
M012	Control points	0,2762	0,0423	0,2794	0,2915	
M013	Control points	0,1113	0,1272	0,1690	0,1881	
M014	Control points	0,1484	0,1656	0,2224	0,3076	
M15	Control points	0,0284	0,0731	0,0784	0,1820	
M19	Control points	0,1665	0,8861	0,9016	0,9468	
E_{medio}	-	0,1173	0,1996	0,2675	0,3515	
σ	-	0,0983	0,2292	0,2102	0,2165	
RMSE	-	0,1530	0,3039	0,3402	0,2338	0,4128
Marker non collimati	M2, M03, M06 M16, M17, M18, M111					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

Elaborazione dati fotogrammetria da UAV
Scala architettonica Torre degli Smeducci: elaborazione dati con Agisoft
Photoscan

CHUNK 1 - VOLO DJI PHANTOM4

Nome marker	Tipologia	E_{xy} [m]	E_z [m]	E_{xyz} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
7	Control points	0,0064	0,0092	0,0112	14	0,323
8	Control points	0,0076	0,0085	0,0114	15	0,402
9	Control points	0,0092	0,0080	0,0121	18	0,247
10	Control points	0,0136	0,0087	0,0161	13	0,346
14	Control points	0,0098	0,0067	0,0118	8	0,263
15	Control points	0,0043	0,0047	0,0064	9	0,285
16	Control points	0,0077	0,0071	0,0105	7	0,369
51	Control points	0,0117	0,0055	0,0130	4	0,259
52	Control points	0,0160	0,0061	0,0171	3	0,100
53	Control points	0,0134	0,0113	0,0175	5	0,418
54	Control points	0,0173	0,0209	0,0209	4	0,313
TORB1	Control points	0,0081	0,0079	0,0113	17	0,561
TORB2	Control points	0,0063	0,0089	0,0109	18	0,582
TORB3	Control points	0,0140	0,0069	0,0156	20	0,866
TORB4	Control points	0,0099	0,0126	0,0160	19	0,419
TORB7	Control points	0,0158	0,0082	0,0178	17	0,580
TORB8	Control points	0,0070	0,0126	0,0144	18	1,026
TORB9	Control points	0,0017	0,0198	0,0199	26	0,647
TORB10	Control points	0,0176	0,0266	0,0319	29	0,688
TORB11	Control points	0,0112	0,0058	0,0127	18	0,431
TORB12	Control points	0,0160	0,0103	0,0190	21	1,085
TORB13	Control points	0,0016	0,0111	0,0112	13	0,312
TORB14	Control points	0,0071	0,0022	0,0074	17	0,747
TORB15	Control points	0,0045	0,0128	0,0136	18	0,743
TORB18	Control points	0,0078	0,0146	0,0165	16	0,572
TORB19	Control points	0,0147	0,0153	0,0212	19	0,857
TORB21	Control points	0,0158	0,0212	0,0264	20	0,461
TORB23	Control points	0,0141	0,0179	0,0227	30	0,926
TORB24	Control points	0,0190	0,0078	0,0205	25	0,554
TORB25	Control points	0,0176	0,0050	0,0183	21	0,926
TORB27	Control points	0,0160	0,0193	0,0251	22	0,936
TORB29	Control points	0,0044	0,0184	0,0190	21	0,611
TORB31	Control points	0,0119	0,0134	0,0179	29	0,870
<i>E_{medio}</i>	-	0,0109	0,0114	0,0163	-	0,567
σ	-	0,0049	0,0057	0,0054	-	0,258
<i>RMSE</i>	-	0,0119	0,0124	0,0172	-	0,688
TORB16	Check points	0,0477	0,0506	0,0695	16	0,680

TORB22	Check points	0,0251	0,0311	0,0399	26	0,767
TORB30	Check points	0,0103	0,0282	0,0301	24	1,135
RMSE	-	0,0317	0,0379	0,0494	-	0,901
Marker non collimati	34, 35, 36, TORB5, TORB 6 TORB 17, TORB 20, TORB 22, TORB 28, TORB 30, TORB 32, TORB33, TORB 34					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

CHUNK 2 - PRESA TERRESTRE CAMERA NIKON - 10 FOTOGRAMMI

Nome marker	Tipologia	E_{xy} [m]	E_z [m]	E_{xyz} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
34	Control points	0,0084	0,0145	0,0167	3	0,170
35	Control points	0,0042	0,0091	0,0100	6	0,706
36	Control points	0,0120	0,0005	0,0120	8	0,258
51	Control points	0,0068	0,0021	0,0071	4	0,493
52	Control points	0,0066	0,0002	0,0066	4	0,190
53	Control points	0,0058	0,0019	0,0061	4	0,264
54	Control points	0,0123	0,0007	0,0123	3	0,518
TORB25	Control points	0,0160	0,0220	0,0272	2	0,021
E_{medio}	-	0,0090	0,0034	0,0123	-	0,328
σ	-	0,0038	0,0082	0,0066	-	0,210
RMSE	-	0,0098	0,0099	0,0139	-	0,413
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

CHUNK 3 - UNIONE CHUNK 1 & 2

Nome marker	Tipologia	E_{xy} [m]	E_z [m]	E_{xyz} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
7	Control points	0,0066	0,0092	0,0113	14	0,322
8	Control points	0,0077	0,0085	0,0115	15	0,401
9	Control points	0,0092	0,0080	0,0122	18	0,247
10	Control points	0,0137	0,0088	0,0162	13	0,345
14	Control points	0,0095	0,0067	0,0116	8	0,263
15	Control points	0,0041	0,0047	0,0062	9	0,286
16	Control points	0,0076	0,0070	0,0103	7	0,369
51	Control points	0,0117	0,0059	0,0131	8	0,400
52	Control points	0,0138	0,0076	0,0158	7	0,217
53	Control points	0,0134	0,0109	0,0173	9	0,401
54	Control points	0,0173	0,0118	0,0210	7	0,433
TORB1	Control points	0,0080	0,0079	0,0112	17	0,560
TORB2	Control points	0,0063	0,0090	0,0110	18	0,582
TORB3	Control points	0,0139	0,0070	0,0155	20	0,865
TORB4	Control points	0,0097	0,0126	0,0159	19	0,419
TORB7	Control points	0,0159	0,0082	0,0179	17	0,580
TORB8	Control points	0,0071	0,0126	0,0145	18	1,026
TORB9	Control points	0,0015	0,0198	0,0199	26	0,647

TORB10	Control points	0,0178	0,0266	0,0320	29	0,689
TORB11	Control points	0,0114	0,0059	0,0128	18	0,431
TORB12	Control points	0,0161	0,0103	0,0191	21	1,085
TORB13	Control points	0,0016	0,0111	0,0112	13	0,312
TORB14	Control points	0,0070	0,0022	0,0073	17	0,747
TORB15	Control points	0,0045	0,0128	0,0135	18	0,743
TORB18	Control points	0,0079	0,0145	0,0165	16	0,571
TORB19	Control points	0,0148	0,0152	0,0212	19	0,858
TORB21	Control points	0,0158	0,0212	0,0264	20	0,461
TORB23	Control points	0,0142	0,0178	0,0228	30	0,926
TORB24	Control points	0,0190	0,0078	0,0205	25	0,554
TORB25	Control points	0,0177	0,0049	0,0184	23	0,884
TORB27	Control points	0,0160	0,0190	0,0250	22	0,936
TORB29	Control points	0,0044	0,0183	0,0189	21	0,611
TORB31	Control points	0,0117	0,0133	0,0177	29	0,870
E_{medio}	-	0,0108	0,0111	0,0162	-	0,577
σ	-	0,0049	0,0054	0,0055	-	0,243
RMSE	-	0,0119	0,0124	0,0171	-	0,681
34	Check points	0,0448	0,0230	0,0503	3	0,160
35	Check points	0,0301	0,0177	0,0349	6	0,706
36	Check points	0,0115	0,0090	0,0146	8	0,267
TORB16	Check points	0,0476	0,0506	0,0695	16	0,679
TORB22	Check points	0,0252	0,0311	0,0400	26	0,767
TORB30	Check points	0,0103	0,0281	0,0300	24	1,135
RMSE	-	0,0318	0,0295	0,0434	-	0,830
Marker non collimati	TORB5, TORB 6 TORB 17, TORB 20, TORB 28, TORB 32, TORB33, TORB 34					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

Elaborazione dati fotogrammetria da UAV
Scala architettonica Torre degli Smeducci: elaborazione dati con Pix4D
Mapper

CHUNK 1 - VOLO DJI PHANTOM4

Nome marker	Tipologia	E_{xy} [m]	E_z [m]	E_{xyz} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
7	Control pts 3D	0,0073	0,0070	0,0101	14	0,517
8	Control pts 3D	0,0081	0,0070	0,0107	15	0,570
9	Control pts 3D	0,0100	0,0070	0,0122	18	0,406
10	Control pts 3D	0,0114	0,0070	0,0134	15	0,433
14	Control pts 3D	0,0082	0,0040	0,0092	8	0,434
15	Control pts 3D	0,0032	0,0070	0,0077	9	0,322
16	Control pts 3D	0,0022	0,0080	0,0083	9	0,417
51	Control pts 3D	0,0014	0,0070	0,0071	3	0,367
52	Control pts 3D	0,0142	0,0000	0,0158	3	0,258
53	Control pts 3D	0,0071	0,0060	0,0093	4	0,358
54	Control pts 3D	0,0124	0,0020	0,0125	3	0,232
TORB1	Control pts 3D	0,0073	0,0050	0,0088	20	1,035
TORB2	Control pts 3D	0,0050	0,0010	0,0051	17	0,694
TORB3	Control pts 3D	0,0061	0,0010	0,0062	21	0,976
TORB4	Control pts 3D	0,0081	0,0090	0,0121	19	0,485
TORB7	Control pts 3D	0,0112	0,0100	0,0150	16	0,643
TORB8	Control pts 3D	0,0106	0,0160	0,0192	20	0,301
TORB9	Control pts 3D	0,0067	0,0250	0,0259	23	0,233
TORB10	Control pts 2D	0,0146		0,0146	30	0,346
TORB11	Control pts 3D	0,0108	0,0040	0,0115	19	0,460
TORB12	Control pts 3D	0,0141	0,0080	0,0162	21	0,430
TORB13	Control pts 3D	0,0054	0,0070	0,0088	15	0,379
TORB14	Control pts 3D	0,0104	0,0040	0,0112	18	0,659
TORB15	Control pts 3D	0,0045	0,0060	0,0075	18	0,653
TORB18	Control pts 3D	0,0058	0,0140	0,0152	17	0,900
TORB19	Control pts 3D	0,0100	0,0140	0,0172	17	0,728
TORB21	Control pts 3D	0,0122	0,0130	0,0178	18	0,879
TORB23	Control pts 3D	0,0126	0,0110	0,0168	30	1,099
TORB24	Control pts 3D	0,0166	0,0150	0,0223	30	0,821
TORB25	Control pts 3D	0,0125	0,0030	0,0129	21	1,192
TORB29	Control pts 3D	0,0081	0,0160	0,0179	21	0,804
TORB30	Control pts 3D	0,0095	0,0330	0,0343	28	0,264
TORB31	Control pts 3D	0,0172	0,0050	0,0179	29	1,489
<i>E_{medio}</i>	-	0,0092	0,0088	0,0137	-	0,600
σ	-	0,0039	0,0068	0,0060	-	0,307
<i>RMSE</i>	-	0,0100	0,0112	0,0150	-	0,673
TORB22	Check points	0,0206	0,0368	0,0422	24	0,293

