

FOTOGRAMMETRIA DA UAV. ANALISI A GRANDE SCALA CON MODELLAZIONE 3D IN AMBITO URBANO

UAV PHOTOGRAMMETRY. LARGE SCALE ANALYSIS WITH 3D MODELLING IN THE URBAN AREA

N. Liscia

DADU, Dipartimento di Architettura Design Urbanistica, Università di Sassari, E-mail: nicola.liscia@tiscali.it

PAROLE CHIAVE: Fotogrammetria digitale, UAV, analisi 3D

KEY WORDS: Digital photogrammetry, UAV, 3D analysis

RIASSUNTO

L'articolo descrive l'importanza che hanno le applicazioni fotogrammetriche nelle discipline legate allo studio del territorio e dell'ambiente urbano, sperimentando alcune applicazioni idonee a una valutazione del grado di accuratezza raggiungibile con riprese ad altezza di volo molto bassa, e sensori ad alta risoluzione, effettuate da UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Queste tecniche di rilievo, economicamente sostenibili anche per modeste estensioni territoriali, permettono un'analisi 3D aggiornata, utile ai tecnici, agli amministratori, ai progettisti e in generale a tutti coloro che, impegnati nella pianificazione territoriale, richiedono la definizione di interventi progettuali sia a scala territoriale che di dettaglio.

Il lavoro è stato svolto nel Laboratorio GIS per la Pianificazione Ambientale e la Storia del Territorio (ProSIT) del Dipartimento di Architettura Design e Urbanistica di Alghero (SS) e comprende un'analisi tridimensionale di dettaglio in ambito urbano (rilievo 3D e restituzione vettoriale) le cui finalità sono legate principalmente allo studio delle volumetrie del costruito, all'estrazione di sezioni altimetriche, agli studi vegetazionali per le aree a verde.

Nella presentazione del caso studio verranno inoltre descritte le fasi di progettazione ed esecuzione del rilievo, esaminando tutti gli aspetti propri di questa metodologia (dalla fase di pianificazione del volo, di gestione ed elaborazione dei dati, fino a quella di restituzione in stereoscopia e di produzione cartografica secondo la normativa INSPIRE) e valutando le potenzialità e le criticità degli strumenti e delle procedure considerate. Appare interessante il confronto fra le procedure classiche della ripresa e restituzione digitale aerofotogrammetrica e quelle odierne basate su metodologie SfM.

ABSTRACT

The report illustrates the importance of photogrammetric applications in the disciplines related to the study of the territory, and the urban environment, experimenting with some applications to assess the degree of accuracy achievable with very low altitude footage, and high resolution sensors, carried out by UAV (Unmanned Aerial Vehicle). These low-cost techniques, economically sustainable even for modest territorial extensions, allow to generate updated 3D information layers useful to technicians, administrators, planners and in general to all those who, involved in the urban development planning, require the definition of projects both on a territorial scale and in detail.

The work was carried out in the GIS Laboratory for Environmental Planning and History of the Territory (ProSIT) of the Department of Architecture Design and Urbanism of Alghero (SS) and includes a three-dimensional analysis of details in urban areas (3D survey and vector return) whose purposes are mainly related to the study of the volumes of the built, to the construction of the altimetric sections, to the vegetation studies for the green areas.

The phases of project and survey will be described in the presentation of the case study, by examining all the aspects of this methodology (from the phase of flight planning, management and data processing, up to that of restitution in stereoscopy and cartographic production according to INSPIRE Directive) and assessing the potential and the critical aspects of the tools and procedures considered. The comparison between classical shooting and digital aerial photogrammetric restitution and today's procedures based on semi-automatic procedures is interesting.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni l'evoluzione e la rapida diffusione di strumenti UAV (Unmanned aerial vehicle) sta favorendo un ritorno nella diffusione delle tecniche fotogrammetriche, in particolar modo nelle applicazioni a corta distanza (Close Range Photogrammetry) (Kraus, 2007; Luhmann et al. 2014).

Architettura e Pianificazione territoriale, Archeologia, Monitoraggio ambientale, agricoltura di precisione: oggi sono sempre più numerosi gli ambiti di applicazione e di ricerca nei quali è richiesto l'uso di acquisizioni fotogrammetriche da UAV, in quanto strumento di costruzione di dati 3D (Nex, Remondino, 2014).

Sia gli addetti ai lavori che i committenti sono finalmente pronti a dominare le capacità di utilizzo e gestione dei modelli tridimensionali, nella cartografia numerica, evitando l'uso per scopi puramente visuali e "scenici" o solo per applicazioni di realtà virtuale. Non va tralasciato, inoltre, che i tecnici dipendenti delle Pubbliche Amministrazioni (es. nelle Soprintendenze dello Stato responsabili dei Beni Archeologici ed Architettonici) chiedono per lo più dati bidimensionali in formati standard (cad o gis) per una loro consuetudine operativa.

E' sotto questa ottica che vanno viste le potenzialità dei modelli 3D (nuvola di punti e/o mesh): l'operatore può scegliere di risaltare solo determinate informazioni che ritiene importanti,

tramite operazioni di filtraggio e catalogazione, producendo così tematismi, o semplicemente utilizzando il modello per ricavarne misure di distanze, aree o volumi, creare viste ortografiche, produrre sezioni, modelli digitali di elevazione e di superficie. Molte criticità sono emerse nell'uso di questi processi nel rilievo in ambito urbano, il quale presenta innumerevoli potenzialità per quanto riguarda la mappatura e la estrazione di feature 3D di manufatti e infrastrutture, ma che di fatto, se eseguita da UAV, subisce anche in Italia una stringente normativa di uso da parte dell'ENAC (ENAC,2015).

Fortunatamente le modifiche apportate alla normativa, nel luglio 2015, hanno reso più flessibili le operazioni in contesti urbani, consentendo il sorvolo di queste aree a velivoli inferiori a 300gr classificati come "inoffensivi" sulla base di alcune caratteristiche peculiari e aprendo di fatto alcune finestre nelle opportunità di lavoro (Carnevali et al, 2018). Tuttavia, per rispettare le limitazioni di peso imposte dalla normativa, gli UAV "inoffensivi" vengono generalmente equipaggiati con fotocamere e sensori leggeri e quindi di qualità insufficiente per trovare impiego in applicazioni professionali.

