



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Dottorato di ricerca in Ingegneria Civile Ambientale e Dei materiali  
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali  
Settore Scientifico Disciplinare ICAR/06 (Topografia e Cartografia)

## **I SISTEMI AEROMOBILI A PILOTAGGIO REMOTO PER LA FOTOGRAMMETRIA AEREA DI PROSSIMITÀ: VALIDAZIONI METRICHE E ANALISI DELLE PROCEDURE**

IL DOTTORE

**Alessandra Garraffa**

IL COORDINATORE

**Prof. Mario Di Paola**

IL TUTOR

**Prof. Mario Di Paola**

CO TUTOR

**Prof. Mauro Lo Brutto**

CICLO XXIX  
ANNO CONSEGUIMENTO TITOLO 2017



## **Ringraziamenti**

*Giunta al termine di questa esperienza, desidero ringraziare chi, in maniera più o meno diretta e più o meno consapevole, ha contribuito alla realizzazione di questo lavoro.*

*Innanzitutto i miei ringraziamenti sono rivolti al Dott. Mauro Lo Brutto per avermi offerto l'opportunità di entrare a far parte di un gruppo di lavoro attivo simpatico e dinamico, permettendomi di lavorare ad un argomento decisamente stimolante, in un ambiente sereno e accogliente, per essersi sempre dimostrato disponibile a offrirmi il proprio preziosissimo contributo teorico e metodologico durante tutte le fasi del mio lavoro di ricerca ed avermi seguito costantemente nella realizzazione della tesi di dottorato.*

*Un ringraziamento particolare va a mio marito Giuseppe per essermi stato sempre vicino, per avermi sopportato e amato nei momenti di insicurezza, perché solo chi ti ama è disposto ad affrontare i sacrifici necessari alla conclusione del Dottorato, e per il supporto tecnico nelle riparazioni della strumentazione sperimentale utilizzata durante il lavoro di tesi.*

*Come posso non ricordare la mia famiglia che mi ha sempre sostenuto e grazie alla quale ho potuto compiere i miei studi in maniera serena. Da loro ho ricevuto l'educazione, l'esempio e l'affetto tanto grande quanto ogni figlio potrebbe desiderare.*

*Infine, desidero ringraziare la "famiglia Geomatica" con cui ho condiviso, impegni, preoccupazioni e frustrazioni, oltre a idee e soddisfazioni, e sulla quale ho sempre potuto contare nei momenti di gioia o di sconforto del percorso di Dottorato. In particolar modo Rosanna, Maria Grazia e Claudia, per i momenti passati insieme in questi anni, per il supporto tecnico e morale e per aver sempre creduto nelle mie capacità.*



# Indice

<b>CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 2 – STATO DELL’ARTE .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPITOLO 3 – I SISTEMI AEREOMOBILI A PILOTAGGIO REMOTO .....</b>	<b>15</b>
3.1 Classificazione dei SAPR .....	18
3.2 Classificazione dei SAPR in funzione della tecnologia propulsiva .....	20
3.3 Componenti principali dei SAPR multirotori .....	23
3.3.1 Meccanica di volo.....	32
3.3.2 Configurazioni esistenti.....	33
3.4 Caratteristiche principali dei SAPR con struttura planare .....	38
3.5 Payload e funzionalità .....	41
3.5.1 Camere fotografiche e videocamere .....	42
3.5.2 Camere multispettrali .....	46
3.5.3 Camere termiche.....	47
3.5.4 Sensori LIDAR.....	49
3.6 SAPR dotati di GNSS con correzione RTK.....	50
<b>CAPITOLO 4- LA NORMATIVA.....</b>	<b>53</b>
4.1 Definizione di aeromobile.....	54
4.2 Normativa Italiana.....	56
4.3 Normativa Europea .....	66
4.4 La normativa degli Stati Uniti.....	76
<b>Capitolo 5: L’USO DEL SAPR NELL’AMBITO DEL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO DI PROSSIMITÀ .....</b>	<b>79</b>
5.1 Evoluzione della tecnica fotogrammetrica.....	81
5.2 Fotogrammetria: definizione e relazioni geometriche di base .....	82
5.3 L’equazione di collinearità.....	86
5.4 La distorsione ottica .....	89
5.5 La calibrazione della camera.....	93
5.6 Le immagini digitali a scopo fotogrammetrico .....	97
5.7 I sensori nelle camere digitali .....	102
5.9 Problematiche relative all’uso dei SAPR in ambito fotogrammetrico.....	108
5.10 Fasi operative del rilievo fotogrammetrico aereo da SAPR.....	111
5.11 Tecniche automatiche per le applicazioni fotogrammetriche .....	115

5.11.1 Structure from Motion .....	117
5.11.2 Bundle adjustment .....	127
5.11.3 Dense Image Matching .....	128
5.12 Agisoft PhotoScan .....	132
5.13 Pix4D .....	136
<b>PARTE SPERIMENTALE .....</b>	<b>143</b>
<b>Capitolo 6. <i>Caso studio 1: il Foro Romano dell'area archeologica di Saepinum</i> .....</b>	<b>145</b>
6.1 Il rilievo del sito .....	147
6.2 Elaborazione dei dataset .....	150
6.3 Valutazioni metriche .....	153
6.4 Confronto con il modello 3D di riferimento .....	157
<b>Capitolo 7. <i>Caso studio 2: Villa Lampedusa ai Colli</i> .....</b>	<b>161</b>
7.1 Il rilievo del sito .....	162
7.2 Elaborazione dei dataset .....	169
7.3 Valutazione metrica .....	171
7.4 Calcolo dei modelli digitali tridimensionali e valutazioni metriche .....	172
7.5 Generazione dell'ortofoto .....	178
<b>Capitolo 8. <i>Caso studio 3: l'abitato del sito archeologico di Eraclea Minoa</i> .....</b>	<b>181</b>
8.1 Rilievo del sito .....	183
8.2 Elaborazione dei dataset .....	195
8.3 Valutazione dei risultati .....	198
<b>Capitolo 9. Conclusioni .....</b>	<b>213</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>217</b>

## CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

Il progresso della microtecnologia, che recentemente ha raggiunto livelli straordinariamente elevati, ha contribuito in maniera decisiva allo sviluppo di una nuova classe di velivoli, alimentati elettricamente e controllati da terra, definiti dall'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile) Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR) e comunemente noti con il termine "drone". Questa nuova classe di aeromobili è caratterizzata dal fatto di essere pilotata in remoto da un operatore a terra e di consentire l'esecuzione di voli in modalità automatica tramite piani di volo pre-definiti. Inoltre, i SAPR offrono la possibilità di eseguire voli a quote medio-basse, difficilmente realizzabili con altri sistemi di volo, permettendo di osservare il territorio da punti preferenziali e di vedere dettagli prima difficilmente individuabili dall'alto.

Se nel campo militare l'impiego di questi sistemi risale a diversi anni fa, solo attorno agli anni duemila, l'enorme sviluppo tecnologico nell'ambito della sensoristica per la navigazione ha permesso la diffusione e l'utilizzo di queste tecnologie anche per scopi civili. I SAPR sviluppati per applicazioni in ambito civile sono in genere integrati con differenti sensori come camere digitali (compatte o professionali), camere termiche, camere multispettrali, sistemi LIDAR e strumentazioni per il monitoraggio ambientale (es. per la qualità dell'aria) che consentono innumerevoli applicazioni.

La semplicità di utilizzo, grazie anche alla possibilità di programmare i voli, la rapidità nell'esecuzione dei rilievi, l'opportunità di realizzare voli a quote variabili e di acquisire informazioni da punti di vista difficilmente raggiungibili con le tradizionali metodologie di

rilievo sono solo alcuni dei vantaggi che determinano il diffuso impiego dei SAPR e il loro enorme successo in molti settori. Inoltre, la possibilità di assemblare in proprio il velivolo (esistono moltissimi SAPR “fatti in casa” o comunque sviluppati da piccole aziende “artigianali”) o di acquistare sistemi low-cost utilizzabili anche per applicazioni professionali rappresenta un ulteriore aspetto che ne facilita e incrementa la loro diffusione.

Poiché i Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto sono veri e propri velivoli che occupano lo spazio aereo e in quanto tale possono costituire un rischio sia per il traffico aereo sia per la sicurezza delle persone, a livello nazionale l’Ente Nazionale per l’Aviazione Civile (ENAC), ha redatto un regolamento (Prima edizione 30 Aprile 2014, Seconda edizione 16 Luglio 2015 ed Seconda edizione emendata 21 Dicembre 2015) che disciplina l’uso dei SAPR al fine di garantire le norme di sicurezza. In particolare, il regolamento nazionale, in linea con i regolamenti europei (Regolamento EASA – European Aviation Safety Agency), definisce i livelli di sicurezza da assicurare per le diverse tipologie di operazioni che possono essere condotte con l’utilizzo dei SAPR, le disposizioni normative per il pilotaggio dei SAPR (regole di circolazione) e le limitazioni da rispettare per l’utilizzo di questi velivoli nello spazio aereo nazionale.

L’impiego dei SAPR in ambito civile spazia dal campo della sicurezza territoriale allo studio dei Beni Culturali, dal monitoraggio di impianti industriali al telerilevamento di prossimità, dalla fotogrammetria aerea al monitoraggio ambientale e delle calamità naturali, dalle operazioni di ricerca e soccorso alle videoriprese.