<i>TORB27</i>	Check points	0,0192	0,0220	0,0292	21	0,803
<i>RMSE</i>	-	0,0199	0,0303	0,0363	-	0,604
<i>Marker non collimati</i>	34, 35, 36, TORB5, TORB 6, TORB 16, TORB 17, TORB 20, TORB 22, TORB 28, TORB 30, TORB 32, TORB33, TORB 34					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

Elaborazione dati fotogrammetria terrestre
Scala architettonica Torre degli Smeducci: elaborazione dati con Agisoft
Photoscan

CHUNK 1 - 10 FOTOGRAMMI

Nome marker	Tipologia	E_{XY} [m]	E_z [m]	E_{XYZ} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
34	Control points	0,0063	0,0004	0,0063	3	0,200
35	Control points	0,0034	0,0013	0,0036	4	0,150
36	Control points	0,0117	0,0012	0,0118	6	0,183
51	Control points	0,0134	0,0006	0,0134	2	0,082
52	Control points	0,0056	0,0008	0,0057	2	0,163
53	Control points	0,0161	0,0019	0,0161	2	0,010
E_{medio}	-	0,0094	0,0010	0,0095	-	0,131
σ	-	0,0046	0,0005	0,0045	-	0,066
RMSE	-	0,0105	0,0011	0,0105	-	0,159
Valore errore massimo						
Valore errore minimo						

CHUNK 2 - 157 FOTOGRAMMI

Nome marker	Tipologia	E_{XY} [m]	E_z [m]	E_{XYZ} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
7	Control points	0,0034	0,0172	0,0175	32	1,465
8	Control points	0,0038	0,0153	0,0158	33	0,869
9	Control points	0,0049	0,0110	0,0121	35	0,482
10	Control points	0,0056	0,0131	0,0143	21	0,649
14	Control points	0,0163	0,0156	0,0225	19	0,714
15	Control points	0,0103	0,0170	0,0199	20	0,769
16	Control points	0,0097	0,0160	0,0187	18	1,307
34	Control points	0,0124	0,0034	0,0128	3	0,411
35	Control points	0,0212	0,0083	0,0227	5	6,954
36	Control points	0,0101	0,0004	0,0102	3	2,863
51	Control points	0,0133	0,0033	0,0137	27	1,206
52	Control points	0,0125	0,0040	0,0131	26	0,498
53	Control points	0,0140	0,0045	0,0147	26	0,496
54	Control points	0,0166	0,0018	0,0167	24	0,981
TORB1	Control points	0,0061	0,0030	0,0068	24	3,452
TORB2	Control points	0,0129	0,0147	0,0195	38	0,719
TORB3	Control points	0,0115	0,0019	0,0117	49	4,155
TORB4	Control points	0,0138	0,0127	0,0188	42	0,640
TORB5	Control points	0,0140	0,0237	0,0275	20	4,343
TORB6	Control points	0,0145	0,0350	0,0150	57	1,849
TORB7	Control points	0,0040	0,0045	0,0060	21	1,610
TORB8	Control points	0,0075	0,0044	0,0087	43	1,351
TORB9	Control points	0,0198	0,0404	0,0450	59	1,041

TORB10	Control points	0,0219	0,0231	0,0318	38	1,282
TORB11	Control points	0,0072	0,0008	0,0073	23	1,636
TORB12	Control points	0,0236	0,0098	0,0256	12	1,148
TORB13	Control points	0,0251	0,0099	0,0172	14	3,424
TORB14	Control points	0,0269	0,0242	0,0362	19	2,749
TORB17	Control points	0,0251	0,0147	0,0291	21	2,759
TORB20	Control points	0,0110	0,0231	0,0256	9	1,479
TORB23	Control points	0,0136	0,0113	0,0177	37	1,181
TORB25	Control points	0,0159	0,0127	0,0203	26	1,382
TORB26	Control points	0,0125	0,0327	0,0350	35	1,915
TORB29	Control points	0,0067	0,0242	0,0252	45	1,641
TORB30	Control points	0,0154	0,0223	0,0271	35	0,627
TORB31	Control points	0,0227	0,0288	0,0367	30	0,815
E_{medio}	-	0,0135	0,0141	0,0200	-	1,691
σ	-	0,0064	0,0102	0,0091	-	1,358
RMSE	-	0,0145	0,0164	0,0219	-	1,869
TORB15	Check points	0,0187	0,0092	0,0209	16	2,666
TORB16	Check points	0,0346	0,0027	0,0347	15	1,377
TORB18	Check points	0,0784	0,1335	0,1548	6	4,927
TORB21	Check points	0,0136	0,0504	0,0522	5	0,773
TORB22	Check points	0,0670	0,2110	0,2212	5	7,052
TORB24	Check points	0,0185	0,0385	0,0427	14	1,285
TORB27	Check points	0,0234	0,0359	0,0429	50	1,628
TORB28	Check points	0,0349	0,0415	0,0542	8	1,253
TORB32	Check points	0,0335	0,0317	0,0461	39	0,794
TORB33	Check points	0,0365	0,0376	0,0524	36	0,625
RMSE	-	0,0412	0,0847	0,0942	-	1,961
Marker non collimati	TORB19, TORB 34					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

CHUNK 3 - UNIONE CHUNK 1 & 2

Nome marker	Tipologia	E_{xy} [m]	E_z [m]	E_{xyz} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
7	Control points	0,0032	0,0172	0,0175	32	1,465
8	Control points	0,0037	0,0154	0,0158	33	0,869
9	Control points	0,0048	0,0111	0,0121	35	0,482
10	Control points	0,0056	0,0131	0,0143	21	0,649
14	Control points	0,0164	0,0157	0,0227	19	0,714
15	Control points	0,0104	0,0171	0,0200	20	0,769
16	Control points	0,0097	0,0160	0,0187	18	1,307
34	Control points	0,0117	0,0021	0,0119	6	1,289
35	Control points	0,0111	0,0057	0,0124	9	5,446
36	Control points	0,0128	0,0012	0,0129	9	1,882

51	Control points	0,0153	0,0032	0,0156	29	1,522
52	Control points	0,0128	0,0039	0,0136	28	0,651
53	Control points	0,0138	0,0045	0,0145	28	0,489
54	Control points	0,0163	0,0018	0,0164	25	1,130
TORB1	Control points	0,0061	0,0031	0,0068	24	3,452
TORB2	Control points	0,0128	0,0147	0,0195	38	0,719
TORB3	Control points	0,0116	0,0019	0,0117	49	4,155
TORB4	Control points	0,0138	0,0127	0,0188	42	0,640
TORB5	Control points	0,0140	0,0238	0,0276	20	4,343
TORB6	Control points	0,0145	0,0036	0,0150	57	1,849
TORB7	Control points	0,0040	0,0044	0,0059	21	1,610
TORB8	Control points	0,0074	0,0042	0,0086	43	1,351
TORB9	Control points	0,0199	0,0401	0,0448	59	1,041
TORB10	Control points	0,0217	0,0229	0,0315	38	1,282
TORB11	Control points	0,0072	0,0008	0,0073	23	1,636
TORB12	Control points	0,0236	0,0097	0,0255	12	1,147
TORB13	Control points	0,0140	0,0098	0,0171	14	3,424
TORB14	Control points	0,0269	0,0242	0,0362	19	2,749
TORB17	Control points	0,0253	0,0147	0,0293	21	2,759
TORB20	Control points	0,0111	0,0232	0,0257	9	1,479
TORB23	Control points	0,0136	0,0116	0,0179	37	1,181
TORB25	Control points	0,0157	0,0127	0,0202	26	1,382
TORB26	Control points	0,0124	0,0328	0,0351	35	1,915
TORB29	Control points	0,0067	0,0244	0,0253	45	1,641
TORB30	Control points	0,0154	0,0225	0,0273	35	0,627
TORB31	Control points	0,0227	0,0290	0,0369	30	0,815
E_{medio}	-	0,0130	0,0132	0,0198	-	1,663
σ	-	0,0060	0,0098	0,0091	-	1,170
RMSE	-	0,0143	0,0164	0,0218	-	1,873
TORB15	Check points	0,0187	0,0093	0,0209	16	2,666
TORB16	Check points	0,0346	0,0024	0,0347	15	1,377
TORB18	Check points	0,0783	0,1336	0,1548	6	4,927
TORB21	Check points	0,0136	0,0524	0,0523	5	0,773
TORB22	Check points	0,0670	0,2210	0,2210	5	7,052
TORB24	Check points	0,0184	0,0425	0,0424	14	1,285
TORB27	Check points	0,0233	0,0430	0,0430	50	1,628
TORB28	Check points	0,0349	0,0543	0,0543	8	1,253
TORB32	Check points	0,0335	0,0464	0,0464	39	0,794
TORB33	Check points	0,0367	0,0527	0,0527	36	0,625
RMSE	-	0,0411	0,0942	0,0942	-	1,961
Marker non collimati	TORB19, TORB 34					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

Elaborazione dati fotogrammetria terrestre
Scala architettonica Torre degli Smeducci: elaborazione dati con Pix4D
Mapper

PROGETTO 1 - 10 FOTOGRAMMI

Nome marker	Tipologia	E_{xy} [m]	E_z [m]	E_{xyz} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
34	Control pts 3D	0,0032	0,0020	0,0037	2	0,330
35	Control pts 3D	0,0036	0,0030	0,0047	4	0,194
36	Control pts 3D	0,0089	0,0000	0,0089	6	0,323
51	Control pts 3D	0,0086	0,0010	0,0087	2	0,224
52	Control pts 3D	0,0124	0,0020	0,0125	2	0,237
53	Control pts 3D	0,0201	0,0030	0,0203	2	0,078
E_{medio}	-	0,0095	0,0018	0,0098	-	0,231
σ	-	0,0057	0,0011	0,0055	-	0,085
RMSE	-	0,0111	0,0024	0,0114	-	0,246
Valore errore massimo						
Valore errore minimo						

PROGETTO 2 - 157 FOTOGRAMMI

Nome marker	Tipologia	E_{xy} [m]	E_z [m]	E_{xyz} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
7	Control pts 3D	0,0095	0,0060	0,0112	29	0,634
8	Control pts 3D	0,0042	0,0060	0,0073	30	0,527
9	Control pts 3D	0,0042	0,0050	0,0066	34	0,648
10	Control pts 3D	0,0085	0,0060	0,0104	21	0,610
14	Control pts 3D	0,0108	0,0050	0,0119	17	0,430
15	Control pts 3D	0,0032	0,0080	0,0085	18	0,564
16	Control pts 3D	0,0041	0,0090	0,0099	17	0,747
51	Control pts 3D	0,0114	0,0070	0,0134	26	1,015
52	Control pts 3D	0,0078	0,0080	0,0112	26	0,465
53	Control pts 3D	0,0078	0,0120	0,0143	27	0,535
54	Control pts 3D	0,0090	0,0110	0,0142	25	0,643
TORB1	Control pts 3D	0,0171	0,0150	0,0228	23	3,510
TORB2	Control pts 3D	0,0112	0,0060	0,0127	40	0,799
TORB3	Control pts 3D	0,0099	0,0020	0,0101	49	0,508
TORB4	Control pts 3D	0,0100	0,0080	0,0128	41	0,639
TORB5	Control pts 3D	0,0120	0,0130	0,0177	22	1,518
TORB6	Control pts 3D	0,0050	0,0010	0,0051	59	0,846
TORB8	Control pts 3D	0,0041	0,0090	0,0099	35	1,205
TORB9	Control pts 2D	0,0050		0,0050	56	0,628
TORB10	Control pts 2D	0,0067		0,0067	43	0,949
TORB11	Control pts 3D	0,0054	0,0020	0,0057	18	0,682
TORB12	Control pts 2D	0,0120		0,0120	13	0,370
TORB13	Control pts 3D	0,0133	0,0060	0,0146	11	1,921