Questi aspetti normativi, di primaria importanza nel contesto della ricerca, hanno influenzato e contribuito a determinare scelte strategiche di progetto, come ad esempio l'estensione e la localizzazione dell'oggetto del rilievo. Il velivolo adoperato, un multiroto FlyNovex a disposizione del laboratorio ProSIT con un peso complessivo di 7 kg (ed un payload non superiore a 1,5 kg), risulta di fatto non utilizzabile in contesti urbani e pertanto è stato necessario individuare un'area che, nel momento delle riprese, avesse l'assenza di persone e che presentasse caratteristiche tipiche di un contesto urbanizzato. La scelta è ricaduta su un'area strutturata con diversi edifici facenti parte del complesso del Parco Scientifico e Tecnologico di "Porto Conte Ricerche", partecipata controllata di Sardegna Ricerche, nella sede di Tramariglio (Alghero). Tale area, dotata di una bassa densità edificata, non è definibile strettamente come area urbana; ciò nonostante è stata scelta per le sue caratteristiche geometriche e vegetazionali. Le operazioni sono state effettuate nei giorni festivi in modo tale da effettuare la copertura fotogrammetrica da UAV in totale sicurezza e senza presenza di persone. Scopo delle operazioni svolte è stata la produzione di basi cartografiche (raster e vettoriali 2D e 3D) con una risoluzione inferiore ai 3-4 cm per le Ortofoto ed una simile tolleranza plano-altimetrica per i dati geometrici.

Il dettaglio raggiunto ha permesso di definire rapidamente gli interventi di riqualificazione a piccola scala delle aree esterne del lotto, che hanno interessato la viabilità carrabile e pedonale con la realizzazione di nuovi percorsi. Nella fase finale è stata condotta una valutazione sui tempi di esecuzione e sulla qualità dei prodotti finali.

2. IL CASO DI STUDIO: L'AREA DEL CENTRO RICERCHE DI PORTO CONTE DI TRAMARIGLIO - ALGHERO

L'area scelta per il progetto, il complesso di Porto Conte Ricerche (Fig.1) in località Tramariglio (nella estremità a ovest del comune di Alghero), possiede una superficie che è oggi strutturata con diversi edifici, alcuni adibiti ad aule, laboratori, sale conferenze ed altri destinati a residenze temporanee per ricercatori.

Nella zona circostante il Centro sono ancora esistenti gli edifici che in passato sono stati sede della Colonia Agraria Penale di Tramariglio; alcuni di questi, ristrutturati, sono sede degli uffici amministrativi del Parco Naturale di Porto Conte.



Figura 1 Foto panoramica aerea di Porto Conte Ricerche a Tramariglio

Dall'analisi dei dati cartografici delle no fly zones (Fig. 2) si evince che l'area ricade in una zona identificata come Control Zone (CTR Zona 1), nella quale sono consentite operazioni di volo a "UAV con massa operativa al decollo inferiore a 25 kg, fino ad un'altezza massima di 70 m AGL e fino ad una distanza massima sul piano orizzontale di 200 m" (ENAC, 2015, p.28). Questa condizione risulta favorevole all'esecuzione del lavoro considerato che le operazioni di volo nella nostra area non risultano soggette a specifica autorizzazione secondo le procedure ENAC.

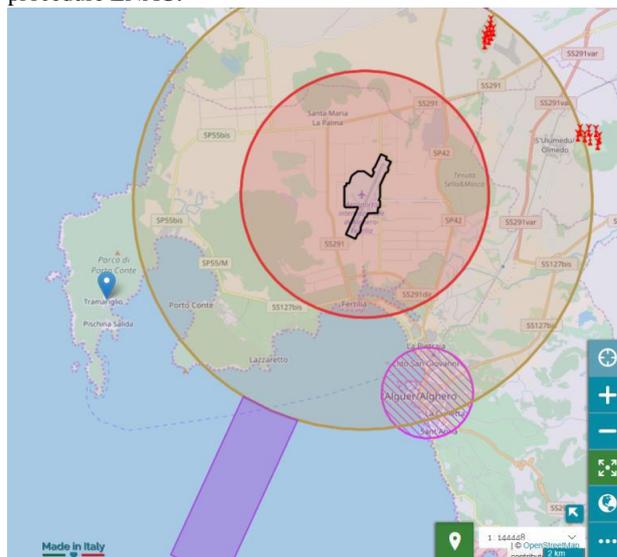


Figura 2 Posizionamento della località Tramariglio (segnalino blu) in relazione all'aeroporto di Fertilia. Dati cartografici delle no fly zones. Fonte:(IPTsat srl. CartografiaSAPR, 2017).

L'area in questione fa parte integrante del Parco Naturale Regionale di Porto Conte, il cui territorio si estende per più di 5000 ettari e che si caratterizza per un contesto naturalistico di pregio a forte valenza ambientale. L'intero territorio è quindi soggetto a misure di salvaguardia che normano la specificità di questi luoghi, aspetto da tener presente dal momento che vengono proposti interventi di trasformazione.

Il Centro di Ricerca, immerso in un contesto di questo tipo, ha le potenzialità di configurarsi come ulteriore elemento di pregio e unicità; tuttavia nella strutturazione attuale dell'area emergono diverse criticità che generano una discontinuità con il contesto di riferimento: una viabilità (con relative zone parcheggio) sovradimensionata rispetto alle reali necessità e zone verdi con funzione puramente "ornamentale", in netto contrasto con gli aspetti naturalistici e di vegetazione autoctona tipici di questa area protetta.