L’impiego dei SAPR nel campo della fotogrammetria aerea è diventata una pratica sempre più comune per il rilievo del territorio grazie al fatto che richiede costi ridotti e spesso risulta operativamente più semplice rispetto ad altri metodi di rilievo. In particolare, tale approccio viene comunemente definito come “fotogrammetria aerea di prossimità” proprio per evidenziarne le peculiarità rispetto alla classica fotogrammetria aerea. La possibilità di eseguire riprese da quote di volo medio-basse e di coprire zone di media e piccola estensione (fino a qualche km<sup>2</sup>) ha consentito con questi sistemi di colmare il gap tra i classici voli fotogrammetrici aerei e i rilievi di fotogrammetria terrestre. I SAPR si sono dimostrati un valido strumento di indagine anche grazie al fatto che, nelle applicazioni tecniche legate alla fotogrammetria aerea, hanno dimostrato una notevole operatività superando i limiti legati alle caratteristiche geometriche dell’oggetto o dell’area da rilevare. In particolare, la fotogrammetrica aerea di prossimità risulta largamente utilizzata in



numerose applicazioni, che prevedono l'esecuzione di rilievi anche su oggetti molto differenti per tipologia e/o dimensioni (come per esempio edifici storici, siti archeologici, cave, coste, dighe, campi coltivati, ecc.).

Nell'ambito della fotogrammetria aerea, i settori che più degli altri contano un elevato numero di applicazioni tramite SAPR sono quelli del rilievo di Beni Culturali e quelli dell'ambito cartografico. Nel primo caso le acquisizioni sono indirizzate soprattutto alla produzione di modelli digitali 3D finalizzati all'impiego per le attività di restauro, conservazione e fruizione del bene; nel secondo caso, invece, i prodotti finali, ortofoto e DSM, rappresentano uno strumento di immediata rappresentazione cartografica e forniscono dati in diversi campi come la pianificazione territoriale, gli studi di impatto ambientale, il rischio idrogeologico, l'abusivismo, il monitoraggio, ecc..

Dal punto di vista operativo, la realizzazione di un rilievo fotogrammetrico aereo di prossimità mediante SAPR prevede una fase di pianificazione ed esecuzione dei voli, una fase di elaborazione dei dataset acquisiti e una fase di produzione degli elaborati. La fase di pianificazione del volo richiede l'analisi di tutta una serie di variabili che influiscono sulla fattibilità, tempistica, costi delle operazioni di rilievo e sulle caratteristiche del prodotto finale. Durante la fase di pianificazione dei voli alcuni parametri fondamentali come la quota di volo, la velocità di spostamento del mezzo, i ricoprimenti longitudinali e trasversali tra le immagini, la modalità di esecuzione della ripresa e le caratteristiche dei sensori utilizzati influenzano in maniera determinante l'esecuzione del lavoro. La fase di elaborazione dei dataset è influenzata particolarmente dai software e dal tipo di algoritmo che questi adoperano per le procedure di orientamento e di calibrazione delle camere, dal numero, dalla disposizione e dalla accuratezza punti di appoggio utilizzati. Infine, la produzione degli elaborati è influenzata da parametri fotogrammetrici (quota di volo, ricoprimenti, distribuzione dei punti appoggio, ecc.) ma anche da problematiche strettamente operative e dalle caratteristiche del sito che possono influenzare l'accuratezza del prodotto dal punto di vista metrico e il livello di dettaglio ottenibile.

Il lavoro condotto ha affrontato le problematiche connesse con le fasi di acquisizione e elaborazione dei dati ottenuti da SAPR con la finalità di dimostrare il grande potenziale di questi sistemi per la fotogrammetria aerea di prossimità. Il lavoro ha previsto lo studio delle principali problematiche attraverso prove sperimentali condotte su tre diversi casi studio, differenti per dimensioni e tipologia: il Foro Romano del sito archeologico di

Sepino (Campobasso), Villa Lampedusa ai Colli (Palermo) e il sito archeologico di Eraclea Minoa (Agrigento).

In particolare, sono stati realizzati una serie di test con lo scopo di definire procedure di rilievo fotogrammetrico da SAPR più produttive, in termini di ottimizzazione dei tempi e affidabilità metrica del rilievo, e per affrontare le problematiche connesse all'impiego di software fotogrammetrici/computer vision per l'orientamento delle immagini. Inoltre, sono state anche effettuate alcune verifiche sull'affidabilità metrica di alcuni modelli 3D ottenuti durante i vari test.

I test sul Foro Romano del sito archeologico di Sepino rappresenta il primo caso studio presentato, relativo ad un dataset di ridotte dimensioni utilizzato per le prime verifiche. La sperimentazione ha permesso di valutare la disposizione e il numero dei punti di appoggio da utilizzare nella fase di orientamento. Inoltre, è stato analizzato in che modo l'accuratezza assegnata ai punti di appoggio condizioni i risultati degli orientamenti con software di tipo fotogrammetrico/computer vision.

Il dataset di Villa Lampedusa ai Colli ha permesso di analizzare le problematiche relative alla progettazione ed esecuzione di voli, nel caso di rilievi finalizzati alla modellazione tridimensionale di oggetti architettonici, e all'approccio da seguire per la calibrazione con software di tipo fotogrammetrico/computer vision.

Infine, i dati acquisiti per il dataset del sito archeologico di Eraclea Minoa hanno permesso di analizzare in dettaglio le procedure di pianificazione ed esecuzione di voli, per rilievi finalizzati alla produzione di ortofoto, e le procedure di orientamento in relazione anche alle metodologie di rilievo dei punti di appoggio. In particolare, la fase di pianificazione del volo è stata studiata eseguendo diverse prove e valutando l'influenza che i vari parametri di volo (come la quota di volo e modalità di acquisizione delle immagini) hanno sulla qualità del dato acquisito e sulle accuratezze degli orientamenti.

Tutti i dataset sono stati acquisiti con multirotori (quadricotteri ed esacotteri) con caratteristiche e camere differenti. Le fasi di elaborazione sono state condotte utilizzando, in quasi tutti i casi, due differenti software commerciali (PhotoScan Professional Edition versione 1.1.6.2038 prodotto dalla Agisoft e Pix4D mapper pro versione 2.0.83.) che si basano su un approccio fotogrammetrico/computer vision,

Per i dataset del Foro Romano e di Villa Lampedusa è stata condotta anche una analisi degli elaborati finali confrontando i modelli 3D fotogrammetrici ottenuti a partire da immagini acquisite da SAPR con i modelli ottenuti da rilievo laser scanner.



## CAPITOLO 2 – STATO DELL'ARTE

Nell'ambito della fotogrammetria aerea, i primi esperimenti realizzati utilizzando un velivolo pilotato da remoto tramite collegamento radio risalgono a circa trentacinque anni fa. Nel 1979, Przybilla e Wester - Ebbinghaus utilizzano un aeroplano, lungo 3 m e con un'apertura alare di 2,6 m, per acquisire le immagini necessarie alla ricostruzione tridimensionale di un'area archeologica. A causa della grande dimensione, l'impiego del velivolo era limitato dalla necessità di una pista in cui poter effettuare le manovre di decollo ed atterraggio; inoltre, a causa delle eccessive vibrazioni del mezzo, causate dalla presenza del motore a scoppio, e dell'elevata velocità, le immagini acquisite non sempre risultavano soddisfacenti per le operazioni di restituzione fotogrammetrica. Per tali motivi, gli autori proposero, successivamente, l'impiego di mezzi meno sensibili alle vibrazioni dei motori come per esempio gli elicotteri (Przybilla e Wester - Ebbinghaus, 1979). E infatti, sulla base dell'esperienza dell'anno precedente, Wester – Ebbinghaus nel 1980, per la prima volta, utilizzano un elicottero pilotato in remoto e rivestito di polistirolo per limitare le vibrazioni causate dal motore, per il rilievo di una monorotaia in acciaio, il *Schwebebahn Wuppertal*, risalente al 1890 (Wester - Ebbinghaus, 1980).

Venti anni più tardi, nel 2000, per risolvere le problematiche relative all'acquisizione dei tetti degli edifici, fino ad allora realizzata attraverso l'uso di gru o martinetti idraulici, molto costosi e poco sicuri, Zischinsky (2000), per la prima volta, propone l'impiego di un piccolo elicottero dotato di camera fotografica e radio-comandato da terra. Il nuovo velivolo è realizzato con un materiale leggero ma altamente resistente ed è dotato di un

motore a due tempi a benzina che assicura un'autonomia di circa venti minuti. Inoltre, il velivolo, di dimensioni nettamente inferiori (lungo 130 cm e alto 80 cm) rispetto ai classici elicotteri, necessita solo di pochi metri quadrati per effettuare le manovre di decollo ed atterraggio ed è in grado di sorvolare le aeree a quote comprese tra i 20 e i 150 m. L'uso dell'elicottero radio-comandata ha permesso a Zischinsky di acquisire le immagini necessarie per la produzione del modello tridimensionale di un vecchio mulino realizzando 82 immagini terrestri e 38 immagini aeree (Zischinsky, 2000).

Nello stesso anno, un elicottero radio-comandato simile al precedente, equipaggiato sia con camera metrica (Hassel Blad MKW/E) che con camera non-metrica (Canon D30 con un obiettivo di 15mm), è impiegato in Cina, per conto dell'istituto di archeologia giapponese Miyatsuka, per il rilievo di una Fortezza Cinese, che si estende su una superficie di circa 3 Km<sup>2</sup>. Le immagini acquisite sono utilizzate per ottenere un modello dell'enorme fortezza con un elevato livello di risoluzione (Yasuda and Miyatsuka, 2001).

Fino al 2004, nonostante le dimensioni degli aeromobili a pilotaggio remoto diventavano sempre più piccole, (questo migliorava notevolmente la loro manovrabilità), e nonostante la possibilità di integrare camere che potevano ruotare lungo l'asse verticale e lungo l'asse orizzontale, a causa della difficoltà di posizionamento in punto preciso e a causa delle vibrazioni dovute alla presenza di motori a scoppio, questi velivoli non potevano essere utilizzati in maniera estesa per l'impiego in campo fotogrammetrico (Eisenbeiss, 2004).

Le difficoltà nell'utilizzo di questi mezzi sono evidenziate anche dalla scarsa presentazione di articoli al congresso tenutosi a Istanbul e organizzato dall'International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) nel 2004. In questa occasione, solo tre articoli sono stati presentanti relativamente al tema dei sistemi aerei a pilotaggio remoto e nessuna sessione specifica è stata prevista su questo argomento (Colomina e Molina, 2014).