TORB14	Control pts 3D	0,0171	0,0120	0,0209	16	2,508
TORB17	Control pts 3D	0,0230	0,0100	0,0251	19	0,798
TORB23	Control pts 3D	0,0103	0,0050	0,0114	37	0,663
TORB25	Control pts 3D	0,0028	0,0010	0,0030	32	1,818
TORB26	Control pts 3D	0,0140	0,0170	0,0220	39	1,234
TORB29	Control pts 3D	0,0086	0,0100	0,0132	32	0,663
TORB30	Control pts 3D	0,0110	0,0120	0,0163	30	1,169
TORB31	Control pts 3D	0,0117	0,0090	0,0147	35	1,008
E_{medio}	-	0,0094	0,0079	0,0123	-	0,976
σ	-	0,0045	0,0040	0,0053	-	0,664
RMSE	-	0,0104	0,0088	0,0137	-	1,180
TORB7	Check points	0,0501	0,0375	0,0626	24	0,656
TORB16	Check points	0,0440	0,0355	0,0565	15	0,593
TORB18	Check points	0,0033	0,0479	0,0480	8	2,770
TORB19	Check points	0,0052	0,0310	0,0314	7	0,395
TORB20	Check points	0,0046	0,0031	0,0055	8	0,812
TORB21	Check points	0,0097	0,0164	0,0191	7	0,544
TORB27	Check points	0,0199	0,0196	0,0279	46	1,100
TORB28	Check points	0,0339	0,0170	0,0379	47	0,755
TORB32	Check points	0,0198	0,0134	0,0239	38	0,396
TORB33	Check points	0,0228	0,0275	0,0357	36	0,430
RMSE	-	0,0266	0,0280	0,0386	-	1,081
Marker non collimati	34, 35, 36, TORB 15, TORB 22, TORB 24, TORB 34					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

PROGETTO 3 - UNIONE CHUNK 1 & 2

Nome marker	Tipologia	E_{xy} [m]	E_z [m]	E_{xyz} [m]	Proiezioni	E_{pix} [pix]
7	Control pts 3D	0,0102	0,0050	0,0114	29	0,635
8	Control pts 3D	0,0045	0,0050	0,0067	30	0,535
9	Control pts 3D	0,0028	0,0040	0,0049	34	0,643
10	Control pts 3D	0,0076	0,0050	0,0091	21	0,590
14	Control pts 3D	0,0104	0,0040	0,0112	17	0,426
15	Control pts 3D	0,0040	0,0070	0,0081	18	0,546
16	Control pts 3D	0,0054	0,0080	0,0096	17	0,740
34	Control pts 3D	0,0106	0,0150	0,0184	2	0,339
35	Control pts 3D	0,0113	0,0050	0,0124	6	0,654
36	Control pts 3D	0,0103	0,0040	0,0121	8	0,464
51	Control pts 3D	0,0112	0,0080	0,0137	28	0,964
52	Control pts 3D	0,0095	0,0090	0,0124	28	0,477
53	Control pts 3D	0,0089	0,0130	0,0158	29	0,544
54	Control pts 3D	0,0110	0,0130	0,0170	25	0,636
TORB1	Control pts 3D	0,0180	0,0150	0,0235	23	3,511

TORB2	Control pts 3D	0,0121	0,0050	0,0131	40	0,797
TORB3	Control pts 3D	0,0092	0,0020	0,0094	49	0,501
TORB4	Control pts 3D	0,0110	0,0070	0,0131	41	0,642
TORB5	Control pts 3D	0,0122	0,0130	0,0178	22	1,485
TORB6	Control pts 3D	0,0060	0,0000	0,0060	59	0,843
TORB8	Control pts 3D	0,0041	0,0100	0,0108	35	1,193
TORB9	Control pts 2D	0,0042		0,0042	56	0,624
TORB10	Control pts 2D	0,0063		0,0063	43	0,935
TORB11	Control pts 3D	0,0050	0,0020	0,0054	18	0,678
TORB12	Control pts 2D	0,0120		0,0120	13	0,367
TORB13	Control pts 3D	0,0132	0,0070	0,0149	11	1,889
TORB14	Control pts 3D	0,0161	0,0120	0,0201	16	2,484
TORB17	Control pts 3D	0,0230	0,0110	0,0255	19	0,799
TORB23	Control pts 3D	0,0103	0,0070	0,0124	37	0,663
TORB25	Control pts 3D	0,0032	0,0020	0,0037	32	1,803
TORB26	Control pts 3D	0,0132	0,0170	0,0215	39	1,235
TORB29	Control pts 3D	0,0092	0,0090	0,0129	32	0,659
TORB30	Control pts 3D	0,0120	0,0110	0,0163	30	1,167
TORB31	Control pts 3D	0,0112	0,0080	0,0137	35	1,003
<i>E</i> _{medio}	-	0,0097	0,0078	0,0125	-	0,926
σ	-	0,0043	0,0043	0,0053	-	0,646
RMSE	-	0,0107	0,0088	0,0139	-	1,129
TORB7	Check points	0,0497	0,0368	0,0619	24	0,659
TORB16	Check points	0,0445	0,0342	0,0569	15	0,593
TORB18	Check points	0,0048	0,0484	0,0486	8	2,721
TORB19	Check points	0,0059	0,0319	0,0324	7	0,395
TORB20	Check points	0,0037	0,0030	0,0048	8	0,803
TORB21	Check points	0,0096	0,0162	0,0188	7	0,544
TORB27	Check points	0,0203	0,0194	0,0281	46	1,132
TORB28	Check points	0,0341	0,0167	0,0380	47	0,763
TORB32	Check points	0,0197	0,0119	0,0230	38	0,399
TORB33	Check points	0,0225	0,0263	0,0346	36	0,429
RMSE	-	0,0266	0,0276	0,0384	-	1,042
Marker non collimati	TORB 15, TORB 22, TORB 24, TORB 34					
	Valore errore massimo					
	Valore errore minimo					

Registrazione scansioni Laser Scanner da nuvola a nuvola

Risultati scansione

<i>Scansione</i>	<i>Errore [mm]</i>
<i>Arch_sansev003</i>	11,96
<i>Arch_sansev009</i>	8,29
<i>Inge_sansev004</i>	7,52
<i>Arch_sansev005</i>	7,17
<i>Arch_sansev002</i>	7,06
<i>Arch_sansev008</i>	6,75
<i>Arch_sansev001</i>	6,68
<i>Inge_sansev001</i>	6,67
<i>Arch_sansev004</i>	6,68
<i>Inge_sansev005</i>	6,12
<i>Inge_sansev002</i>	6,07
<i>Inge_sansev003</i>	4,77
<i>Arch_sansev010</i>	4,27
<i>Arch_sansev025</i>	3,40
<i>Arch_sansev007</i>	2,96
<i>Arch_sansev006</i>	2,84

Tensioni dei target

<i>Target</i>	<i>Elemento 1</i>	<i>Elemento 2</i>	<i>Errore [mm]</i>
51	<i>Arch_sansev010</i>	<i>References</i>	29,45
52	<i>Inge_sansev004</i>	<i>References</i>	24,27
52	<i>Inge_sansev003</i>	<i>References</i>	24,03
53	<i>Inge_sansev003</i>	<i>References</i>	23,91
51	<i>Inge_sansev004</i>	<i>References</i>	23,63
54	<i>Inge_sansev003</i>	<i>References</i>	22,26
52	<i>Arch_sansev010</i>	<i>References</i>	20,66
4	<i>Arch_sansev001</i>	<i>References</i>	20,62
36	<i>Inge_sansev004</i>	<i>References</i>	20,39
53	<i>Arch_sansev010</i>	<i>References</i>	20,39
51	<i>Inge_sansev003</i>	<i>References</i>	20,38
54	<i>Inge_sansev004</i>	<i>References</i>	20,23
2	<i>Arch_sansev001</i>	<i>References</i>	20,17
10	<i>Arch_sansev008</i>	<i>References</i>	19,91
9	<i>Arch_sansev004</i>	<i>References</i>	19,75
36	<i>Inge_sansev005</i>	<i>References</i>	19,40
34	<i>Arch_sansev006</i>	<i>References</i>	19,19
4	<i>Arch_sansev002</i>	<i>References</i>	19,03
3	<i>Arch_sansev001</i>	<i>References</i>	18,90
12	<i>Arch_sansev001</i>	<i>References</i>	18,90
52	<i>Inge_sansev002</i>	<i>References</i>	18,45
54	<i>Inge_sansev002</i>	<i>References</i>	18,40
54	<i>Arch_sansev010</i>	<i>References</i>	18,24

3	Arch_sansev003	References	18,12
53	Inge_sansev002	References	17,41
2	Arch_sansev003	References	17,36
53	Inge_sansev004	References	17,25
14	Arch_sansev007	References	17,19
14	Arch_sansev006	References	17,08
5	Arch_sansev002	References	16,94
6	Arch_sansev002	References	16,94
5	Arch_sansev001	References	16,33
14	Arch_sansev025	References	16,06
12	Inge_sansev001	References	16,04
17	Inge_sansev001	References	15,97
12	Arch_sansev004	References	15,49
13	Arch_sansev008	References	15,33
10	Arch_sansev001	References	15,00
16	Arch_sansev005	References	14,62
2	Arch_sansev002	References	14,34
8	Arch_sansev004	References	13,66
8	Inge_sansev001	References	13,51
10	Inge_sansev001	References	13,41
9	Arch_sansev001	References	13,38
9	Arch_sansev009	References	13,19
9	Arch_sansev008	References	13,03
32	Arch_sansev002	References	12,97
3	Arch_sansev002	References	12,96
14	Inge_sansev005	References	12,62
16	Arch_sansev025	References	12,60
15	Inge_sansev005	References	11,52
6	Arch_sansev003	References	10,61
10	Arch_sansev009	References	10,43
15	Arch_sansev007	References	10,35
34	Inge_sansev005	References	10,15
13	Arch_sansev009	References	10,02
16	Arch_sansev007	References	9,99
8	Arch_sansev009	References	9,58
7	Arch_sansev004	References	8,89
15	Arch_sansev025	References	8,45
15	Arch_sansev006	References	7,63
8	Arch_sansev008	References	7,02
33	Arch_sansev008	References	5,88
7	Arch_sansev008	References	5,57
7	Arch_sansev001	References	4,68
32	Arch_sansev001	References	1,93
Media			15,48
Deviazione standard			5,29
RMSE			16,59

Registrazione scansioni Laser Scanner basata su target

Risultati scansione

<i>Scansione</i>	<i>Errore [mm]</i>
<i>Arch_sansev003</i>	7,89
<i>Inge_sansev001</i>	7,28
<i>Arch_sansev002</i>	7,21
<i>Arch_sansev001</i>	7,12
<i>Arch_sansev025</i>	6,95
<i>Arch_sansev006</i>	6,46
<i>Arch_sansev004</i>	6,28
<i>Inge_sansev005</i>	5,88
<i>Arch_sansev008</i>	5,83
<i>Arch_sansev007</i>	5,76
<i>Arch_sansev009</i>	5,67
<i>Arch_sansev005</i>	5,28
<i>Inge_sansev003</i>	4,56
<i>Inge_sansev004</i>	4,42
<i>Arch_sansev010</i>	4,12
<i>Inge_sansev002</i>	2,28