Il progetto, perciò, mediante piccoli interventi lineari nell'area esterna prossima alle strutture, ha l'obiettivo di integrare, omogenizzare e armonizzare maggiormente l'area considerata con il suo contesto di riferimento rappresentato dal Parco Regionale di Porto Conte. In questo modo si cercherà di convertire le criticità dell'area in opportunità di trasformazione. Attraverso il ridimensionamento in larghezza della strada principale interna al lotto, la redistribuzione delle aree parcheggio e la realizzazione di nuovi percorsi pedonali nello spazio esterno che circonda gli edifici, si vuole proporre una progettazione che permetta di migliorare l'accessibilità e la fruibilità dell'intera area presa in considerazione e di diminuire, laddove possibile, quantitativamente e qualitativamente, il carattere pseudo-urbano della attuale viabilità pedonabile e carrabile interna, limitando di fatto gli elementi di discontinuità dell'area. L'obiettivo finale è quello di integrare il Polo di Ricerca del Parco con il contesto di riferimento dell'intero Parco Regionale di Porto Conte, inteso come area naturalistica di elevato pregio ambientale e paesaggistico.

La localizzazione degli interventi, nonché l'organizzazione definitiva dello spazio, è il risultato di uno studio morfologico del sito a partire dalle curve di livello (estratte con equidistanza pari a 0,50 m dal DTM prodotto) e dalla individuazione della vegetazione esistente autoctona che, attraverso il progetto, sarà valorizzata e potrà ricostituirsi nelle aree appositamente selezionate. La generazione del modello 3D (le cui fasi verranno descritte sinteticamente nel paragrafo successivo), ha permesso di definire puntualmente gli interventi di riqualificazione a grande scala delle aree esterne del lotto (es. visibile nelle Fig. 3 e 4). Il tempo di generazione del modello tridimensionale, per certi versi elevato (dipendente dalle caratteristiche prestazionali del sistema di elaborazione delle immagini), viene recuperato abbondantemente nelle successive fasi di gestione dei dati.

3. ACQUISIZIONE IMMAGINI AEREE E FASE DIRESTITUZIONE FOTOGRAMMETRICA

L'area da rilevare presenta un'estensione di circa 10 ha, ed è stata coperta con due blocchi di strisciate parallele incrociate a 90°: le prime in direzione 135°-315° e le seconde in direzione 45°-225° (orientamento angolare rispetto al Nord).

Programmando il volo ad una altezza assoluta di 76 metri (corrispondenti ad una H_r fra i 70 ed i 40 m dal suolo), ed usando un sensore RGB Sony r7II Full Frame 24x36 mm con risoluzione pari a 42 Mpix ed obiettivo Voigtlaender Super Wide Heliar 15 mm, si è ottenuto un GSD fra i 21 mm ed i 12 mm (Fig. 5).

La pianificazione del volo è stata effettuata preventivamente attraverso il software open source Mission Planner, prevedendo riprese nadirali con un ricoprimento longitudinale (Overlap) del 85% ed un ricoprimento trasversale (Sidelap) del 65% (Fig.4). I fotogrammi ottenuti sono di dimensione 7952 x 5304 pixel (0,0045 mm la dimensione del pixel) con una scala-fotogramma fra 1:4700 e 1:2700; la dimensione massima del footprint a terra è risultata di 167x112 m, la base delle riprese 17 m. La durata prevista per ogni missione (2 voli separati) è risultata all'incirca di 13 minuti, un tempo compatibile con la tipologia di batterie montate sul velivolo (una coppia di LIPO 6S, 6 celle per una capacità di 7000 mAh) e che garantisce un margine di sicurezza per eventuali operazioni impreviste in fase di decollo e atterraggio. Un'unica missione non poteva essere fattibile, visto il tempo di volo calcolato superiore a 21 minuti, come mostrato nel planning della Fig.6.



Figura 3 Stato attuale con overlay delle curve di livello generate e sezione trasversale (Scala dell'originale 1:1000).



Figura 4 Proposta di intervento nell'area di studio (Scala dell'originale 1:1000).



Figura 5 Sistema utilizzato per effettuare il rilievo descritto, un drone FlyNovex equipaggiato da fotocamera Sony r7II FF.

L'appoggio topografico è stato effettuato, successivamente all'esecuzione del volo, con un sistema GNSS (Leica GS14) e correzione differenziale in modalità RTK, senza l'ausilio di target artificiali con l'individuazione di soli punti fotografici. La scelta di punti fotografici è stata fatta per simulare operazioni reali di rilievo aerofotogrammetrico in cui l'inserimento di target artificiali avrebbe portato a dei costi non sostenibili (il decadimento della precisione può essere contenuto con un'opportuna scelta degli stessi). Sono stati rilevati 16 punti in

totale, disposti perimetralmente al lotto, per rendere più rigida la georeferenziazione del modello e diminuire il più possibile gli scarti residui. 3 punti sono stati distribuiti nell'area di studio, in modo da classificarli come "check point" e verificarne in seguito l'accuratezza del modello attraverso la valutazione degli scarti ottenuti (Fig. 7).

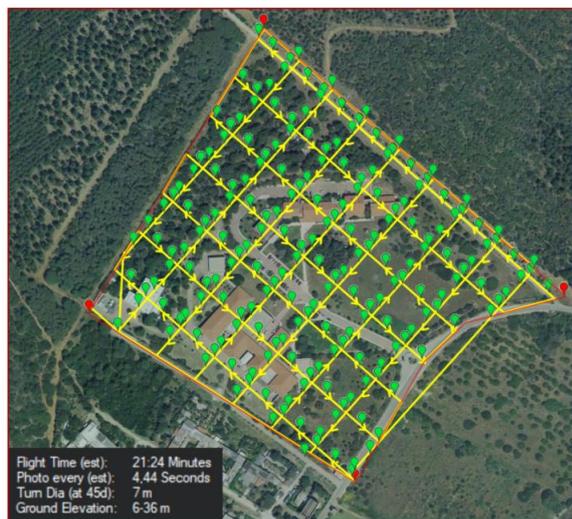


Figura 6 Progetto della copertura fotogrammetrica nell'area di studio.



Figura 7 Schema di localizzazione dei 16 punti fotografici rilevati con tecnologia GNSS.