Con l'evolversi delle tecnologie, la crescita esponenziale della microelettronica e la relativa diminuzione dei costi dei componenti elettronici, tra il 2004 e il 2008, anno in cui si registrano le prime applicazioni moderne nel campo delle fotogrammetria, i SAPR vengono sempre più utilizzati in diversi ambiti.

In questo arco temporale, infatti, i SAPR sono ampiamente impiegati nel mondo in attività che vanno dalla ricerca marittima e il soccorso, alla studio delle foreste e del suolo, ecc. Inoltre, la possibilità di utilizzare velivoli multi-rotore pilotati da remoto, tramite segnale radio, ha suscitato l'interesse di molti come Eisenbeiss (2007), Zhang (2006) e Sauerbier et al. (2006) che, in questi anni, dedicano le loro ricerche alla possibilità di utilizzare un SAPR per acquisire immagini in maniera autonoma, utilizzando anche camere a basso costo.

Ancora legati ad un'idea di SAPR differente da quella attuale, Horcher e Visser nel 2004, per conto dell'USDA Forest Service, San Dimas Technology and Development Center, propongono l'impiego di un SAPR per mappare e monitorare un sito vicino al Volcano National Park. Il velivolo ad ala fissa impiegato è dotato di un motore a due tempi da 23cc che gli assicura un'autonomia di circa sei ore e presenta un peso di circa 7 Kg. I test, il cui obiettivo è quello di fornire immagini ad alta risoluzione per il monitoraggio delle specie invasive, dimostrano la possibilità di ottenere della mappe con un errore di 8 cm a partire da immagini acquisite da SAPR. Gli stessi autori però evidenziano come lo sviluppo di questa tecnologia potrebbe influire positivamente sulle accuratezze dei prodotti finali (Horcher e Visser, 2004).

Passi in avanti nel campo dei SAPR si registrano con il velivolo utilizzato da Eisenbeiss, nel 2005, per il rilievo del sito archeologico di Pinchango Alto, in Perù. Grazie ai recenti progressi tecnologici che permettono di integrare sul velivolo sistemi di navigazione a basso costo, rispetto ai modelli utilizzati precedentemente il mini elicottero utilizzato da Eisenbeiss possiede un sistema di controllo costituito da un GNSS/INS, un altimetro e uno stabilizzatore che gli consentono di volare in maniera completamente automatica seguendo un piano di volo prestabilito. Inoltre, il SAPR è dotato anche di una stazione a terra che ne permette di monitorare istante per istante il volo. I test compiuti in questo campo permettono anche di valutare, in funzione dell'oggetto rilevato (terreno, vegetazione, aree urbane), l'autonomia di volo e l'influenza delle condizioni meteorologiche (presenza di vento) sulle acquisizioni (Eisenbeiss et al., 2007, Zhang, 2006, Sauerbier et al., 2006).

Nel 2008 è possibile riscontrare un notevole cambio di tendenza evidenziato dal fatto che al congresso tenutosi a Beijing, organizzato dall'ISPRS, sono presenti tre sessioni interamente dedicate all'uso dei SAPR per scopi fotogrammetrici e di Remote Sensing.

Complessivamente 21 interventi vengono presentati nelle tre differenti sessioni (Colomina e Molina, 2014).

Le prime applicazioni moderne nel campo delle fotogrammetria aerea si devono ai lavori di Eisenbeiss (2008) il quale, utilizzando un elicottero elettrico pilotato in remoto, compie diversi test per validare l'uso di un SAPR per l'acquisizione di immagini aeree e per confrontare i prodotti elaborati a partire da dati LIDAR con i prodotti elaborati a partire da dataset acquisiti da SAPR. I velivoli utilizzati da Eisenbeiss, rispetto a quelli utilizzati in precedenza sono mezzi di concezione più moderna perché dotati di una serie di sensori che permettono al pilota di conoscere in tempo reale la velocità, la posizione (GNSS/IMU), la quota, la distanza e l'autonomia residua. Ulteriori sensori informano il pilota sulla corretta connessione tra velivolo e stazione a terra che, se persa o debole, impongono al mezzo l'esecuzione di manovre di sicurezza per tornare autonomamente sul punto da cui ha effettuato il decollo. I velivoli utilizzati sono inoltre dotati di due monitor a terra che permettono di visualizzare in tempo reale le immagini e i video a colori e le immagini ad infrarossi acquisite. La validità dei SAPR nel campo aerofotogrammetrico è dimostrata nei test realizzati in Svizzera, per il rilievo di una frana e per il rilievo di un campo di mais, e nei Paesi Bassi, per il rilievo di un'autostrada e per il rilievo della fortezza di Geofort (Eisenbeiss et al., 2008).

Eisenbeiss (2008) dimostra inoltre la validità dell'uso di un SAPR per l'acquisizione di immagini aeree, anche per il rilievo delle fratture superficiali causate dalla frana di Randa del 1991 in cui, a causa delle dimensioni, della pendenza e della pericolosità del sito, le fratture sono state mappate attraverso lo studio di un modello digitale della superficie. Il calcolo del modello è realizzato a partire dalle fotografie digitali acquisite con l'ausilio di un SAPR. Il modello così ottenuto mostra una risoluzione 50 volte maggiore rispetto a quella ricavata dal dataset LIDAR esistente per il sito (Eisenbeiss, 2008).

Nello stesso anno, grazie alla combinazione di immagini aeree, acquisite da un elicottero elettrico pilotato da remoto, e immagini terrestri, Pueschel et al. (2008) producono il modello tridimensionale del Castello medievale di Landenberg in Sarnen. Grazie al fatto che i SAPR sono in grado di sorvolare un'area a quote inferiori rispetto ad un classico elicottero o ad un classico aereo, Pueschel et al. ottennero un modello con un livello di risoluzione maggiore rispetto ai modelli ottenuti da Zischinsky qualche anno prima.



Come per i modelli attuali di SAPR, anche i velivoli utilizzati da Eisenbeiss, nel 2008, supportano differenti modalità di volo come la modalità manuale e la modalità automatica. Inoltre, poiché è possibile acquisire le immagini con tre differenti metodi, modalità manuale, modalità con scatto su singoli waypoint e modalità di acquisizione con scatti continui ad intervallo di tempo, con ulteriori test, lo stesso Eisenbeiss (2008), dimostra come l'impiego della modalità di acquisizione con scatto ad intervallo di tempo consente di ridurre la durata del volo addirittura del 75% anche se, allo stesso tempo, aumenta il numero delle acquisizioni che possono risultare sovrabbondanti (Eisenbeiss 2008); inoltre, verifica che l'esecuzione di un volo in modalità autonoma consente di acquisire dataset più precisi e affidabili rispetto ai dispositivi SAPR pilotati manualmente.

Dal 2008 fino ad oggi, i notevoli progressi nel campo dei sistemi aerei a pilotaggio remoto hanno ulteriormente spinto l'interesse verso l'utilizzo di questa tipologia di velivoli negli ambiti più svariati.

In Antartide, Lucieer et al (2010), impiegano le potenzialità dei SAPR per acquisire immagini aeree necessarie per mappare un letto di muschio, operazione particolarmente difficoltosa a causa dei vincoli logistici presenti sul territorio.

In questi anni, riprendendo anche gli studi eseguiti precedentemente da Paparoditis et al., (2006), Markelin et al. (2010) studiano gli aspetti relativi alla risoluzione spaziale e ai parametri di volo come la velocità, la quota, la modalità di acquisizione, i ricoprimenti e in generale i processi fotogrammetrici di immagini acquisite in remoto da sensori con caratteristiche metriche (Markelin et al., 2010).

Gini et al. (2012) utilizzano immagini aeree acquisite con velivoli senza pilota per rilevare un'area individuata nel Parco Adda Nord, che racchiude al suo interno diverse categorie di beni paesaggistici e culturali (di valore architettonico e tecnologico), con lo scopo di valorizzare il patrimonio culturale e paesaggistico presente sul territorio lombardo (Gini e altri, 2012).

I test compiuti fino a questo momento, mostrano come sia importante la modalità di acquisizione delle immagini in funzione della risoluzione spaziale dei prodotti finali. In particolare, Mayr (2011) mostra che un'attenta pianificazione del piano di volo (numero e distribuzione dei waypoint, numero delle strisciate, velocità, quota di volo, ecc.) e la capacità di gestire il volo in tempo reale (intervallo di scatto, direzioni di volo, ecc.) sono

aspetti necessari affinché si possa ottenere un prodotto finale con un elevato livello di qualità e affinché il volo sia realizzato assicurando le opportune condizioni di sicurezza (Mayr, 2011).

Nel 2013, in Tasmania, Australia, i SAPR sono stati utilizzati per mappare la crescita di alberi di eucalipto (Wallace et al., 2013) e nello stesso anno, a Marina di Ravenna (Italia) questi velivoli sono utilizzati nell'ambito del monitoraggio ambientale per il rilievo di ambienti costieri. L'impiego di questa tipologia di velivoli ha permesso di acquisire un dataset di immagini utilizzato per produrre, rapidamente, con ridotti costi e in modo automatico, il modello 3D del sistema di dune della spiaggia (Mancini et al., 2013).

La possibilità di utilizzare veicoli aerei senza equipaggio per l'acquisizione di immagini ad alta risoluzione, finalizzata alla ricostruzione della geometria, è stata impiegata, nel 2014, anche per la costruzione del modello di una discarica situata a Zijin Mine, nella provincia del Fujian, a sud-est della Cina; il prodotto finale ottenuto mostra un errore medio di 0.11m (Wang et al., 2014).

Pena et al. (2015), utilizzando immagini da SAPR per redigere delle mappe per la diagnosi precoce della presenza di piantine infestanti con lo scopo di ottimizzare l'applicazione di erbicidi sulle colture infestanti, dimostrano come la capacità di individuare le piantine infestanti è influenzata dalla tipologia di camera utilizzata per le acquisizioni, dalla quota di volo e dall'intensità di luce (Pena et al., 2015).