Tensioni dei target

<i>Target</i>	<i>Elemento 1</i>	<i>Elemento 2</i>	<i>Errore [mm]</i>
6	<i>Arch_sansev003</i>	<i>References</i>	14,53
14	<i>Arch_sansev025</i>	<i>References</i>	11,86
6	<i>Arch_sansev002</i>	<i>References</i>	11,28
9	<i>Arch_sansev001</i>	<i>Arch_sansev004</i>	11,18
51	<i>Arch_sansev010</i>	<i>Arch_sansev003</i>	11,00
12	<i>Arch_sansev001</i>	<i>Arch_sansev001</i>	10,86
7	<i>Arch_sansev004</i>	<i>References</i>	10,75
13	<i>Arch_sansev008</i>	<i>References</i>	10,23
12	<i>Arch_sansev001</i>	<i>References</i>	10,10
10	<i>Arch_sansev008</i>	<i>Inge_sansev001</i>	10,07
6	<i>Arch_sansev002</i>	<i>Arch_sansev003</i>	10,06
7	<i>Arch_sansev001</i>	<i>Arch_sansev004</i>	9,96
14	<i>Arch_sansev005</i>	<i>Arch_sansev025</i>	9,83
2	<i>Arch_sansev003</i>	<i>References</i>	9,64
14	<i>Arch_sansev007</i>	<i>References</i>	9,23
2	<i>Arch_sansev001</i>	<i>Arch_sansev003</i>	9,22
10	<i>Arch_sansev001</i>	<i>Inge_sansev001</i>	9,17
10	<i>Arch_sansev008</i>	<i>References</i>	9,02
10	<i>Arch_sansev009</i>	<i>Inge_sansev001</i>	8,77
5	<i>Arch_sansev002</i>	<i>References</i>	8,62
51	<i>Inge_sansev003</i>	<i>Inge_sansev004</i>	8,49
32	<i>Arch_sansev001</i>	<i>References</i>	8,44
8	<i>Arch_sansev009</i>	<i>Inge_sansev001</i>	8,37

10	Arch_sansev008	Arch_sansev009	8,29
16	Arch_sansev007	References	8,15
5	Arch_sansev001	Arch_sansev002	8,11
4	Arch_sansev001	Arch_sansev002	8,07
8	Arch_sansev004	Inge_sansev001	8,02
14	Arch_sansev006	Arch_sansev025	7,95
14	Arch_sansev005	Arch_sansev007	7,91
3	Arch_sansev002	References	7,88
15	Arch_sansev006	Arch_sansev025	7,85
3	Arch_sansev001	Arch_sansev002	7,80
2	Arch_sansev001	References	7,69
32	Arch_sansev002	References	7,58
10	Arch_sansev009	References	7,56
12	Arch_sansev001	Arch_sansev004	7,47
15	Arch_sansev005	Arch_sansev006	7,37
10	Arch_sansev001	Arch_sansev009	7,36
16	Arch_sansev005	Arch_sansev007	7,32
36	Inge_sansev004	Inge_sansev005	7,20
34	Arch_sansev006	Inge_sansev005	7,17
14	Arch_sansev006	References	7,15
51	Inge_sansev003	References	7,12
9	Arch_sansev004	Arch_sansev009	7,11
14	Arch_sansev005	Arch_sansev006	6,91
33	Arch_sansev008	References	6,86
15	Arch_sansev025	References	6,83
53	Inge_sansev003	Inge_sansev004	6,78
13	Arch_sansev008	Arch_sansev009	6,77
8	Inge_sansev001	References	6,77
9	Arch_sansev001	Arch_sansev008	6,70
10	Inge_sansev001	References	6,66
2	Arch_sansev001	Arch_sansev002	6,59
3	Arch_sansev001	References	6,38
7	Arch_sansev004	Arch_sansev008	6,36
9	Arch_sansev004	References	6,33
5	Arch_sansev001	References	6,27
52	Arch_sansev010	Inge_sansev004	6,26
53	Arch_sansev010	Inge_sansev003	6,07
51	Arch_sansev010	Inge_sansev004	5,92
2	Arch_sansev002	Arch_sansev003	5,87
3	Arch_sansev003	References	5,76
15	Arch_sansev006	Arch_sansev007	5,75
2	Arch_sansev002	References	5,68
15	Arch_sansev005	Arch_sansev025	5,66
16	Arch_sansev007	Arch_sansev025	5,56
14	Arch_sansev007	Arch_sansev025	5,53
53	Inge_sansev002	Inge_sansev003	5,52

16	Arch_sansev025	References	5,48
8	Arch_sansev008	Inge_sansev001	5,48
32	Arch_sansev001	Arch_sansev002	5,40
36	Inge_sansev004	References	5,40
9	Arch_sansev001	References	5,37
9	Arch_sansev004	Arch_sansev008	5,32
4	Arch_sansev001	References	5,31
3	Arch_sansev001	Arch_sansev003	5,30
4	Arch_sansev002	References	5,30
15	Arch_sansev007	Arch_sansev025	5,30
10	Arch_sansev001	Arch_sansev008	5,23
15	Arch_sansev006	References	5,21
14	Arch_sansev006	Arch_sansev007	5,19
9	Arch_sansev001	Arch_sansev009	5,11
12	Arch_sansev004	Arch_sansev003	5,09
7	Arch_sansev008	References	4,96
9	Arch_sansev008	Arch_sansev009	4,86
10	Arch_sansev001	References	4,80
51	Arch_sansev010	References	4,60
52	Inge_sansev003	References	4,58
16	Arch_sansev005	Arch_sansev025	4,58
36	Inge_sansev005	References	4,57
34	Inge_sansev005	References	4,57
51	Inge_sansev004	References	4,55
17	Inge_sansev001	References	4,51
52	Arch_sansev010	Inge_sansev003	4,23
53	Inge_sansev004	References	4,23
34	Arch_sansev006	References	4,06
53	Arch_sansev010	Inge_sansev004	3,97
13	Arch_sansev009	References	3,92
53	Inge_sansev003	References	3,89
52	Inge_sansev002	Inge_sansev004	3,69
7	Arch_sansev001	References	3,69
7	Arch_sansev001	Arch_sansev008	3,65
12	Inge_sansev001	References	3,65
9	Arch_sansev008	References	3,57
54	Arch_sansev010	Inge_sansev003	3,39
8	Arch_sansev008	Arch_sansev009	3,39
53	Inge_sansev002	Inge_sansev004	3,26
54	Arch_sansev010	Inge_sansev004	3,24
52	Arch_sansev010	Inge_sansev002	3,09
12	Arch_sansev004	References	3,07
9	Arch_sansev009	References	3,01
8	Arch_sansev004	Arch_sansev008	2,90
15	Arch_sansev005	References	2,88
8	Arch_sansev009	References	2,81

3	Arch_sansev002	Arch_sansev003	2,76
52	Inge_sansev003	Inge_sansev004	2,72
52	Arch_sansev010	References	2,65
14	Arch_sansev005	References	2,55
52	Inge_sansev003	References	2,52
52	Inge_sansev002	Inge_sansev003	2,36
53	Arch_sansev010	References	2,28
54	Arch_sansev010	Inge_sansev002	2,25
8	Arch_sansev004	References	2,17
8	Arch_sansev004	Arch_sansev009	2,12
54	Arch_sansev010	References	1,82
54	Inge_sansev004	References	1,80
15	Arch_sansev007	References	1,75
53	Inge_sansev002	References	1,74
15	Arch_sansev005	Arch_sansev007	1,65
54	Inge_sansev003	References	1,60
54	Inge_sansev002	Inge_sansev004	1,58
54	Inge_sansev003	Inge_sansev004	1,54
16	Arch_sansev005	References	1,42
8	Arch_sansev008	References	1,32
52	Inge_sansev002	References	1,31
54	Inge_sansev002	Inge_sansev003	1,16
53	Arch_sansev010	Inge_sansev002	0,95
54	Inge_sansev002	References	0,44
Media			5,70
Deviazione standard			2,76
RMSE			6,40

Aree delle superfici delle patologie di degrado: colatura

Prospetto Nord

<i>Numero</i>	<i>Superficie [m²]</i>
1	3,2967
2	0,0478
TOT. [m²]	3,3445

Prospetto Sud

<i>Numero</i>	<i>Superficie [m²]</i>
1	0,7388
TOT. [m²]	0,7388

Prospetto Ovest

<i>Numero</i>	<i>Superficie [m²]</i>
1	2,9775
2	0,1201
3	0,3073
TOT. [m²]	3,4049

Prospetto Est

<i>Numero</i>	<i>Superficie [m²]</i>
1	2,5912
2	0,1203
3	0,0906
4	3,6442
5	0,0100
6	0,0180
7	0,0273
8	0,0344
9	0,0177
10	0,0301
11	0,0096
12	0,0476
13	0,0261
14	0,0302
15	0,0582
TOT. [m²]	6,7555

Aree delle superfici delle patologie di degrado: colonizzazione biologica

Prospetto Nord

Numero	Superficie [m²]
1	0,0344
2	0,0214
3	0,0066
4	0,0632
5	0,2857
6	0,0856
7	0,1324
8	0,3864
9	22,7109
10	1,8950
11	12,9809
12	0,0992
13	0,0252
14	0,2258
15	0,0209
16	0,0827
17	0,1221
18	0,0368
19	0,0778
20	0,1271
21	0,1016
22	0,0512
23	0,0452
24	0,3303
25	1,1438
26	0,7249
27	0,2314
28	0,0937
29	0,1871
30	0,0412
31	0,1376
32	0,0538
33	0,5630
34	0,3962
35	0,0630
36	0,3411
37	0,4708
38	0,0201
39	0,1257
40	0,3409
41	0,2951

42	0,0872
43	0,0155
44	0,0249
TOT. [m²]	45,3054

Prospetto Sud

<i>Numero</i>	<i>Superficie [m²]</i>
1	0,1459
2	3,8608
3	0,1045
4	0,3575
5	0,1928
6	0,9361
7	1,1408
8	0,3791
9	1,1142
10	0,5163
11	0,1515
TOT. [m²]	8,8995

Prospetto Ovest

<i>Numero</i>	<i>Superficie [m²]</i>
1	0,0164
2	0,1238
3	0,2642
4	0,2317
5	0,2360
6	0,0963
7	0,0344
8	0,0157
9	0,3121
10	0,1668
11	0,0041
12	0,0646
TOT. [m²]	1,5661

Prospetto Est

<i>Numero</i>	<i>Superficie [m²]</i>
1	0,0565
2	0,0513
3	2,2225
4	0,1104
5	0,3440
6	0,0484
7	0,0163
8	0,0181
TOT. [m²]	2,8675

Aree delle superfici delle patologie di degrado: disgregazione

Prospetto Nord

Numero	Superficie [m²]
1	0,0118
2	0,0089
3	0,0089
TOT. [m²]	0,0296

Prospetto Sud

Numero	Superficie [m²]
1	0,0310
2	0,0119
3	0,0064
4	0,0133
5	0,0067
6	0,0030
7	0,0026
TOT. [m²]	0,0749

Prospetto Ovest

Numero	Superficie [m²]
1	0,0022
2	0,0164
3	0,0086
4	0,0052
5	0,0058
6	0,0119
7	0,0056
8	0,0098
9	0,0083
10	0,0023
11	0,0039
12	0,0069
13	0,0120
14	0,0064
15	0,0052
16	0,0046
17	0,0025
18	0,0104
19	0,0142
20	0,0137
21	0,0115
22	0,0255
23	0,0064
TOT. [m²]	0,1993