Per ottenere una elevata qualità radiometrica delle riprese sono state valutate attentamente le regolazioni del sensore: la funzione di automatismo scelta, "priorità di diaframma", ha permesso di modificare solo i tempi di otturazione. Anche la sensibilità ISO, imposta al sensore, è stata regolata su 1000 ISO (il valore, apparentemente alto, è compatibile con la qualità del sensore FF) per garantire un basso "rumore" dell'immagine (come noto i sensori FF offrono basso rumore anche con sensibilità medio-elevate come 1000 ISO) ed una sensibilità sufficiente a garantire tempi di otturazione variabili fra 1/800 ed 1/2000. In questo modo si sono potuti ridurre, al di sotto del valore di soglia valutato in circa 2 pixel ($=0,009$ mm), l'effetto del "trascinamento" dell'immagine provocato dal moto dell'UAV rispetto al terreno. A tale scopo la velocità programmata di spostamento del velivolo è stata anche ridotta a 4 m/s. La formazione del modello 3D, eseguita successivamente in laboratorio con le procedure Agisoft Photoscan Pro, ha compreso

una prima fase di allineamento ed autocalibrazione dei 191 fotogrammi che ha prodotto una nuvola rada di circa 150.000 punti (grado di accuratezza alto). Il modello ottenuto è stato georeferenziato appoggiandolo sui punti acquisiti con il sistema GNSS.

Ogni punto di coordinate note (GCP) è stato collimato manualmente in tutti i fotogrammi interessati. Una volta posizionati tutti i marker si è proceduto, nuovamente, alla ottimizzazione e calibrazione dei parametri interni delle camere, che ha permesso di raffinare i parametri di distorsione radiale della camera k_1 , k_2 e k_3 , della distorsione tangenziale p_1 e p_2 , delle coordinate del punto principale c_x e c_y e della lunghezza focale calibrata. L'orientamento assoluto, che nella fase iniziale comprende una semplice rototraslazione spaziale con variazione di scala, nella fase finale di calcolo è assai più sofisticata ed è eseguita con una compensazione ai minimi quadrati del blocco di fotogrammi.

Tutte le riprese effettuate con la stessa ottica riportano dati pressoché identici, il che attesta la solidità della struttura del corpo macchina e dell'obiettivo (nell'ipotesi operativa che l'obiettivo sia a focale fissa e che la ghiera della messa a fuoco sia bloccata su infinito o su un valore calcolato (generalmente l'iperfocale). Gli unici valori che denunciavano piccole variazioni (alcuni 1/100 mm) sono stati quelli relativi alla posizione del punto principale c_x e c_y per gli inevitabili giochi meccanici esistenti nel fissaggio delle ottiche intercambiabili.

L'errore geometrico di riproiezione dei pixel è risultato più evidente nelle zone periferiche dell'immagine, coerentemente con lo schema classico di tutti gli obiettivi (Cinque, 2016). Nei fotogrammi scattati con ottiche grandangolari (tipici delle *Action Cam* come le *GoPro*) questo effetto è molto evidente e anche visivamente è facilmente riconducibile a una distorsione radiale negativa (a barilotto). L'obiettivo utilizzato in questo lavoro, al contrario, ha mostrato distorsioni molto piccole come denuncia lo studio del relativo grafico della distorsione (Fig. 8) ed è stato utile a comprendere l'entità delle aberrazioni geometriche. Va ricordato che la componente radiale del vettore di errore, che varia allontanandosi dal centro ottico, è sempre quella predominante, mentre quella tangenziale, perpendicolare alla prima, risulta notevolmente inferiore e può essere spesso trascurata. Valori di distorsione limitati sono frutto, come insegnano le classiche teorie sulla costruzione di ottiche fotogrammetriche, di uno schema ottico simmetrico possibile solo in camere fotografiche *mirror-less* in cui la distanza lente posteriore / sensore è ridotta.

Per calcolare precisamente questo effetto gestendolo nel modo corretto i software fotogrammetrici utilizzano i polinomi di Brown (Brown, 1971).

La nuvola sparsa risulta georeferenziata, e per ogni punto di controllo sono stati valutati gli scarti di posizione e quota espressi in metri. Il punto 14 presentava un errore abbastanza importante (18 cm sulle xy), per cui si è ritenuto più conveniente eliminarlo dal calcolo per far diminuire l'errore complessivo nella compensazione del blocco (Tab. 1).

Il modello completo di *mesh texturizzata*, ottenuto completando le fasi di lavoro, ha permesso di generare un modello digitale di elevazione (DEM) e un ortofotomosaico di precisione centimetrica.

Per fare un confronto il DEM (ottenuto con acquisizioni LiDAR) scaricabile dal sito del Geoportale della Regione Sardegna possiede una maglia di 1x1 m, mentre quello prodotto con acquisizioni UAV ha una risoluzione pari a 7,6 cm. Analogamente l'ortofoto presentava una elevata risoluzione di 1,9 cm che ha permesso di cogliere dettagli non apprezzabili nell'ortofoto regionale del 2008 (il più dettagliato esistente) con GSD di 10 cm (Fig. 9).

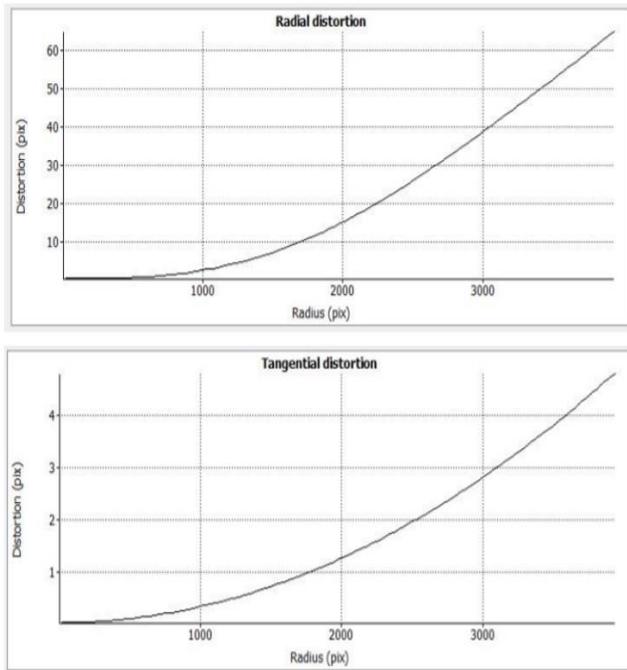


Figura 8. Grafici di distorsione radiale e tangenziale calcolati con Agisoft Lens, risultanti dal processo di autocalibrazione.