Le problematiche relative alla quota di volo sono indagate anche da Javier et al. (2015) i quali utilizzano le immagini acquisite da una camera multispettrale installata su un SAPR per il rilievo di un terreno coltivato finalizzato alla realizzazione di valutazioni sito-specifiche (Javier et al., 2015).

Sulla base dei test condotti, Pena et al. (2015) e Javier et al. (2015) analizzano inoltre l'influenza della quota su numerosi aspetti come la dimensione del pixel sull'immagine, la dimensione della superficie da sorvolare e la durata del volo, e valutano dei criteri per la sua migliore determinazione per ottimizzare il volo, coprendo una maggiore superficie possibile e assicurando, allo stesso tempo, una sufficiente risoluzione spaziale (Pena, 2015, Javier, 2015).

Per dimostrare l'influenza, sui prodotti finali delle problematiche connesse con la distribuzione e con la precisione dei GCP, Javier et al. (2015), indagano sugli aspetti che

influiscono sulle accuratezze degli orientamenti dei dataset. A tale scopo, utilizzano differenti dataset che presentano differenti percentuali di sovrapposizione tra le immagini acquisite al variare del numero e della distribuzione di tali punti di controllo.

Blistal et al. (2016) indagano sulla possibilità di utilizzare un SAPR anche per l'acquisizione di dataset fotogrammetrici finalizzati alla modellazione di strutture geologiche; utilizzando un SAPR multi-rotore e acquisendo le immagini aeree di una cava all'interno di un deposito di perlite in Slovenia; in questo modo dimostrano come è possibile ottenere un modello 3D che, in termini di qualità e dettaglio, soddisfa la precisione richiesta.

Yoo et al. (2016) studiano anche la possibilità di utilizzare i SAPR per lo studio dell'erosione costiera in alternativa ai classici voli LiDAR. In particolare, Yoo et al. (2016), utilizzando un quadricottero, equipaggiato con una fotocamera non-metrica, e acquisiscono immagini aeree della spiaggia di Songjung, a sud-est della penisola Coreana, per realizzare un modello 3D della costa necessario per lo studio delle dinamiche della spiaggia e delle sue proprietà geometriche. Inoltre, la creazione di un modello DSM, con una precisione in quota di 10 cm ha permesso di stimare i volumi di sabbia erosa e di quelli depositati (Yoo et al., 2016).

Alla luce di quanto fino ad ora detto è evidente come dal 2007 ad oggi notevoli progressi sono stati fatti nell'ambito dell'uso dei SAPR per l'acquisizione di immagini aeree. In particolare, attualmente, grazie allo sviluppo da un punto di vista tecnologico che ha determinato una migliore stabilità del SAPR durante le riprese, e, sotto il profilo metodologico, grazie all'ottimizzazione della pianificazione del volo, risulta notevolmente migliorata la qualità e l'efficacia dei risultati in termini di dettaglio e ottimizzati i tempi e conseguentemente i costi delle operazioni di rilievo.



## CAPITOLO 3 – I SISTEMI AEREOMOBILI A PILOTAGGIO REMOTO

Un SAPR è un aeromobile caratterizzato dall'assenza del pilota a bordo ed utilizzato per attività scientifiche, di sperimentazione e di ricerca. In quanto tale, il SAPR è gestito da un pilota a terra che attraverso l'uso di un radiocomando trasmette al velivolo le manovre da eseguire (Figura 1). Inizialmente utilizzati solo in ambito militare, i SAPR negli ultimi anni hanno riscosso un notevole successo anche nel settore civile dove, attualmente, si vanno imponendo come realtà innovativa nel campo dei servizi e in molti settori produttivi.



**Figura 1.** Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto

Il successo di questa nuova tipologia di strumenti è determinata dalla possibilità di svolgere, con costi ridotti e a parità di prestazione, compiti che, fino a poco tempo fa, potevano essere svolti solo con l'impiego di aeromobili tradizionali. Inoltre, lo sviluppo di SAPR sempre più piccoli, versatili, leggeri e maneggevoli tali da poter essere impiegati in innumerevoli scenari operativi e la possibilità di essere equipaggiati con differenti tipologie di sensori, li rendono strumenti efficaci oltre che nell'ambito militare anche in ambito civile.

In campo militare, l'impiego dei SAPR è stato particolarmente utile nella sorveglianza e nella ricognizione di aree vaste e nelle missioni definite DDD (*dull, dangerous and dirty*), ovvero tutte quelle circostanze in cui la presenza a bordo di un pilota non è consigliabile (ad esempio, il sorvolo di aree contaminate da sostanze chimiche o radioattive o gli attacchi contro obiettivi altamente difesi).

In ambito civile gli impieghi dei SAPR sono estremamente vari e spaziano dalle attività di monitoraggio (rilievi aerofotogrammetrici per la mappatura del territorio, monitoraggio ambientale, controllo della flora e della fauna selvatica), al controllo dei sistemi produttivi e dello stato delle infrastrutture (in particolare degli impianti e dei siti industriali, delle piattaforme petrolifere, delle navi in fase di caricamento e scaricamento, degli impianti di stoccaggio dei rifiuti, di produzione energetica e dei campi fotovoltaici). Inoltre, i sistemi aerei a pilotaggio remoto sono impiegati anche nella ricerca scientifica (oceanografia, meteorologia) e in agricoltura (in particolare nell'agricoltura di precisione dove, oltre ad effettuare le concimazioni o i trattamenti fitosanitari, è possibile monitorare lo stato di salute delle coltivazioni e l'umidità del suolo).

L'impatto di questa nuova tecnologia si è manifestato anche nel settore cinematografico e dei media, dove le videoriprese e la fotografia di eventi e manifestazioni effettuate attraverso i SAPR si vanno imponendo come una nuova applicazione del giornalismo, grazie alla quale è possibile scattare foto e fare riprese video da prospettive inusuali.

Sotto il profilo della terminologia, le diverse sigle, come UAV, UAS, RPA, RPAS, APR, MAPR e SAPR, utilizzate nel tempo e nei diversi contesti per descrivere questi apparecchi, sono solo alcuni degli acronimi utilizzati per definire quelli che più comunemente sono conosciuti con il termine di "droni". Di fatto il linguaggio utilizzato

per definire questi sistemi ha subito una progressiva trasformazione che riflette soprattutto l'evoluzione da punto di vista normativo.

In ambito europeo ed internazionale, si è inizialmente fatto ricorso all'acronimo UAV (Unmanned Aerial Vehicle), per indicare un sistema aereo designato ad operare senza equipaggio a bordo (JAA-Eurocontrol, 2004). Successivamente, l'acronimo UAS (Unmanned Aircraft System) è stato utilizzato per indicare l'intero sistema che comprende il velivolo capace di operare senza la presenza a bordo di un pilota umano, la stazione di controllo e tutti gli elementi necessari per assicurare il volo (ICAO, 2011). Quest'ultima definizione, che è forse la più adatta perché esprime il rapporto tra il velivolo e gli elementi funzionali del volo, è stata successivamente sostituita dalla sigla RPA (Remotely Piloted Aircraft) che indica un velivolo aereo designato ad operare senza equipaggio a bordo pilotato da remoto e dalla sigla RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) che indica, invece, l'insieme di tutti gli elementi che comprendono il velivolo pilotato in remoto, la stazione di pilotaggio remoto e tutti i comandi e i controlli necessari per assicurare la realizzazione del volo.

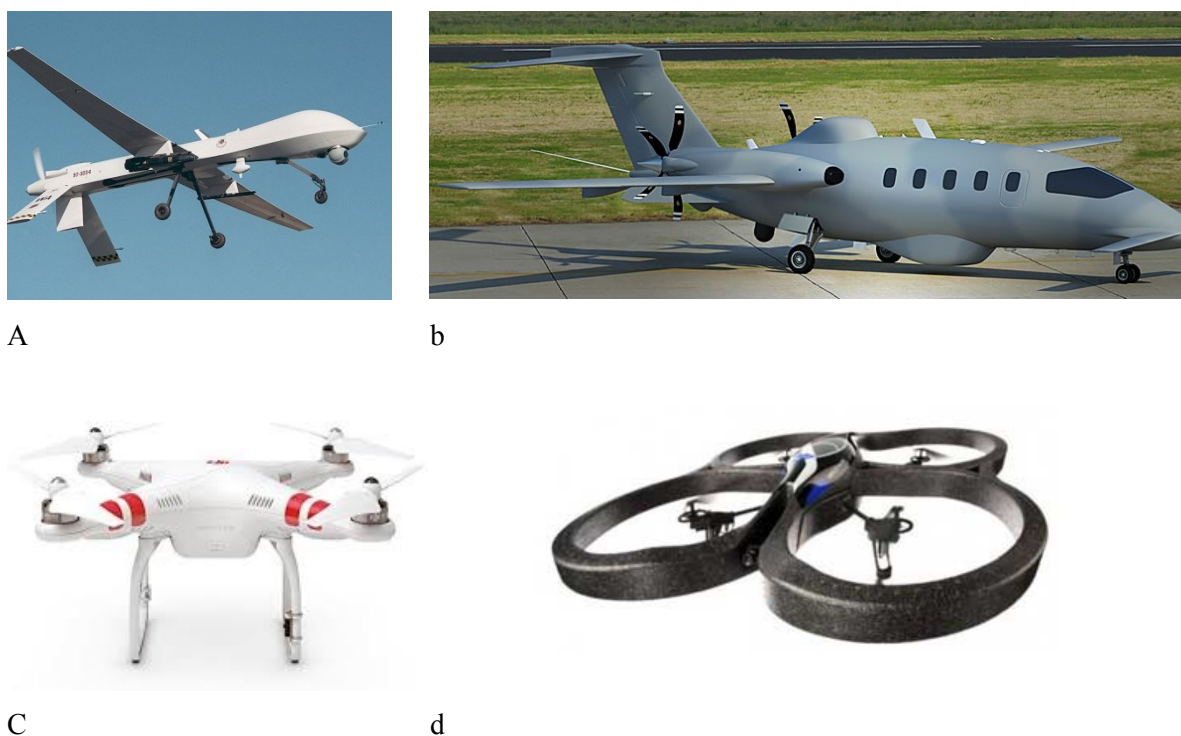
A livello nazionale, il codice della navigazione (art. 743) e il Regolamento ENAC (versioni 2013, 2015 e 2016), introducono l'acronimo SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto) per indicare un sistema costituito da un mezzo aereo (aeromobile a pilotaggio remoto) senza persone a bordo, utilizzato per fini diversi da quelli ricreativi e sportivi, e dai relativi componenti necessari per il controllo e comando (stazione di controllo) da parte di un pilota remoto. Con l'introduzione dell'acronimo SAPR, il regolamento italiano intende ribadire l'importanza dell'intero "sistema" soprattutto in relazione ad alcune problematiche emerse nel corso dell'elaborazione del quadro regolamentare in materia di sicurezza. Infatti, l'ENAC nell'affrontare il concetto di sicurezza, lo estende a tutti gli elementi del sistema di cui il velivolo è parte integrante. Secondo questa impostazione possiamo quindi suddividere il sistema nel:

- *veicolo* (Aeromobile a Pilotaggio Remoto - APR) o piattaforma: costituito dallo scheletro, dal sistema di propulsione, dal sistema di controllo e di navigazione;
- *Ground Control Station*: lo strumento con cui il pilota gestisce il volo del mezzo e sul quale vengono visualizzate le informazioni del volo.