Prospetto Est

Numero	Superficie [m²]
1	0,0042
2	0,0033
3	0,0020
4	0,0030
5	0,0104
6	0,0038
7	0,0042
8	0,0173
9	0,0030
10	0,0245
11	0,0183
12	0,0116
13	0,0419
14	0,0316
TOT. [m²]	0,1791

Aree delle superfici delle patologie di degrado: disgregazione

Prospetto Nord

<i>Numero</i>	<i>Superficie [m²]</i>
1	0,0911
2	0,1007
3	0,7028
4	0,1542
5	0,0493
6	0,2211
7	0,0526
8	0,0668
9	0,1569
10	0,0328
11	0,1903
12	0,1119
TOT. [m²]	1,9305

Prospetto Sud

<i>Numero</i>	<i>Superficie [m²]</i>
1	0,0035
2	0,0360
3	0,0085
4	0,0418
5	0,0064
6	0,0054
7	0,0038
8	0,0034
9	0,0065
10	0,0128
11	0,1799
12	0,1863
13	0,1706
14	0,0104
15	0,0371
16	0,0985
TOT. [m²]	0,8109

Prospetto Ovest

<i>Numero</i>	<i>Superficie [m²]</i>
1	0,0505
2	0,4369
3	0,1293
4	0,0827
5	0,0538
6	0,0151

7	0,0587
8	0,0189
9	0,0124
10	0,0434
TOT. [m ²]	0,9017

Prospetto Est

<i>Numero</i>	<i>Superficie [m²]</i>
1	0,0881
2	0,0864
3	0,0963
TOT. [m ²]	0,2708

Elenco delle fessurazioni

Prospetto Nord

Nome	Ramo	Estensione [m]	Tipologia
N1	C1	1,9567	N
	R1	0,1974	N
	R2	0,2788	N
N2	C1	0,3874	N
	R1	0,2000	N
	R2	0,2614	N

Prospetto Sud

Nome	Ramo	Estensione [m]	Tipologia
S1	C1	0,2159	N
	C2	1,2915	N
S2	-	4,6508	N
S3	-	1,5711	N
S4	-	3,9270	N
S5	-	0,9946	N
S6	C1	3,6130	N
	R1	1,0810	N
	R2	0,5567	N
S7	-	1,1072	N
S8	C1	0,4518	N
	C2	0,1952	N
	R1	0,5131	N
	R2	0,1510	N
S9	C1	0,4206	N
	R1	2,6130	N
	R2	0,4110	N
S10	C1	1,4120	N
	R1	0,0801	N
	R2	0,7791	N
S11	C1	0,3052	N
	C2	0,3529	N
	C3	0,3659	N
S12	-	1,1107	N
S13	-	0,3333	N
S14	-	1,2967	N
S15	-	3,2546	R
S16	-	2,4717	R

Prospetto Ovest

Nome	Ramo	Estensione [m]	Tipologia
O1	-	0,9966	N
O2	-	0,9120	N
O3	-	4,9154	N

O4	-	5,9405	R
O5	-	0,8831	R
O6	C1	0,8770	R
	R1	1,4125	R
	R2	0,7091	R
O7	-	1,3824	R
O8	-	1,1492	R
O9	-	1,2978	R
O10	-	0,4747	R
O11	C1	0,7512	R
	R1	0,6507	R
	R2	0,5064	R
	C2	2,4370	R
	C3	1,6112	R
O12	-	1,1689	N
O13	-	0,7052	R
O14	-	2,4369	N
O15	C1	0,9569	R
	R1	0,3917	R
	R2	3,9106	R/N
O16	-	1,3524	R

Prospetto Est

Nome	Ramo	Estensione [m]	Tipologia
1	-	1,1032	N
2	C1	0,7946	N
	C2	0,2720	N
3	C1	0,1445	N
	C2	0,9641	N
	C3	0,6846	N
	C4	0,3430	N
4	-	1,3605	N
5	-	0,8206	N
6	C1	0,8935	N
	C2	0,3692	R
7	-	0,4435	N
8	-	1,1713	R
9	-	1,2990	N
10	-	0,9095	R/N

Ringraziamenti

Desidero ricordare tutti coloro che mi hanno sostenuto nella stesura con critiche, considerazioni e ispirazioni: a loro va la mia gratitudine, anche se a me spetta la responsabilità per ogni errore contenuto in questo lavoro.

Ringrazio innanzitutto Raffaella, la mia compagna di lavoro, con la quale in questi mesi ci siamo sostenuti a vicenda.

Ringrazio tutti i membri del *Team DIRECT* e del *DIATI* con i quali ho collaborato, tra cui Alessandro, Paolo, Francesca e Stefano, per i loro preziosi consigli e per l'aiuto datomi.

Grazie ai miei colleghi e amici universitari che in questi anni mi hanno aiutato a lavorare in gruppo, sviluppando solidi rapporti al di fuori della vita accademica.

Grazie anche ai miei amici, ai miei parenti e a tutti quelli che hanno sempre creduto in me, assistendomi in questo lungo percorso di studi.

Ringrazio inoltre mio zio Massimo che mi ha insegnato a dare sempre il meglio.

Infine il più sincero e sentito grazie va a mio padre Cesare e a mia madre Patrizia, grazie al loro supporto, alla loro sopportazione e ai loro preziosissimi consigli di vita tutto ciò è stato possibile. Vi voglio bene.



POLITECNICO DI TORINO



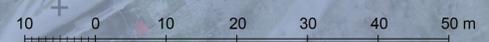
TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE
OTTOBRE 2017

CANDIDATO:
STEFANO PERSICO

RELATORI:
ANDREA MARIA LINGUA
FILIBERTO CHIABRANDO

OGGETTO:
ORTOFOTO AEREA COLLE MONTE NERO
SAN SEVERINO MARCHE (MC) Scala 1:500

TAVOLA N° 1

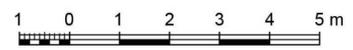


WGS 84/UTM ZONE 33N ETRF 2000

ORTOFOTO DEL FRONTE NORD Scala 1:100



ORTOFOTO DEL FRONTE SUD Scala 1:100



ORTOFOTO DEL FRONTE OVEST Scala 1:100



ORTOFOTO DEL FRONTE EST Scala 1:100



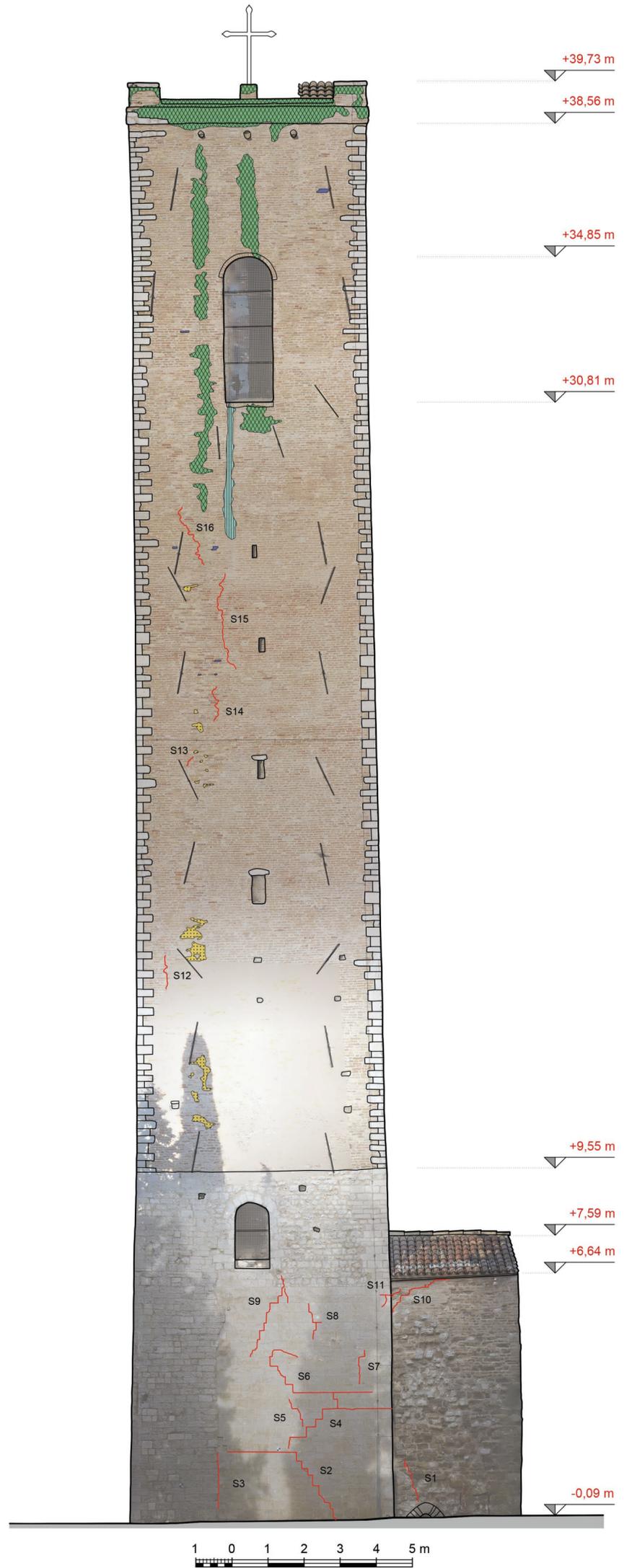
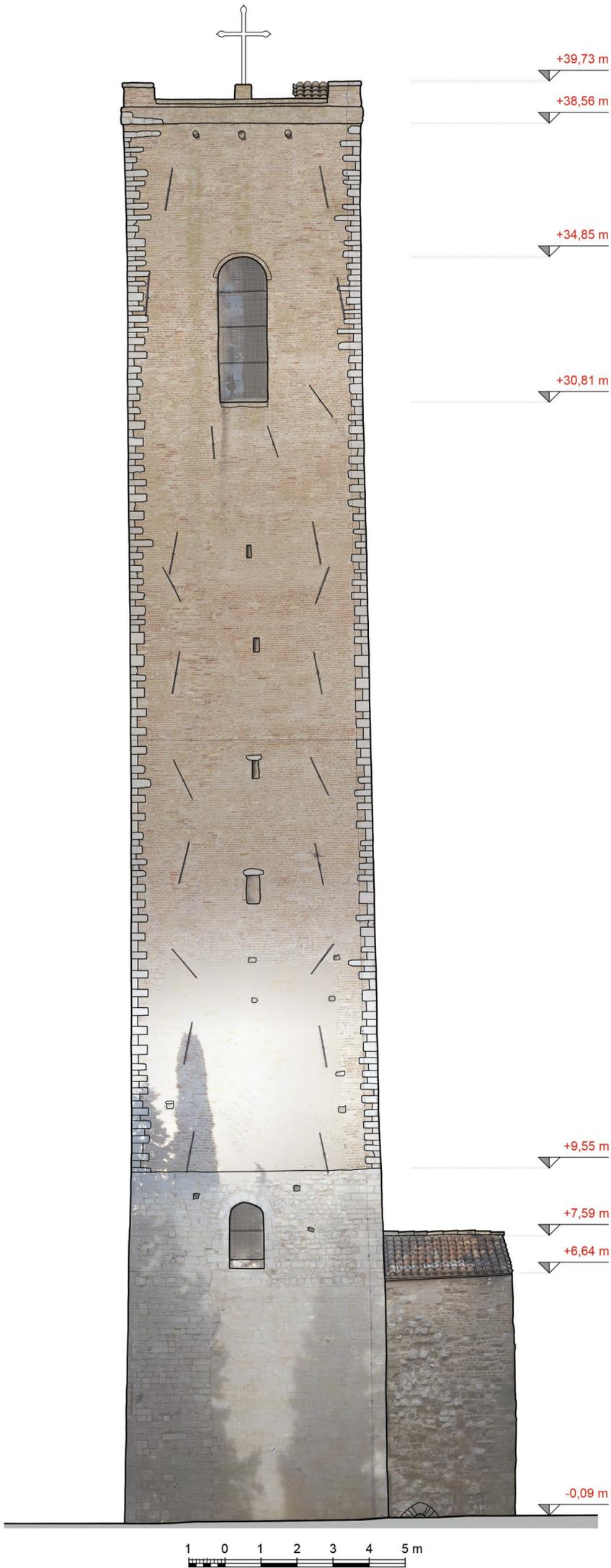


LEGENDA DELLE PATOLOGIE: DEGRADO E LESIONI (UNI 11182/2006)

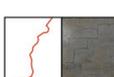
	COLATURA Tracce ad andamento verticale, generalmente parallele tra loro.		COLONIZZAZIONE BIOLOGICA Presenza riscontrabile di micro e/o macro organismi.
	DISGREGAZIONE Decoazione con caduta del materiale sotto forma di polvere o minutissimi frammenti.		EFFLORESCENZA Formazione superficiale di aspetto cristallino o polverulento o filamentoso, generalmente di colore biancastro.
	FESSURAZIONE Soluzione di continuità nel materiale che implica lo spostamento reciproco delle parti.	N1	CODICE FESSURAZIONE Assegnato in maniera progressiva per catalogare tutte le fessurazioni presenti sui magisteri murari.