Tabella 1. Valutazione degli errori di orientamento.

Label	Errors			
	XY (m)	Z (m)	Tot. (m)	Tot. (pix)
0001	0.0922	0.0166	0.0936	0.150
0002	0.0491	-0.0087	0.0498	0.072
0003	0.0080	0.0019	0.0082	0.129
0004	0.0241	-0.0012	0.0241	0.116
0005	0.0069	0.0046	0.0083	0.039
0006	0.0139	-0.0053	0.0149	0.026
0007	0.0058	0.0046	0.0074	0.019
0008	0.0004	-0.0008	0.0009	0.035
0009	0.0124	0.0171	0.0211	0.224
0010	0.0305	-0.0099	0.0320	0.186
0011	0.0145	-0.0202	0.0249	0.089
0012	0.0175	0.0142	0.0119	0.043
0013	0.0049	0.0089	0.0102	0.066
0014	0.1823	0.0082	0.1825	0.162
0015	0.0375	-0.0086	0.0385	0.077
0016	0.0063	0.0009	0.0063	0.072
Total	0.0584	0.0099	0.0592	0.121
Total	0.0145	0.0087	0.0169	0.112



Figura 9. Ortofoto generata da volo UAV (a destra) e ortofoto disponibile per il Territorio della Regione Sardegna, datata 2008 (sinistra).

4. FASE DI RESTITUZIONE VETTORIALE IN STEREOSCOPIA

La visione stereoscopica dell'operatore restituitista, presente di rado sui sistemi SfM, offre ancora oggi maggiori possibilità di percezione delle geometrie tridimensionali in particolar modo quando è necessaria una raffinata fotointerpretazione (vegetazione, geomorfologia etc.).

La marca mobile, che ricordiamo essere il riferimento spaziale che consente nel software di individuare le coordinate spaziali dei punti, permette di discriminare le primitive geometriche dei vari elementi presenti nella scena ricavando dunque una modellazione vettoriale 3D georeferenziata. Questa informazione, nell'analisi di un ambiente urbano, non solo risulta utile per effettuare un'estrusione di oggetti finalizzata a modellazioni spaziali successive, ma diviene essenziale anche nella costruzione di cartografia numerica con la "struttura" di *GeoDataBase* (es. secondo direttiva INSPIRE) per le diverse discipline legate allo studio del territorio.

La suite ERDAS Imagine della Hexagon Geospatial, (LPS - Leica Photogrammetry Suite) con i relativi sottomoduli, utilizzata nel presente lavoro, permette di eseguire l'intero processo di generazione del blocco fotogrammetrico (Planetek Italia S.r.l., 2013) che prevede l'orientamento interno, l'allineamento dei fotogrammi e infine l'orientamento esterno basato su una Bundle Block Adjustment (Eisenbeiß, 2009).

In questo caso specifico lo stesso procedimento non è stato ripetuto, in quanto viene utilizzato l'orientamento già precedentemente completato in ambiente Agisoft Photoscan (Fig. 10).

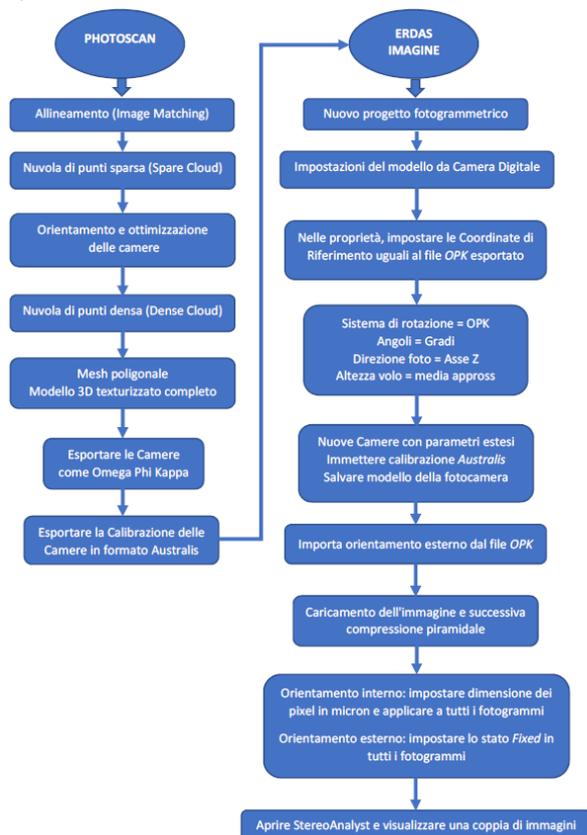


Figura 10. Flowchart dell'intero flusso di lavoro

Questo flusso di lavoro, poco sperimentato, permette di inserire i sei parametri di orientamento (X_n , Y_n , Z_n , Ω_n , Φ_n , K_n) collegati ad ogni fotogramma e, quindi, di poter operare su tutto il blocco di 191 fotogrammi (Fig.11) su coppie stereoscopiche (modulo ERDAS Stereo Analyst).

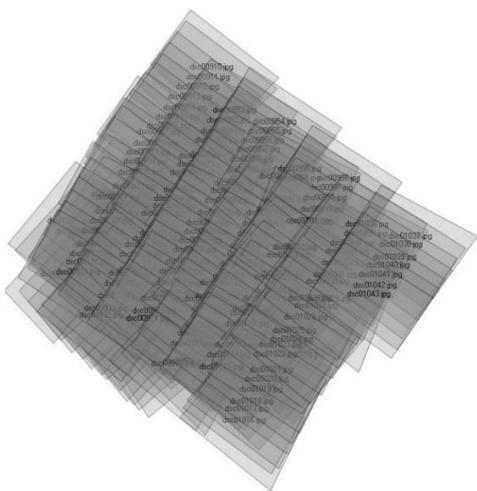


Figura 11. Visualizzazione del blocco orientato in cui si legge lo schema di ripresa con blocchi di strisciate parallele ed incrociate a 90°.