- *payload*: insieme dei sensori che servono per acquisire informazioni di varia natura.

### 3.1 Classificazione dei SAPR

Per comprendere il funzionamento di un SAPR è necessario conoscere i principali campi di applicazione, i vantaggi e gli svantaggi che si possono incontrare nel loro impiego ma soprattutto le loro principali caratteristiche tecniche. Infatti, nonostante un SAPR possa essere molto diverso da un altro, in funzione delle scelte progettuali e delle finalità per cui è stato costruito, esistono delle componenti di base che sono più o meno comuni a tutti i modelli. Esistono diverse tipologie di SAPR, che spaziano dai piccoli dispositivi utilizzati a scopo ludico, fino ai grandi aeromobili utilizzati per la sicurezza (Figura 2).



**Figura 2.** SAPR: (a) Predator; (b) Multirole Patrol Aircraft. Aeromodelli: (c) Phantom DJI; (d) Parrot AR.Drone 2.0.

Non è certamente semplice suddividere e classificare i vari modelli secondo criteri univoci; diverse sono infatti le classificazioni proposte ma una di quelle più utilizzate è stata definita dalla *Federazione Internazionale UVS (Unmanned Vehicle System)* che ha definito alcuni parametri che consentono di classificare i SAPR in funzione delle



principali caratteristiche come il *range* operativo, la quota di volo, l'autonomia di volo, peso massimo al decollo (*Maximum Take Off Weight* - MTOW). In particolare, la classificazione proposta dalla Federazione Internazionale raggruppa i SAPR in tre grandi classi: *tactical*, *strategic* e *special purpose*. La tabella 1 riassume i criteri utilizzati per la classificazione dei velivoli e i relativi dati operativi di utilizzo.

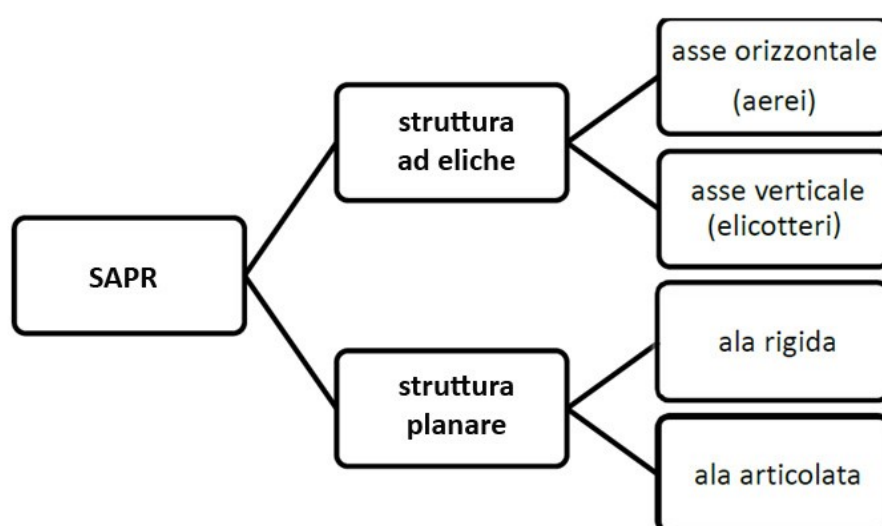
Categoria	Acronimo	Range operativo [km]	Quota di volo [m]	Durata del volo [h]	MTOW [kg]	Operativo
<b>Tactical UAV</b>						
Nano	η	< 1	100	< 1	< 0,0250	Si
Micro	μ	< 10	250	1	< 5	Si
Mini	Mini	< 10	150 - 300	< 2	< 30	Si
Close Range	CR	10 - 30	3 000	2 - 4	150	Si
Short Range	SR	30 - 70	3 000	3 - 6	200	Si
Medium Range	MR	70 - 200	5 000	6 - 10	1 250	Si
Medium Range Endurance	MRE	> 500	8 000	10 - 18	1 250	Si
Low Altitude Deep Penetration	LADP	> 250	50 - 9 000	0,5 - 1	350	Si
Low Altitude Long Endurance	LALE	> 500	3 000	> 24	< 30	Si
Medium Altitude Long Endurance	MALE	> 500	14 000	24 - 48	1500	Si
<b>Strategic UAV</b>						
High Altitude Long Endurance	HALE	> 2 000	20 000	24 - 48	12 000	Si
<b>Special purpose UAV</b>						
Unmanned combat aerial vehicle	UCAV	1 500	10 000	2	10 000	Si
Lethal	LETH	300	4 000	3 - 4	250	Si
Decoy	DEC	0 - 500	5 000	< 4	250	Si
Stratospheric	STRATO	> 2 000	> 20 000 & < 30 000	> 48	Da definire	Si
Exo - stratospheric	EXO	Da definire	< 30 000	Da definire	Da definire	No
Space	SPACE	Da definire	Da definire	Da definire	Da definire	No

**Tabella 1.** Classificazione UVS dei SAPR

Nonostante a livello internazionale siano stati definiti degli standard di riferimento per la classificazione dei SAPR, qualunque sia il sistema adottato, è inevitabile che vi siano velivoli che non rientrano esattamente all'interno di una singola classe o sotto-classe. Inoltre, la quasi totalità dei SAPR utilizzati per scopi civili rientra nelle categorie dei Mini, Micro e Nano SAPR. Per questo motivo è consuetudine suddividere e classificare i SAPR (Mini, Micro e Nano) utilizzati nelle normali applicazioni civili principalmente in funzione della tecnologia propulsiva.

## 3.2 Classificazione dei SAPR in funzione della tecnologia propulsiva

I SAPR, come gli aeroplani, si sono evoluti in differenti configurazioni allo scopo di sviluppare caratteristiche di volo diverse che potessero essere sfruttate per vari usi. Una semplice classificazione dei SAPR può essere quindi basata sulla tipologia di struttura che a sua volta influisce sulla forma del velivolo. In base a questa differenziazione, possono essere definite due tipologie di SAPR differenti oltre che per tipologia di struttura anche per campi di applicazione: SAPR con struttura ad eliche (denominati anche multirotori o multicotteri) e SAPR con struttura planare (denominati anche ad “ala fissa”). Queste principali categorie possono a loro volta essere suddivise in vari sotto-gruppi (Figura 3). Ogni tipologia di struttura presenta dei punti di forza e risulta adatto a particolari condizioni di utilizzo.



**Figura 3.** Classificazione in base alla tipologia di struttura

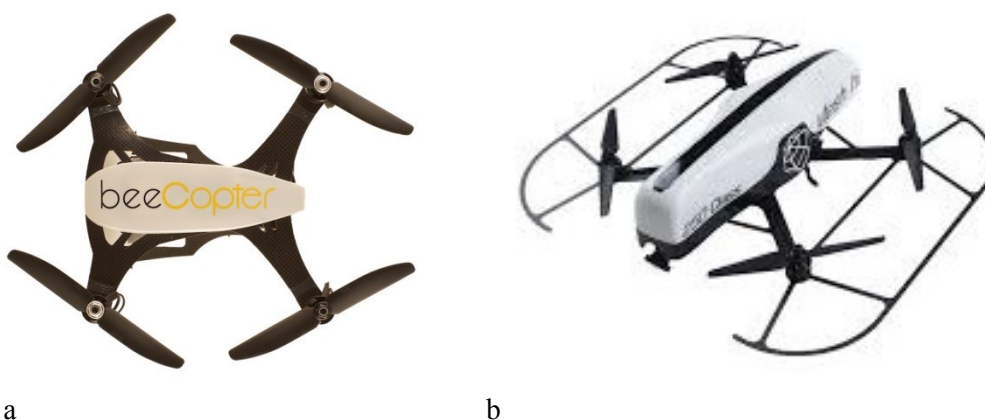
I SAPR con propulsione ad eliche con asse verticale (Figura 4) si caratterizzano per la presenza di una o più eliche, solitamente montate su bracci estraibili, che permettono al velivolo di comportarsi come un elicottero. La tecnologia degli SAPR con propulsione ad eliche è simile a quella degli elicotteri, ma, invece di avere un rotore principale per il sostentamento e l'avanzamento ed un rotore di coda per il contrasto al movimento rotatorio provocato dal rotore principale, i velivoli utilizzano coppie di rotori controrotanti per ottenere la stessa stabilità senza necessitare del rotore di coda. Per

questo motivo sono in genere indicati anche con i termini di “multirottore” o “multicottero”. La configurazione più comune è quella a 4 rotori, denominata quadricottero, ma sono possibili anche configurazioni a 6, 8 o più rotori (esacottero, ottocottero, ecc.). Le caratteristiche principali di questa tipologia di SAPR sono il decollo e l'atterraggio verticali e la capacità di stazionamento in volo (hovering). Inoltre, il controllo singolo di ognuno dei motori e la forma simmetrica del velivolo permette di far volare facilmente questi velivoli in tutte le direzioni (in avanti, all'indietro e di lato). Questo grande controllo del volo viene però ottenuto a scapito dell'autonomia, dato che in questo caso non esiste una portanza aerodinamica che aiuti il sostentamento.