I POTETICI INTERVENTI PER LE PATOLOGIE

COLATURA: pulitura con spazzola di saggina o con lavaggi di acqua deionizzata erogata a bassa pressione.
COLONIZZAZIONE BIOLOGICA: pulitura con spazzola di saggina e sterilizzazione mediante biocidi che eliminano gli organismi biologici presenti.
DISGREGAZIONE: applicazione di un consolidante superficiale a spruzzo per migliorare le caratteristiche meccaniche della superficie esterna. Il prodotto deve essere applicato previa pulitura della superficie da polveri, efflorescenze e inquinanti atmosferici.
EFFLORESCENZA: spazzolatura delle zona da trattare al fine di rimuovere materiale fine disgregato o friabile, estrazione dei sali solubili mediante cicli di impacchi acqua distillata, lavaggio con acqua deionizzata e leggera spazzolatura al fine di rimuovere eventuali residui di materiale.

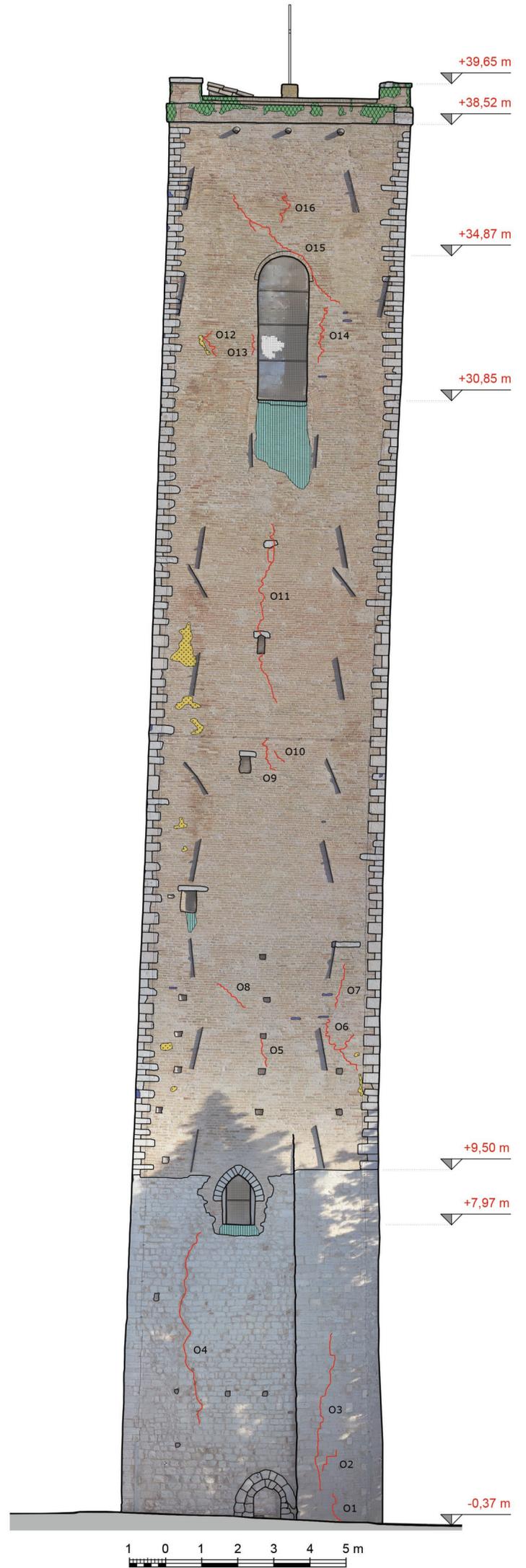
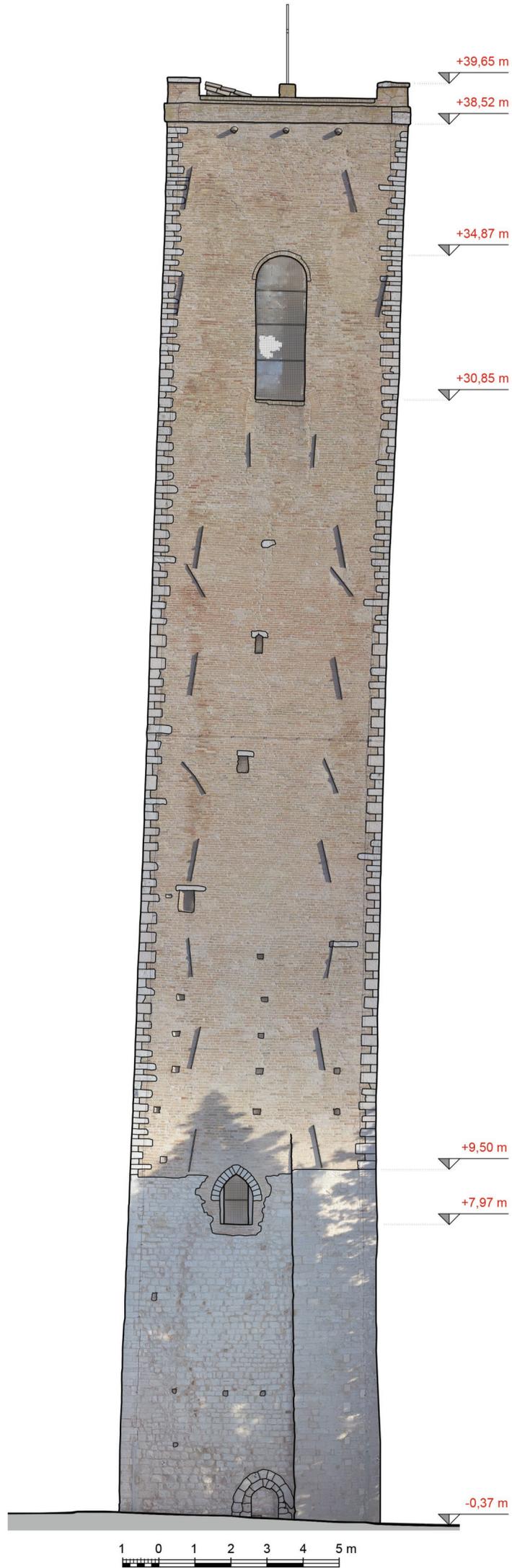


LEGENDA DELLE PATOLOGIE: DEGRADO E LESIONI (UNI 11182/2006)

	COLATURA Tracce ad andamento verticale, generalmente parallele tra loro.		COLONIZZAZIONE BIOLOGICA Presenza riscontrabile di micro e/o macro organismi.
	DISGREGAZIONE Decoazione con caduta del materiale sotto forma di polvere o minutissimi frammenti.		EFFLORESCENZA Formazione superficiale di aspetto cristallino o polverulento o filamentoso, generalmente di colore biancastro.
	FESSURAZIONE Soluzione di continuità nel materiale che implica lo spostamento reciproco delle parti.	S1	CODICE FESSURAZIONE Assegnato in maniera progressiva per catalogare tutte le fessurazioni presenti sui magisteri murari.

I POTETICI INTERVENTI PER LE PATOLOGIE

COLATURA: pulitura con spazzola di saggina o con lavaggi di acqua deionizzata erogata a bassa pressione.
COLONIZZAZIONE BIOLOGICA: pulitura con spazzola di saggina e sterilizzazione mediante biocidi che eliminano gli organismi biologici presenti.
DISGREGAZIONE: applicazione di un consolidante superficiale a spruzzo per migliorare le caratteristiche meccaniche della superficie esterna. Il prodotto deve essere applicato previa pulitura della superficie da polveri, efflorescenze e inquinanti atmosferici.
EFFLORESCENZA: spazzolatura delle zone da trattare al fine di rimuovere materiale fine disgregato o friabile, estrazione dei sali solubili mediante cicli di impacchi acqua distillata, lavaggio con acqua deionizzata e leggera spazzolatura al fine di rimuovere eventuali residui di materiale.