Si può navigare facilmente fra le stereocoppie ed operare in stereoscopia con la tecnica degli anaglifi (Rossi, 2009) o, come nel caso in oggetto, usando un Sistema Planar dotato di due schermi LCD sovrapposti con interposto specchio semi riflettente a 45°. In quest'ultima metodologia l'uso di occhiali polarizzati passivi rende la visione stereoscopica molto "naturale" e permette anche la visualizzazione 3D a più osservatori.

I tematismi da digitalizzare sono stati pianificati a priori uniformandoli a quelli standard presenti nel Database Multiprecisione della Regione Sardegna e in conformità ai principi della Direttiva INSPIRE (Parlamento Europeo, 2007) e alle linee guida nazionali dell'Agenzia per l'Italia Digitale (AGID, 2017). "Il Database Multiprecisione (DBMP) della Regione Sardegna (RAS) è una banca dati in cui le entità geometriche, provenienti inizialmente dalla Carta Tecnica Regionale Numerica (CTRN) alla scala 1:10.000 ed altri DB, convivono con quelle provenienti dalle carte tecniche comunali numeriche (CNC) di 47 centri urbani e località abitate della Sardegna alle scale 1:1.000, 1:2.000 e 1:5.000" (Matta et al., 2009, p.1405).

Sono state restituite entità riconducibili nel DBMP ad alcune classi relative allo strato 01 inerente viabilità, mobilità e trasporti, ed altre a classi relative allo strato 02 riguardante immobili e antropizzazione. Ogni entità viene caratterizzata da un proprio codice alfanumerico che ne identifica il numero della classe, del tema e dello strato riferiti al Database.

5. GESTIONE DEI DATI E FOTOINTERPRETAZIONE

Lo studio geometrico e tipologico della vegetazione ha rappresentato una parte rilevante nel processo di definizione del progetto proposto e pertanto questa descrizione ha lo scopo di fornire un approfondimento riguardante il lavoro di analisi ed estrazione delle informazioni utili a classificare questo tematismo. Nel lotto esaminato sono presenti differenti specie arboree, arbustive e erbacee e ognuna di esse ha caratteristiche dimensionali proprie della specie di appartenenza (Fig.12).

L'informazione di altezza è risultata utile per compiere una primissima differenziazione della vegetazione, ed è stata ottenuta mediante una comparazione tra il raster relativo al DSM e quello relativo al DTM (in precedenza opportunamente estratto da una classificazione manuale della vegetazione). Nel dettaglio è stato possibile estrapolare l'altezza degli elementi di nostro interesse, ottenendo un nuovo raster con le informazioni desiderate, con il modulo *Raster Calculator* di *QGIS 3.2*. Il modulo permette di

effettuare operazioni di calcolo sui valori dei pixel di raster esistenti.



Figura 12. Schema esemplificativo della tipologia di vegetazione.

L'espressione DSM – DTM sottrae a ogni pixel del primo raster il valore di altezza relativo al terreno consentendo in questo modo di isolare la quota di elementi quali case e alberi. Il nuovo raster avrà valori prossimi allo zero laddove le due superfici risultino corrispondenti e valori positivi in presenza di vegetazione e strutture in elevato. I valori leggermente negativi sono il risultato di errori introdotti nella fase di generazione e interpolazione del DTM.

Successivamente è stato sufficiente ritagliare il nuovo raster con un file vettoriale SHP contenente le geometrie poligonali della vegetazione per avere l'informazione dell'altezza solo in queste aree. Questo SHP, che racchiude l'impronta della vegetazione, è stato ottenuto mediante operazioni di filtraggio e di classificazione radiometrica dalla nuvola di punti densa in Photoscan, ed è stato esportato in formato raster per poi essere convertito, attraverso il comando *Poligonalizzazione*, in formato vettoriale. Il comando di smussatura ha permesso di semplificare le geometrie, eliminando il fastidioso problema della quadrettatura dei pixel (ancora visibili nel precedente passaggio di conversione) rendendole più aderenti alla rappresentazione cartografica (Fig.13).



Figura 13. Effetto visivo della quadrettatura dei pixel (a sinistra), corretto con il comando smussatura in *QGIS* (a destra).

Questa informazione è stata gestita in ambiente GIS per effettuare una prima semplificata classificazione tipologica della vegetazione. Il comando *Statistiche Zonali* presente in *QGIS 3.2* permette di accoppiare le informazioni del raster ai poligoni dando come risultato tutta una serie di attributi interessanti quale media dei valori all'interno del poligono, valore minimo e valore massimo. L'attributo valore medio è stato utilizzato per la classificazione (Fig. 14). La vegetazione con altezza maggiore di 4 metri viene classificata come vegetazione dominante, da 1,5 m a 4 vegetazione dominata, da 0,5 a 1,5 arbustiva e inferiore a 0,5 erbacea come riportato in Figura 15.



Figura 14. Poligoni contenenti l'informazione di altezza della vegetazione in ambiente QGIS.



Figura 15. Classificazione in base al valore medio di quota interno a ogni poligono in ambiente QGIS

La disponibilità di sensori in grado di acquisire immagini in differenti bande dello spettro elettromagnetico (es. infrarosso vicino NIR) avrebbe consentito di condurre analisi multispettrali, arrivando a classificazioni vegetazionali notevolmente più accurate di quelle raggiunte. Si sarebbe potuta ricostruire la "firma spettrale" delle differenti specie vegetali, arrivando a riconoscere, per esempio, le specie aliene e esotiche presenti.

Una fotointerpretazione manuale da parte di un esperto botanico invece avrebbe permesso, nelle fasi finali, di valorare i risultati ottenuti affinando ulteriormente la classificazione.

Sono stati fatti anche dei test riguardanti la fotointerpretazione con metodi semi-automatici, che rappresenta ad oggi un campo interessante che si è evoluto e perfezionato nel corso degli ultimi anni. Fondamentalmente esistono due tipologie di classificazione una chiamata *pixel based* e l'altra *object oriented*.