**Figura 4.** APR con struttura a eliche

Tra i multirotori, vi sono anche i SAPR di peso inferiore ai 250 gr, soglia massima per i SAPR considerati inoffensivi (EASA). Nonostante il contenimento dei pesi sotto il limite dei 250 gr, questa categoria presenta sensori integrati per l'acquisizione delle immagini aeree. Due esempi sono il BeeCopter e il sistema MESH4HSE (Figura 5).



**Figura 5.** SAPR di peso inferiore ai 250 gr: (a) Sistema BeeCopter; (b) Sistema MESH4HSE.

Nonostante i SAPR con struttura ad eliche siano relativamente lenti e hanno una ridotta autonomia di volo, a causa dell'elevato consumo di energia necessario per mettere in movimento le eliche, sono la tipologia di SAPR più diffusa. Questi velivoli, grazie alla relativamente grande capacità di carico, offrono, inoltre, la possibilità di equipaggiare il mezzo con differenti sensori in funzione dell'obiettivo della campagna di acquisizione.

Differenti per struttura, i SAPR con struttura planare ad asse orizzontale (Figura 6) sono più simili agli aeroplani che agli elicotteri e sono dotati sia di eliche che di grandi ali. L'unica differenza consiste nel fatto che i SAPR con struttura planare, essendo paragonabili agli aeroplani, possono planare sfruttando le correnti d'aria. Questi sistemi, in genere definiti anche "ad ala fissa", non necessitano di una pista di rullaggio per il decollo, dato che la leggerezza e l'efficienza aerodinamica è talmente grande che possono essere direttamente lanciati in volo a mano, o tramite piccole catapulte (Figura 7) ma hanno sempre bisogno di uno spazio abbastanza ampio per l'atterraggio. La struttura planare, che fornisce portanza aerodinamica, permette ai velivoli di sfruttare correnti e flussi d'aria che gli conferiscono, a parità di peso e potenza dei motori, una autonomia maggiore rispetto a un velivolo ad ala rotante. Questo aspetto li rende adatti ad applicazioni nelle quali sia necessario coprire zone abbastanza ampie di territorio, come ad esempio rilevamenti fotogrammetrici a supporto di opere di ingegneria, studi sulla conformazione geologica del terreno, monitoraggio delle condizioni di colture agricole, ecc.



**Figura 6.** APR con struttura planare



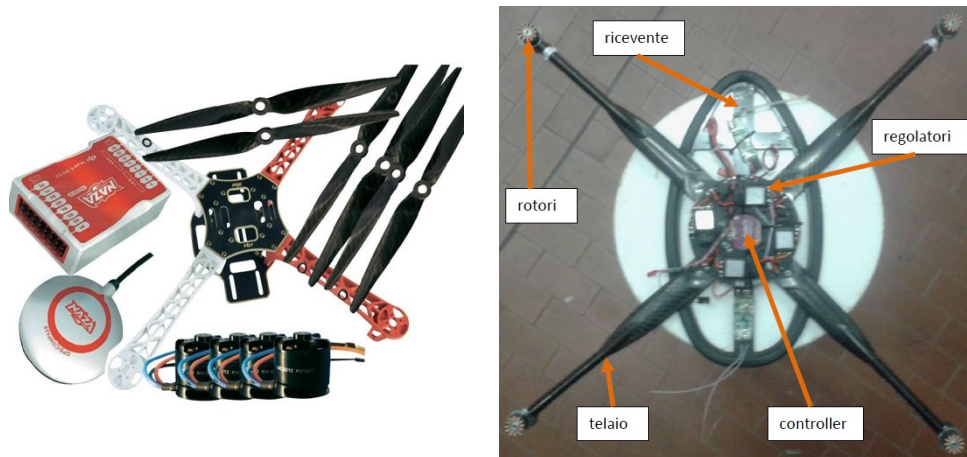
**Figura 7.** Metodologie di decollo per APR con struttura planare

Dal punto di vista della stazione di controllo (o *ground station*) le due tipologie di velivoli non sono differenti: entrambi sono gestiti tramite radiocomando ed entrambi possono eseguire voli sia in modalità automatica, da piano di volo, che in modalità manuale.

### 3.3 Componenti principali dei SAPR multirotori

Le varie parti dei SAPR multirore possono essere suddivisi diversi componenti. In particolare, un SAPR multirore è composto da una struttura (detta telaio) che regge l'intero sistema, dalle batterie che forniscono e distribuiscono energia, da un controller che elabora i dati ricevuti dai sensori (piattaforma IMU), e da una serie di regolatori che distribuiscono l'elettricità ai motori che azionano le eliche per consentire al mezzo di sollevarsi da terra (Figura 8).

Il *flight controller* (FC) rappresenta l'unità centrale del sistema che raccoglie i dati inviati da terra attraverso il radiocomando (RC). Nell'unità di controllo FC sono presenti un insieme di sensori che determinano l'assetto del multicottero. Il microcodice confronta l'assetto di volo con quello desiderato dal pilota e genera un insieme di segnali che vengono inviati ai motori ESC (*Electronic Speed Controller*) in misura tale da far girare i motori per applicare le forze di spinta necessarie a correggere la differenza tra l'assetto effettivo e quello desiderato. La batteria fornisce tutta l'energia necessaria al funzionamento del sistema.



**Figura 8.** componenti installati su un SAPR

### *Telaio*

Il telaio, detto *frame*, è un componente fondamentale dei SAPR perché rappresenta la struttura portante di tutto il velivolo sui cui sono installati tutti i componenti. Tutti i telai dei multirotori sono formati da bracci alle cui estremità sono installati i rotori e presentano forme e dimensioni diverse, in base al numero di rotori che deve supportare. La parte centrale del telaio è invece, occupata dal sistema di alimentazione e dall'elettronica di controllo (Figura 9).



**Figura 9.** Telaio multirottore

Le caratteristiche principali che caratterizzano il telaio sono il peso e la rigidità: l'ideale è una struttura estremamente leggera ma infinitamente rigida; un telaio leggero consente di trasportare un payload maggiore, conferisce al velivolo una migliore agilità e manovrabilità e, a parità di carico, consente di allungare il tempo di volo perché dovendo alzare un peso minore, le batterie hanno una durata maggiore; un telaio rigido, invece conferisce stabilità all'APR.

Altro aspetto importante è quello del materiale utilizzato per la realizzazione del velivolo. Di solito i materiali utilizzati sono leghe di alluminio o materiali compositi che conferiscono al mezzo le caratteristiche di leggerezza e rigidità, ma esistono anche velivoli realizzati in legno o in plastica.

Un'altra caratteristica del telaio è la dimensione perché influisce sulla stabilità e sull'autonomia del volo: telai più piccoli e quindi più leggeri hanno un'autonomia maggiore ma una minore stabilità; viceversa, telai più grandi assicurano una maggiore stabilità ma hanno una minore autonomia di volo.

### *Motori*

Un'altra componente fondamentale dei multicottero sono i motori. Il compito dei motori è quello di generare l'energia necessaria per sollevare e far muovere il velivolo. Il funzionamento dei multicotteri si basa, infatti, sul principio che ogni motore, mettendo in rotazione l'elica a cui è collegato trasmette alla struttura su cui è fissato una coppia che la mette in rotazione in senso opposto a quello dell'elica; la forza è uguale a quella applicata all'elica.

Nella quasi totalità dei moderni multicotteri si utilizzano motori elettrici di tipo *brushless* ovvero senza spazzole. Sono motori molto semplici con un rendimento elettrico molto elevato e pertanto consumano meno energia rispetto ai motori a spazzole. Questo tipo di motori è caratterizzato dalla presenza di una cassa rotante, dove appunto la parte che ruota è l'involucro metallico esterno, e dall'avvolgimento elettrico, che invece rimane nella parte interna, collegato tramite dei cuscinetti a sfera al mozzo dell'elica e tramite un supporto fisso all'asse del multicottero (Figura 10).



**Figura 10.** Motori brushless

I motori *brushless* vengono utilizzati perché assicurano elevata efficienza, elevata velocità di rotazione e ridotto peso contrariamente ai motori trifase che hanno un peso maggiore o ai motori a spazzola che alle alte velocità mostrano problemi di scintillio.

In particolare, i parametri che caratterizzano i motori *brushless* sono:

- tipologia costruttiva: che può essere inrunner o outrunner
- dimensione: espressa con quattro numeri DDLL dove DD è il diametro dello statore interno e LL il suo spessore in mm.
- numero di giri/Volt: indicati con KV
- assorbimento massimo: espresso in ampere

Tranne nel caso dei tricoteri gli apparati propulsivi sono essenzialmente composti da un numero pari di motori per permettere l'attuazione del movimento intorno all'asse verticale del velivolo, così come descritto più avanti.

### *Electronic Speed Controller*

Come già detto i motori *brushless* necessitano di elettronica aggiuntiva per il funzionamento. Tali componenti, detti regolatori ESC (*Electronic Speed Controller*) convertono i segnali di controllo in segnali di potenza in grado di far girare i motori alla velocità necessaria al sostentamento e all'equilibrio del velivolo (Figura 11).