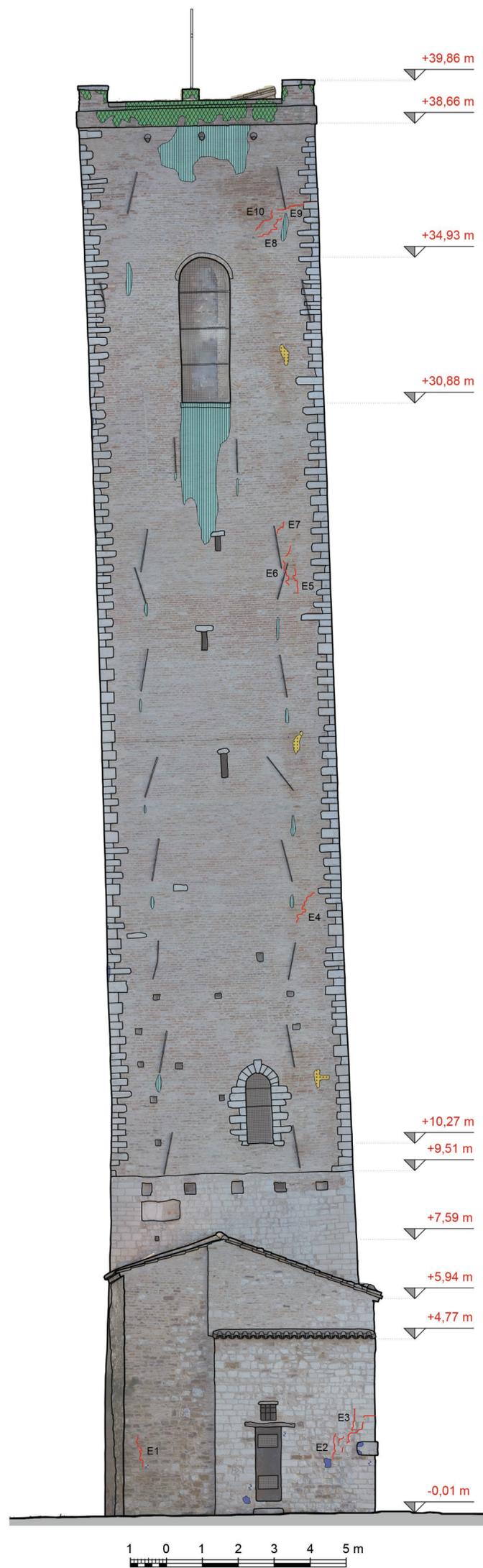
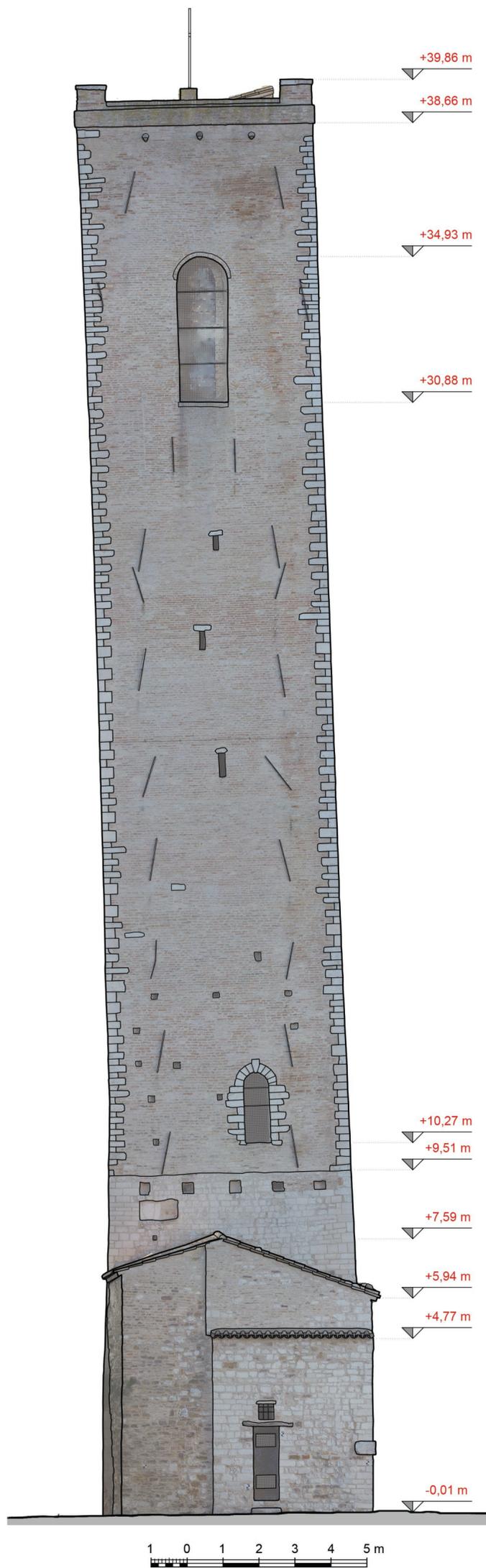


LEGENDA DELLE PATOLOGIE: DEGRADO E LESIONI (UNI 11182/2006)

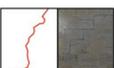
	COLATURA Tracce ad andamento verticale, generalmente parallele tra loro.		COLONIZZAZIONE BIOLOGICA Presenza riscontrabile di micro e/o macro organismi.
	DISGREGAZIONE Decoazione con caduta del materiale sotto forma di polvere o minutissimi frammenti.		EFFLORESCENZA Formazione superficiale di aspetto cristallino o polverulento o filamentoso, generalmente di colore biancastro.
	FESSURAZIONE Soluzione di continuità nel materiale che implica lo spostamento reciproco delle parti.	01	CODICE FESSURAZIONE Assegnato in maniera progressiva per catalogare tutte le fessurazioni presenti sui magisteri murari.

I POTETICI INTERVENTI PER LE PATOLOGIE

COLATURA: pulitura con spazzola di saggina o con lavaggi di acqua deionizzata erogata a bassa pressione.
COLONIZZAZIONE BIOLOGICA: pulitura con spazzola di saggina e sterilizzazione mediante biocidi che eliminano gli organismi biologici presenti.
DISGREGAZIONE: applicazione di un consolidante superficiale a spruzzo per migliorare le caratteristiche meccaniche della superficie esterna. Il prodotto deve essere applicato previa pulitura della superficie da polveri, efflorescenze e inquinanti atmosferici.
EFFLORESCENZA: spazzolatura delle zone da trattare al fine di rimuovere materiale fine disgregato o friabile, estrazione dei sali solubili mediante cicli di impacchi acqua distillata, lavaggio con acqua deionizzata e leggera spazzolatura al fine di rimuovere eventuali residui di materiale.



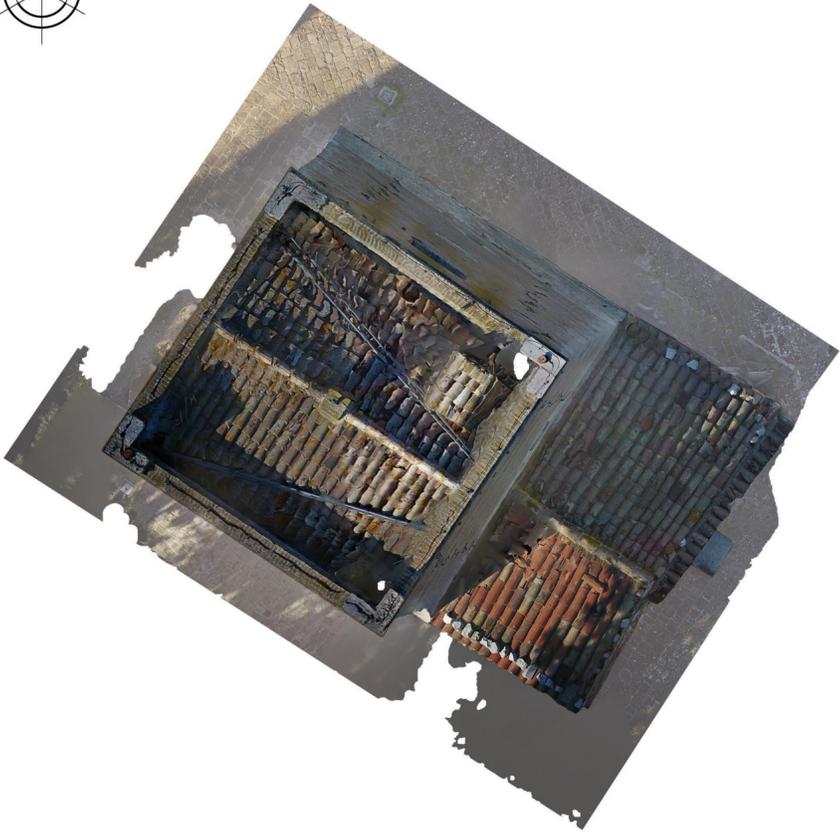
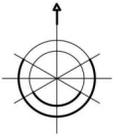
LEGENDA DELLE PATOLOGIE: DEGRADO E LESIONI (UNI 11182/2006)

	COLATURA Tracce ad andamento verticale, generalmente parallele tra loro.		COLONIZZAZIONE BIOLOGICA Presenza riscontrabile di micro e/o macro organismi.
	DISGREGAZIONE Decoazione con caduta del materiale sotto forma di polvere o minutissimi frammenti.		EFFLORESCENZA Formazione superficiale di aspetto cristallino o polverulento o filamentoso, generalmente di colore biancastro.
	FESSURAZIONE Soluzione di continuità nel materiale che implica lo spostamento reciproco delle parti.	E1	CODICE FESSURAZIONE Assegnato in maniera progressiva per catalogare tutte le fessurazioni presenti sui magisteri murari.

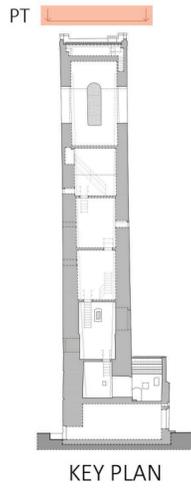
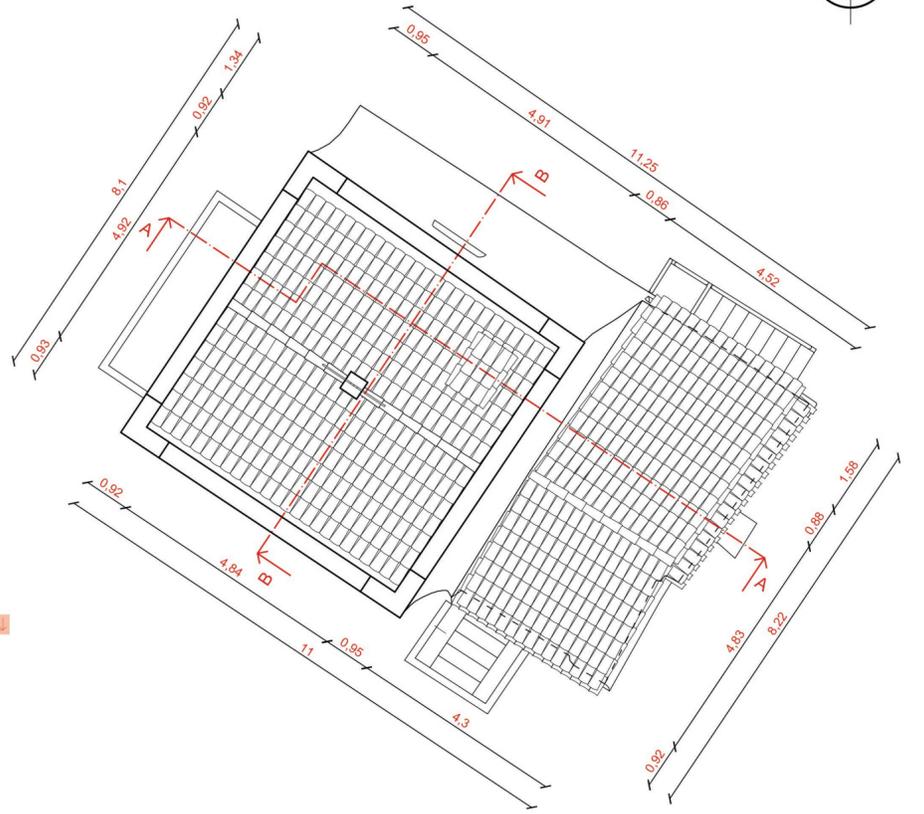
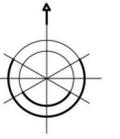
I POTETICI INTERVENTI PER LE PATOLOGIE

COLATURA: pulitura con spazzola di saggina o con lavaggi di acqua deionizzata erogata a bassa pressione.
COLONIZZAZIONE BIOLOGICA: pulitura con spazzola di saggina, sterilizzazione mediante biocidi che eliminano gli organismi biologici presenti.
DISGREGAZIONE: applicazione di un consolidante superficiale a spruzzo per migliorare le caratteristiche meccaniche della superficie esterna. Il prodotto deve essere applicato previa pulitura della superficie da polveri, efflorescenze e inquinanti atmosferici.
EFFLORESCENZA: spazzolatura delle zone da trattare al fine di rimuovere materiale fine disgregato o friabile, estrazione dei sali solubili mediante cicli di impacchi acqua distillata, lavaggio con acqua deionizzata e leggera spazzolatura al fine di rimuovere eventuali residui di materiale.