Il metodo *pixel based* prende in considerazione il fatto che ogni pixel dell'ortofoto possa essere classificato singolarmente in base alla sua informazione radiometrica. In questo modo ogni pixel sarà associato a una specifica classe precedentemente definita. Gli algoritmi che stanno alla base di questa metodologia, processando però esclusivamente la caratteristica radiometrica del pixel, hanno lo svantaggio di risultare efficaci solo per l'estrazione di classi tipologiche ben distinte da colori netti distribuiti nello spazio. Con questa metodologia, pertanto, la classificazione finalizzata all'estrazione di mappe di uso del suolo o di mappe tematiche della vegetazione risulta insufficiente.

In particolare un test effettuato con il plugin *Semi-Automatic Classification* di QGIS ha messo in evidenza queste

problematiche (Fig.16): nonostante l'elevata risoluzione dell'ortofoto RGB dell'area di studio a disposizione, in diversi settori l'algoritmo si è rilevato impreciso, ingannato ad esempio dalle zone ad elevata ombreggiatura presenti nell'immagine o da tipologie di oggetti o usi misti difficilmente riconoscibili e quindi classificabili.

Classificazioni specifiche, come il riconoscimento semiautomatico tipologico della vegetazione, risultano quindi affette da errori troppo marcati (l'informazione di colore che tra i diversi pixel risulta troppo simile) per considerarle scientificamente valide.



Figura 16. Prova di classificazione semi-automatica con metodologia *pixel based*.

Il secondo metodo, *l'object oriented*, consente di superare gran parte di queste criticità perché fondato non più sull'informazione del singolo pixel, ma su quella relativa a insiemi di pixel (gli *objects* appunto) raggruppati tra loro in funzione di analogie radiometriche, ma anche geometriche (forma e tessitura) e relazionali (valutazione del contesto e dell'intorno). La fase di formazione degli *objects* viene denominata segmentazione e deve essere calibrata correttamente (parametri come il fattore di scala) al fine di generare poligoni della grandezza adatta a rappresentare i cambiamenti di eterogeneità.

Al termine del processo sarà opportuno valutare e quantificare gli errori di classificazione confrontando i risultati con la realtà a terra. Per quanto raffinata, la classificazione semi-automatica di immagini ad alta risoluzione tramite metodologia *object-based* difficilmente potrà mai raggiungere precisioni e attendibilità paragonabili a un conteggio manuale o a un censimento in situ. Nonostante questo rimane una procedura conveniente ragionando in termini di costi-benefici, in quanto permette un risparmio considerevole di tempo e personale. Il risultato finale sarà di tipo vettoriale, quindi "più vicino alle aspettative degli utenti finali e ai canoni standard tradizionali della cartografia tematica" (Chirici et.al., 2003, p.730).

6. ANALISI DEI COSTI E CONSIDERAZIONI FINALI

La tabella seguente fa un riepilogo del numero di ore che sono state necessarie per ogni singola operazione di rilievo effettuata nel caso descritto: nella stessa giornata, per un totale di circa 5 ore complessive, è stato possibile pianificare la missione, effettuare le riprese e completare l'appoggio topografico; le fasi successive, per un totale stimato di 40 ore, sono state dedicate alla formazione del modello, all'editing ed all'esportazione dei dati e alla loro gestione in un Sistema Informativo Territoriale.

La risoluzione delle ortofoto (1.9 cm), del DSM e del DEM (7.6 cm) ha permesso di definire rapidamente gli interventi di

riqualificazione a piccola scala delle aree esterne del lotto, che hanno interessato la viabilità carrabile e pedonale con la realizzazione di nuovi percorsi.

Le 10 ore complessive dedicate in questa ultima fase rappresentano un monte ore straordinariamente basso. Si vuole evidenziare come il tempo di generazione del modello tridimensionale, per certi versi elevato (e dipendente dalle caratteristiche prestazionali del sistema di elaborazione delle immagini), viene per le suddette ragioni recuperato abbondantemente nelle successive fasi di gestione dei dati (Tab.2).

Tabella 2. Analisi dei costi complessivi di rilievo e progetto.

Operazione	Strumentazione	Ore Tot.	Costo h	Tot.
Pianificaz. missione	PC + Software Mission Planner	1	60 €	60 €
Riprese fotogramm.	Notebook + UAV	2	60 €	120 €
Inquadram. topografico	Ricevitore GNSS	2	60 €	120 €
Formazione modello 3D	PC + Software Fotogrammetria (es. Photoscan)	20	60 €	1200 €
Formazione ortofoto, DSM, DTM	PC + Software Fotogrammetria (es. Photoscan)	5	60 €	300 €
Gestione dei dati	PC + Software GIS e CAD	15	60 €	900 €
Progettaz. interventi di riqualificaz. proposti	PC + Software	10	60 €	600 €
	TOT	55		3300 €

Considerando l'estensione dell'area in oggetto, di circa 10 ha, otteniamo un valore di 330 € / ha, un importo che per un rilievo e un progetto di questa qualità risulta davvero modesta.

Per queste considerazioni la fotogrammetria da UAV, se condotta secondo procedure rigorose, può essere considerata una procedura *low cost* (Yeh et. Al., 2016) e conveniente per estensioni territoriali che non superino poche decine di ettari. L'impossibilità di eseguire voli di lunga durata, assieme alle forti limitazioni sul sorvolo di centri abitati, rendono queste metodologie adattabili in territori poco urbanizzati e quindi per analisi orientate al settore naturalistico (anche agricolo) e geomorfologico.

Risulta complicato definire standard validi su cui fondare analisi esaustive dei costi, in quanto i rilievi aerofotogrammetrici da drone sono operazioni ad hoc, altamente specializzate e influenzabili da molteplici variabili. Ciò nonostante è un dato di fatto che, in generale, il tariffario di un rilievo sia determinato da fattori dimensionali e prestazionali: l'estensione del terreno da ricoprire incide infatti sul tempo e sul numero di addetti che andranno impiegati per le operazioni di rilievo sul campo, mentre il grado di precisione e la quantità di informazioni da ottenere influisce sul livello tecnologico della strumentazione da utilizzare.