I valori caratteristici di un ESC sono:

- il massimo amperaggio nominale espresso in Ampere (A)
- il massimo voltaggio nominale (spesso espresso in S minimo e massimo ovvero nel numero di elementi in serie del pacco batterie LiPo. 1S = 4,20V)
- la presenza di un circuito BEC che permette di ricavare la tensione di alimentazione a 5V per la rimanente elettronica di bordo
- l'implementazione della tecnologia OPTO
- il tipo di firmware caricato nel microcontrollore

Il regolatore va scelto innanzitutto sulla base della corrente massima assorbita dal motore e dalla tensione del pacco batterie. Per precauzione va scelto sempre un regolatore che



abbia una corrente (amperaggio) massima almeno il 130% superiore a quella assorbita dal motore. Per esempio se il motore assorbe 16 Ampere di picco va scelto un regolatore di almeno 20 Ampere nominali (in realtà il calcolo del + 130% restituisce 20.8A, ma una certa tolleranza è ammessa). Naturalmente, in via precauzionale è possibile utilizzare regolatori con un amperaggio massimo ancor superiore garantendo così una maggiore robustezza del sistema. Per il voltaggio nominale, invece, è possibile scegliere senza aggiungere valori di tolleranza per esempio si può tranquillamente usare un regolatore 2S-4S per un pacco batterie di quattro elementi in serie (4S).



**Figura 11.** Tipico regolatore ESC per multicotteri

### *Flight Controller*

Il *Flight Controller* è il cervello del sistema di volo. E' l'unità che processa i dati di volo ed agisce in automatico in base ad una lunga serie di informazioni ricavate dall'hardware e dal software di cui esso dispone (Figura 12). Il *Flight controller*, raggruppa una serie di dispositivi elettronici essenziali ed accessori necessari per regolare il volo, tra i quali:

- un microcontrollore, ovvero un elaboratore in grado di eseguire tutti gli algoritmi di controllo
- la memoria per il programma, ovvero lo spazio massimo per immagazzinare gli algoritmi di volo
- una piattaforma inerziale, ovvero un insieme di sensori con i quali è possibile stabilire l'assetto del velivolo durante le fasi di volo
- le porte di I/O con le quali il dispositivo si interfaccia con le periferiche esterne (es. ESC, ricevitore radio, GNSS, ecc.)

In commercio si trovano controllori di volo più o meno complessi. Alcuni integrano un insieme di componenti elettronici come giroscopi ed accelerometri per il calcolo delle

accelerazioni rettilinee e rotazionali, magnetometro (bussola) per l'orientamento del velivolo, l'altimetro per misurare la sua posizione in quota e in fine il GNSS per fornire indicazioni su velocità e posizione del velivolo nello spazio.

E' importante valutare il numero di bit del microcontrollore. I vecchi sistemi presentano microcontrollori ad 8 bit; i nuovi sistemi, invece, hanno controllori a 16 e 32 bit. La differenza tra un controllore con un numero di bit superiore ad un altro è che esso è in grado di eseguire alcune operazioni nella metà o in un quarto del tempo rispetto a quello con numero di bit inferiore.

Altro parametro importante è la velocità di elaborazione. Essa si esprime in MHz (oppure in MIPS). Le frequenze di elaborazioni comuni vanno da alcune decine ad alcune centinaia di MHz. La velocità rappresenta il numero di operazioni elementari che il controllore è in grado di effettuare in un secondo. E' chiaro che un controllore che ha pari caratteristiche rispetto ad un altro ma velocità doppia è in grado di eseguire il doppio delle operazioni nello stesso tempo (ovvero impiegare metà tempo per lo stesso numero di operazioni).



**Figura 12.** Flight Controller

### *Eliche*

Ogni singolo motore è collegato ad un'elica (*propeller*) e poiché, nei multicotteri, la metà dei motori ruota in senso orario e l'altra metà ruota in senso antiorario, ogni elica ha una diversa inclinazione (passo) orientata nel verso di rotazione dei motori (Figura 13).

Nelle eliche, la spinta cresce rapidamente con il crescere del raggio dell'elica; dunque un grande raggio dell'elica porta ad avere, a spinta fissata, velocità angolari più basse. Questo evidentemente permette regimi di rotazione più bassi e dunque consumi minori.

Le eliche possono essere realizzate con differenti materiali, dalla plastica alla fibra di carbonio, variabili per peso e resistenza.



**Figura 13.** Eliche

### *Batterie*

Un componente fondamentale del SAPR è rappresentato dalle batterie che, a causa del loro eccessivo peso e della capacità di immagazzinare poca energia, rappresentano, allo stesso tempo, anche uno dei grandi limiti di questi mezzi. Il compito delle batterie è quello di alimentare tutti i componenti. Poiché le batterie influiscono anche sull'autonomia del volo e sulla potenza massima sviluppata dai motori, le batterie più utilizzate nei SAPR sono le Li-Po, abbreviazione di Lithiumion Polymer Batteries, ovvero Batterie ai Polimeri di Litio. Questa tipologia di batterie assicura un peso ridotto, dovuto all'assenza di un contenitore di metallo necessario per contenerle (Figura 14), assicurano tensioni e amperaggi maggiori ed una buona autonomia che di solito è di circa quindici minuti.

Di solito i pacchi batterie sono costituiti da più elementi in serie in modo da raggiungere la tensione necessaria al sistema di volo. Nel gergo i pacchi batterie vengono classificati da un numero seguito da S per indicare gli elementi in serie. Ci sono casi in cui le configurazioni del pacco sono in serie o in parallelo.



**Figura 14.** Esempio di batterie

I valori caratteristici delle batterie LiPo sono:

- capacità: espressa in ampere/ora (a volte anche da una notazione AA.a per esempio 2.2 che significa 2.2 A/h ovvero 2200 mA/h)
- voltaggio: espresso in Volt (quasi sempre indicato dal numero di celle in serie nel pacco. Per esempio 2S ->  $2 * 4,20V = 8,40V$ )
- capacità di scarica: espressa in ampere che indica il massimo assorbimento ammesso ai cavi (quasi sempre indicata nel formato xC / XC)
- capacità di carica: espressa in ampere che indica la massima velocità di carica ammessa dal pacco (quasi sempre indicata nel formato cC )
- tipo di connettori applicati: Elemento da non sottovalutare in quanto la sostituzione dei connettori originali può essere una operazione difficile da effettuare

La capacità di scarica massima è indicata col numero di volte la capacità nominale della batteria in regime continuativo ed in regime temporaneo (30 secondi). per esempio una batteria da 2.2A che ha la capacità di scarica pari a 20C / 30C è in grado di erogare  $20 * 2,2 A = 44.0 A$  per un tempo indefinito (fino alla sua scarica) e di erogare un picco di  $30 * 2,2 A = 66.0 A$  per max 30 secondi.

La capacità di carica massima, invece, è la corrente massima ammessa alla carica. Per esempio una carica ammessa di 2C permetterà di caricare la batteria in 30 minuti circa in quanto è possibile caricare il pacco al doppio della sua capacità nominale. Un pacco con capacità 1C richiede almeno un ora per la carica. Caricare un pacco batterie con una corrente pari alla sua capacità nominale è oramai quasi sempre sicuro.

Un aspetto delle batterie LiPo è legato al fatto che sono un concentrato di energia. Ciò significa che, se cortocircuitati, perforati, deformati oppure esposti a sorgenti di calore possono incendiarsi e addirittura esplodere.

### *Sistema di controllo radio*

Per definizione un SAPR è un sistema a controllo remoto e per essere controllato necessita di un apparato trasmittente a terra con cui il pilota impartisce i comandi per le operazioni di volo. Il sistema di controllo di un APR è solitamente costituito da un “radiocomando” trasmettitore (controller) (Figura 15a) e da un ricevitore (Figura 15b) che si interfaccia con il *Flight Controller*. Il ricevitore, posto a bordo del velivolo, ha la funzione di ricevere in input i segnali sotto forma di onde radio e di trasformarli in impulsi elettrici per il *Flight Controller*.



**Figura 15.** (a) Radiocomando; (b) ricevitore.

Il radiocomando, sfruttando la frequenza di 2.4GHz che, in campo aperto, garantisce una portata di qualche chilometro e permette di avere un collegamento sicuro con la ricevente montata sul velivolo, consente di inviare dei comandi alla centralina di controllo montata sul velivolo affinché vengano tradotti in azioni di volo.

Una delle caratteristiche più importanti di un radiocomando è il numero dei canali. Per pilotare un SAPR sono necessari almeno 4 canali che consentono di attuare almeno quattro operazioni simultanee e cioè: controllare la quota (Yaw), inclinarsi a destra e sinistra (Roll), inclinarsi in avanti e indietro (Pitch), ruotare sull'asse verticale (Throttle).

Oggi, in commercio ci sono radiocomandi anche con 32 canali. Tale ridondanza si rende necessaria non appena si vuole utilizzare una applicazione sul velivolo, per esempio installare una fotocamera per la quale il pilota deve avere un canale libero per comandarne lo scatto. Inoltre un numero di canali superiori permette l'implementazione di controlli remoti tesi a regolare le doti di volo del drone. I SAPR moderni infatti hanno bisogno almeno di un quinto canale per recepire la modalità di volo ovvero la modalità con la quale il flight controller interpreta i dati dei sensori e quelli del pilota attuando uno specifico comportamento del drone.