ORTOFOTO AEREA Scala 1:100

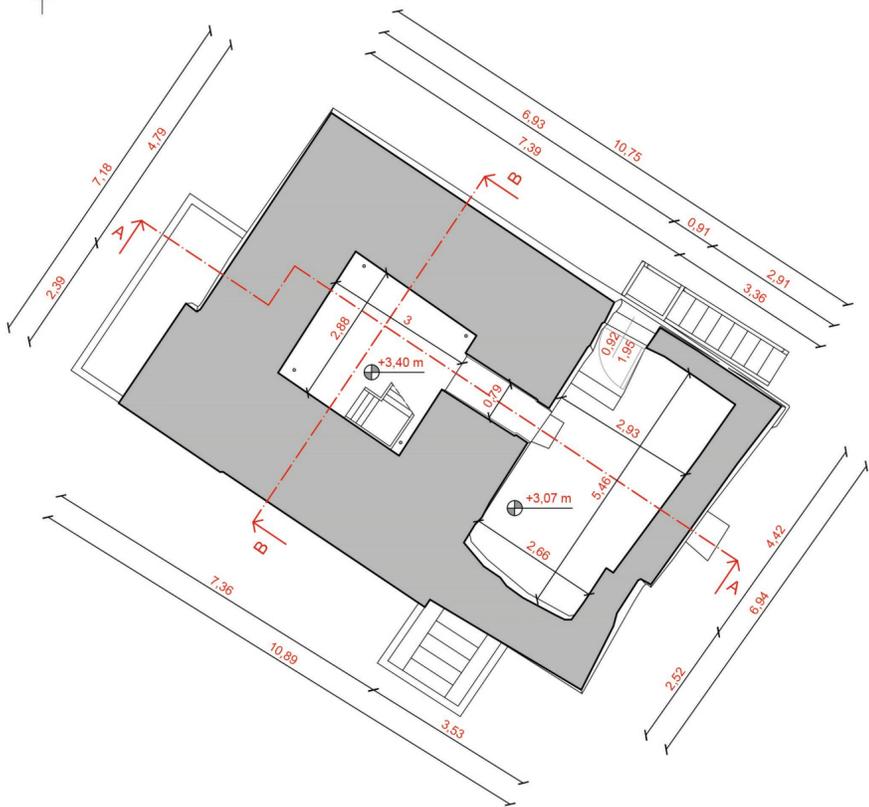
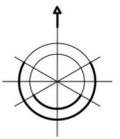


VETTORIALIZAZIONE DELLA PIANTA DEL TETTO Scala 1:100

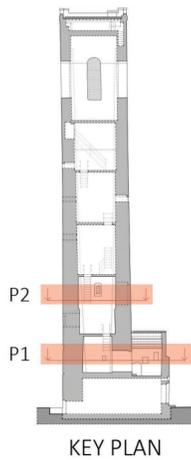
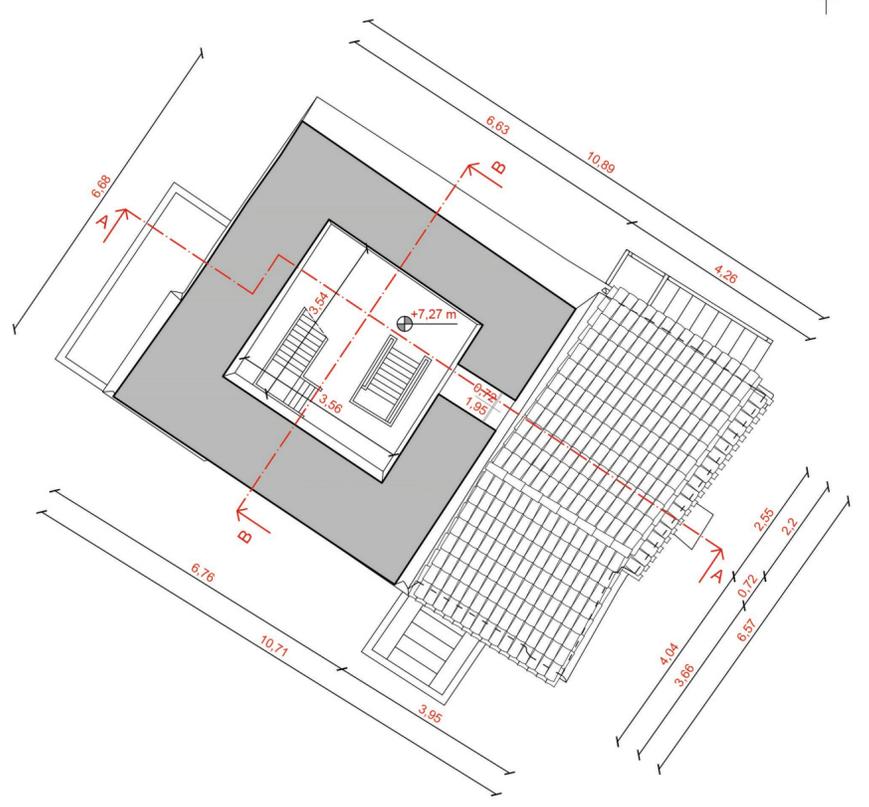
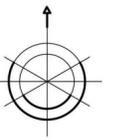


KEY PLAN

VETTORIALIZAZIONE DELLA PIANTA DEL PIANO PRIMO Scala 1:100



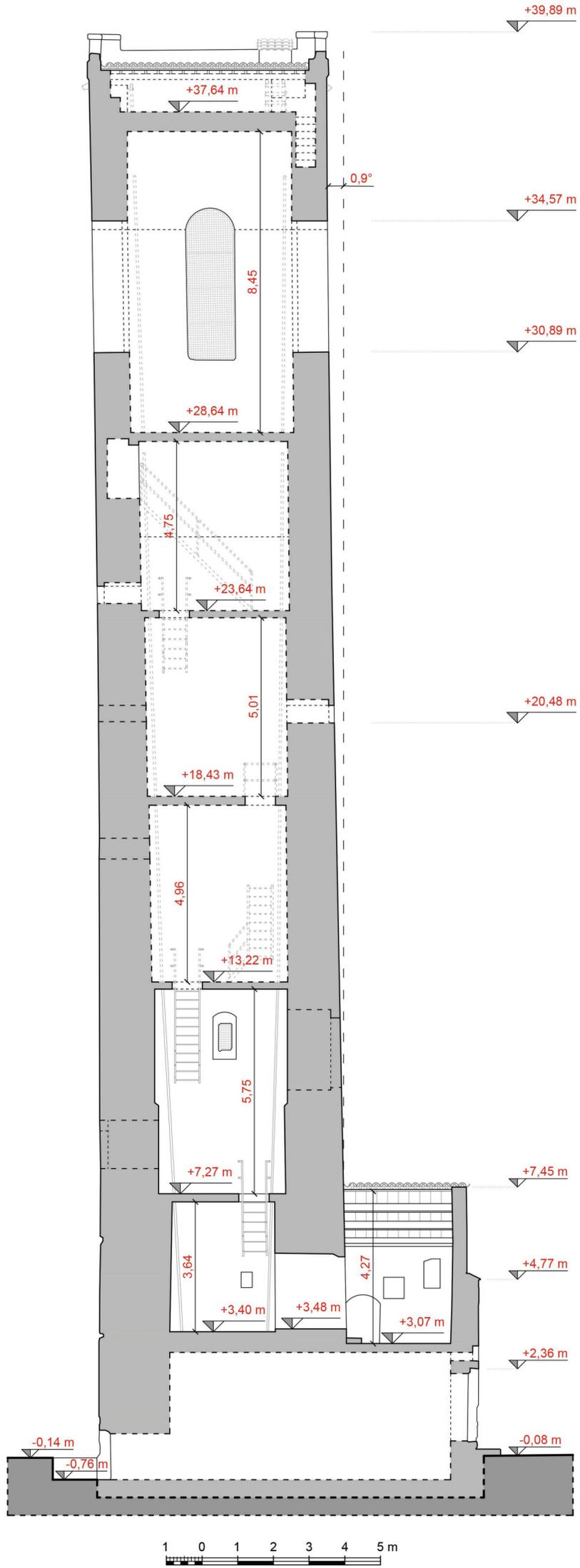
VETTORIALIZAZIONE DELLA PIANTA DEL PIANO SECONDO Scala 1:100



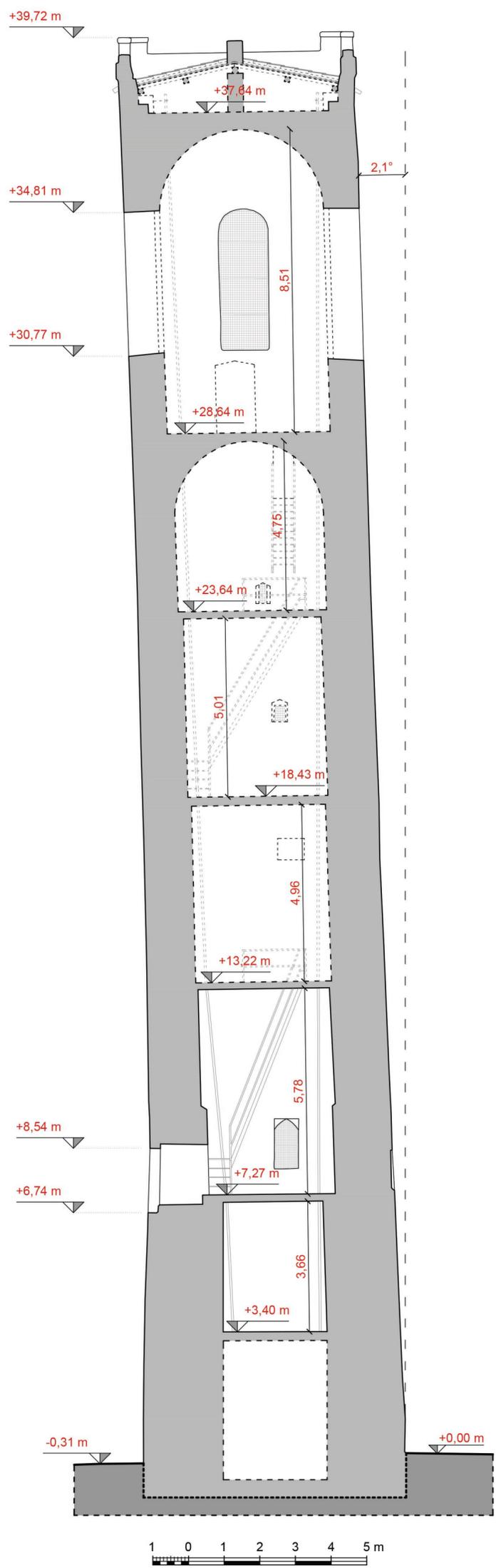
KEY PLAN



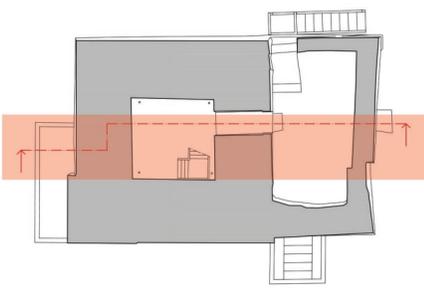
VETTORIALIZZAZIONE DELLA SEZIONE A- A Scala 1:100



VETTORIALIZZAZIONE DELLA SEZIONE B- B Scala 1:100



KEYPLAN SEZIONE A- A



LEGENDA

-  Muratura sezionata (laterizi e pietre)
-  Elementi lignei sezionati
-  Linee di delimitazione degli elementi della Torre, vettorializzate a partire dalla nuvola di punti.
-  Linee di delimitazione degli elementi della Torre, ipotizzate a partire dalla documentazione fotografica del rilievo del 30 maggio.

KEYPLAN SEZIONE B- B