Paolo Girardi, CEO presso 3D TARGET S.r.l., in una sua presentazione alla fiera DronItaly 2014 ha provato a riassumere sia quelli che sono i costi necessari complessivi per tipologia di rilievo (Tab.3), sia i costi medi per noleggio (Tab.4) acquisto di droni (Tab.5) equipaggiati con apparecchiature specialistiche (camere digitali performanti, termo camere, sensori multispettrali ecc.).

Tabella 3. Comparazione dei costi per tipologia di rilievo.

Tipologia di rilievo	€ / gg
Rilievi fotografici	200-300
Rilievi geometrici scarsa precisione	1.500-2.000
Rilievi geometrici alta precisione	2.000-2.500
Rilievi termografici	2.000-2.500
Rilievi avanzati	VARIABILE (> 3.000)

Tabella 4. Comparazione dei costi di noleggio per tipologia di drone.

Tipologia di drone	€ / gg
Drone per rilievi fotografici	da 100
Drone per rilievi geometrici bassa precisione	da 1.000
Drone per rilievi geometrici alta precisione	da 2.000
Droni per Rilievi termografici	da 2.000
Droni per Rilievi avanzati	da 3.000

Tabella 5. Comparazione dei costi di acquisto per tipologia di drone.

Tipologia di drone	Migliaia di €
Drone per rilievi fotografici	da 2.500
Drone per rilievi geometrici bassa precisione	da 14.000
Drone per rilievi geometrici alta precisione	da 30.000
Droni per Rilievi termografici	da 30.000
Droni per Rilievi avanzati	da 30.000 a 90.000

Il livello di accuratezza geometrico raggiungibile con queste procedure è risultato essere assai elevato, pertanto la fotogrammetria da UAV, in riferimento all'esperienza descritta, può essere considerata sostitutiva di tecniche di rilievo più complesse come procedure e costo strumentale.

Particolarmente in ambito urbano le potenzialità sono elevate in quanto la metodologia di lavoro permette lo studio di volumetrie del costruito, sezioni altimetriche, studi vegetazionali, analisi di ombreggiamento e visibilità ecc.

La possibilità di utilizzo dei modelli tridimensionali per le fasi progettuali sull'esistente, e quindi per scopi diversi dalla documentazione e rappresentazione tridimensionale, apre un'importante fase operativa ed offre prestazioni elevate ai progettisti più aggiornati. Nel prossimo futuro assisteremo ad un approccio multidisciplinare basato sull'ibridazione di più tecniche.

BIBLIOGRAFIA

Riferimenti da giornali o atti di convegno

Carnevali, L., Ippoliti, E., Lanfranchi, F., Menconero, S., Russo, M., Russo, V. (2018). *CLOSE- RANGE MINI- UAVS PHOTOGRAMMETRY FOR ARCHITECTURE SURVEY*. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 422, 217-224.

Chirici G., Corona P., Travaglini D., Filiberti F., (2003). *Segmentazione multirisoluzione e classificazione object oriented di immagini telerilevate*. In Atti della 7 Conferenza ASITA "L'informazione territoriale e la dimensione tempo" (Vol. 1, pp. 729-734), Verona.

Matta M., Cogoni A., Gessa A., (2009). *Il database multiprecisione della Regione Sardegna*". In Atti 13 Conferenza Nazionale Asita, 1-4 dicembre 2009, Bari (pp. 1405-1409).

Yeh M. L., Chou Y. T., Yang L. S. (2016). *The Evaluation of GPS techniques for UAV-based Photogrammetry in Urban Area*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 41.

Altri riferimenti stampati

Brown D.C., (1971). *Close-range camera calibration*. Photogramm. Eng, 37(8), 855-866, Melbourne.

ENAC Ente Nazionale per l'Aviazione Civile, (2015). *Regolamento Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto*. Edizione 2 del 16 luglio 2015 Emendamento 3 del 24 marzo 2017

Eisenbeiß H. (2009). *UAV photogrammetry*. A dissertation submitted to ETH ZURICH

Kraus, K., (2007). *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans*, 2nd ed. Berlin, Germany: Walter de Gruyter.

Liscia N., (2017). *Fotogrammetria e UAV. Ambiti generali di applicazione e analisi dettagliata di un rilievo con modellazione 3d in ambito*. Tesi di Laurea Magistrale in

Pianificazione e Politiche per la Città, l'Ambiente e il Paesaggio, Università di Sassari, Dipartimento di Architettura, Design e Urbanistica, Alghero.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J., (2014). *CloseRange photogrammetry and 3D imaging*, 2nd ed., 684. Berlin, Germany: De Gruyter.

Parlamento europeo, (2007). *Direttiva 2007/2/CE del 14 marzo 2007 che istituisce un'Infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità europea (Inspire)*. Pubblicato nella Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 108/1

Riferimenti da siti web

AGID - Agenzia per l'Italia Digitale, (2017). *Linee Guida Presidenza del Consiglio dei Ministri*. <http://www.agid.gov.it/documentazione/linee-guida>

Cinque F., (2016). *Come correggere le distorsioni dell'obbiettivo*. Milano <https://www.cinquephoto.com/come-correggere-le-distorsioni-dellobiettivo/>

IPTsat srl. CartografiaSAPR, (2017). *La banca dati completa e aggiornata relativa alle "no fly zones"*. <http://cartografiasapr.it/>

Planetek Italia S.r.l., (2013). *LPS Leica Photogrammetry Suite Digital Camera Tour Guidato*. http://www.planetek.it/system/tdf/download_media/LPS_Digital_Camera_Tour_Guide.pdf?file=1&type=field_collection_item&id=113&force=

Rossi M., (2009). *Gli anaglifi digitali RGB*. <http://www.programmazione.it/print.php?idItem=42868>

RINGRAZIAMENTI

Il presente articolo scientifico rappresenta un estratto della mia tesi Magistrale, dal titolo "*Fotogrammetria e UAV. Ambiti generali di applicazione e analisi dettagliata di un rilievo con modellazione 3d in ambito*" (Liscia, 2017). Anche in questo frangente desidero ringraziare il mio relatore di tesi nonché mentore, Prof. Maurizio Minchilli per la grande disponibilità e professionalità dimostratami nel corso di questi anni.