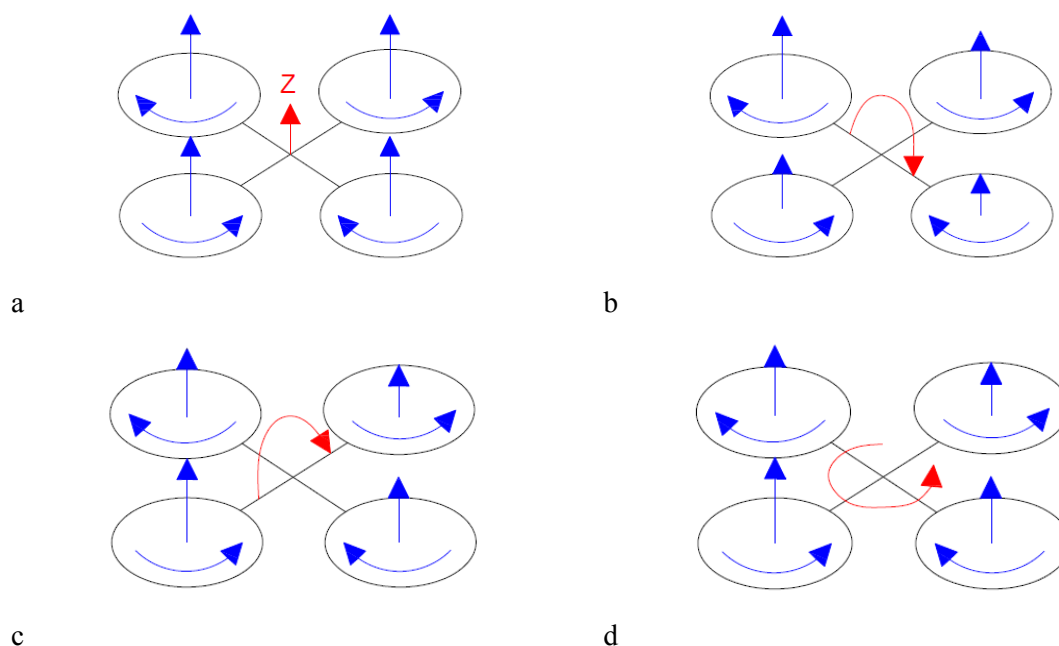
Altra caratteristica importante di un sistema RC è la capacità di scambio dei dati in modo unidirezionale o bidirezionale. Seppur la capacità di scambio bidirezionale non è un elemento essenziale per il volo, le radio con tale caratteristica sono fortemente consigliate perché, attraverso lo scambio bidirezionale (detto telemetria) è possibile, oltre ad impartire i comandi di volo, anche ricevere informazioni importanti dal velivolo. Le informazioni ricevute vengono normalmente presentate su un display posto sul ricevitore. Per esempio il pilota può essere informato in tempo reale sullo stato di carica delle batterie, sull'assorbimento di corrente, ecc.

### 3.3.1 Meccanica di volo

Il primo aspetto da considerare affinché un APR si possa alzare da terra sono i momenti generati dalla rotazione delle eliche perché a causa dell'attrito un rotore in movimento produce un'azione contraria sul sostegno. Per questo motivo, nei velivoli i rotori diametralmente opposti hanno lo stesso verso di rotazione mentre i restanti hanno verso contrario; ciò produce sui due assi una coppia di momenti che, a pari velocità di giri di tutti i propulsori, si eguagliano. Sotto queste condizioni, un incremento o decremento di potenza in un singolo rotore o ad una coppia di questi provoca un sbilanciamento di forze e momenti tale da provocare il movimento del velivolo.

Di seguito le combinazioni utilizzate:

- incremento di potenza in tutti e quattro i rotori: non provoca uno sbilancio di coppia ma un incremento eguale di portanza su ogni propulsore, provocando una salita verticale in quota del drone (Figura 16a);
- incremento di potenza di un rotore e decremento di potenza di quello opposto: tale combinazione crea un aumento di portanza su un rotore e un decremento in quello opposto generando una rotazione attorno all'asse che monta i propulsori in cui non è avvenuta variazione di rotazione. Questa manovra induce il drone a ruotare secondo il pitch e il roll ma mantenendo costante la rotazione attorno all'asse verticale di yaw in quanto si mantengono bilanciati i momenti totali sulle coppie dei bracci (Figura 16b-c);
- incremento pari di potenza di due rotori opposti e decremento pari dei restanti due: questa combinazione si bilancia nella portanza totale, mantenendo il velivolo ad una quota costante ma genera uno sbilanciamento tra le coppie degli assi portando il drone a ruotare rispetto all'asse verticale di yaw (Figura 16d).



**Figura 16.** Schematizzazione della meccanica di volo

### 3.3.2 Configurazioni esistenti

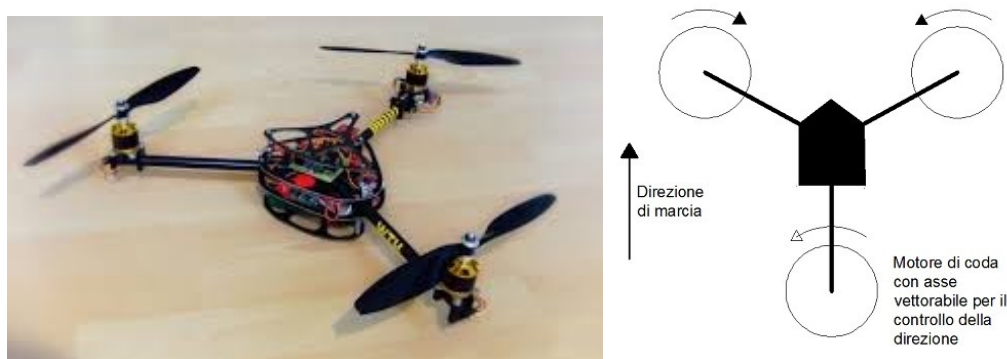
Gli APR più comuni sono quelli che presentano una struttura ad eliche in cui la configurazione del telaio è dettata dal numero dei motori presenti. I motori, dotati di

eliche vengono montati solitamente alle estremità degli assi del telaio (o frame), mentre l'elettronica di controllo e la batteria sono posizionati al centro del drone, dove si incrociano gli assi. Poiché le caratteristiche di ogni velivolo dipendono dalla configurazione del suo telaio, di seguito sono esaminati i modelli più comuni.

### *Tricottero*

Il numero minimo di motori affinché un drone si possa alzare in volo è tre, disposti a triangolo nella configurazione "tricottero". Dal punto di vista tecnico, questa configurazione è particolarmente complessa in quanto richiede che uno dei motori sia infulcrato su un perno che, tramite un servocomando, ne consente di variare l'inclinazione per vettorizzare la spinta ed ottenere il controllo sull'asse d'imbardata (direzione).

Il tricottero, di cui sotto è riportato un disegno schematico, è dotato di tre motori e altrettante eliche poste ai vertici di un triangolo il cui centro è il baricentro di tutto il velivolo (Figura 17 a-b).



**Figura 17.** Tricottero: (a) modello reale; (b) schematizzazione

Generalmente i due motori frontali sono controrotanti per bilanciare anche se solo parzialmente, a causa del numero dispari di motori, l'effetto della coppia; ovviamente, nella condizione di hovering, stazionamento in un punto fisso, i tre motori producono la stessa spinta.

In questa configurazione il controllo sull'asse di beccheggio, avviene variando i giri dei due motori anteriori rispetto a quello posteriore: maggiore potenza davanti e il tricottero alza il muso, maggiore potenza dietro e il tricottero si abbassa. Analogamente, per il controllo laterale (rollio) se si aumenta la potenza del motore destro (e diminuisce sul



sinistro) il tricottero si inclina a sinistra, viceversa si inclina a destra. In questo caso il motore posteriore non interviene nella manovra.

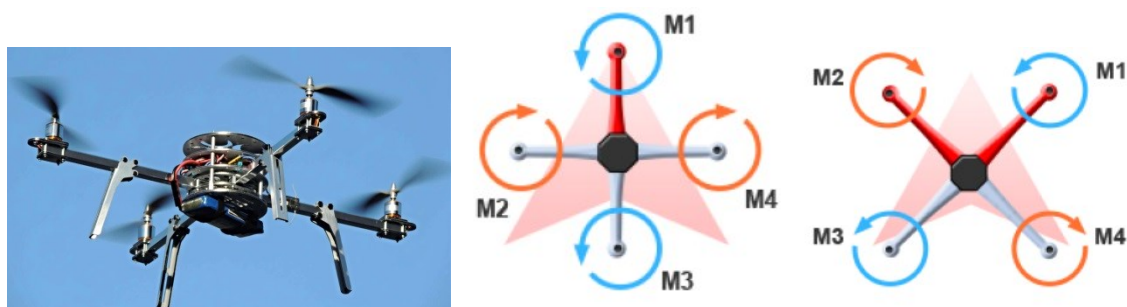
Essendo tre i motori, due gireranno in un senso e uno nell'altro quindi i 2/3 della coppia saranno in un senso e 1/3 nell'altro. Poiché questa condizione tende a far ruotare il mezzo sull'asse verticale ("imbardata"), per impedire questo movimento, di solito, si inclina l'asse di un motore da un lato in modo da produrre, oltre alla spinta verticale anche una piccola componente di spinta trasversale, in senso opposto a quella della coppia, per bilanciarla. Il metodo di inclinare gli assi per bilanciare la rotazione dovuta alla coppia, viene sfruttato anche per ottenere il controllo direzionale installando uno dei motori (quello di coda) su un supporto orientabile su cuscinetti collegato ad un servocomando azionato dal comando di direzione.

### *Quadricottero*

Il quadricottero è al momento il tipo di telaio più utilizzato; ha quattro bracci, ognuno collegato ad un singolo motore che, con le relative eliche permettano di eseguire manovre tipiche di un elicottero ma che assicurino anche un'andatura in volo che riprende le manovre degli aerei (Figura 18a). E' fondamentale che due motori ruotino in senso orario e gli altri in senso antiorario. A dare stabilità a un elicottero è il rotore di coda che va a contrastare il movimento rotatorio del rotore principale. La contrapposizione dei motori permette quindi di annullare l'energia rotatoria creata. Discorso analogo per le eliche: dove abbiamo i due motori che girano in senso orario andranno montate le eliche CW, mentre per i motori che girano in senso antiorario dobbiamo montare le eliche CCW.

Sono principalmente due le configurazioni per un quadricottero e vengono definite in base alla direzione di volo rispetto alla posizione dei motori (Figura 18b-c); la maggior parte dei modelli, sono progettati con una configurazione a "V". Un problema di questo tipo di telaio è che se uno dei motori si spegne, il resto non sarà in grado di compensare, e il drone cadrà.

In un quadricottero, il principio di sostentamento (e il controllo di pitch e roll) è simile a quello di un tricottero ciò che cambia è il sistema per il controllo della direzione che sfrutta l'applicazione differenziata della potenza alle due coppie di motori sulla diagonale.

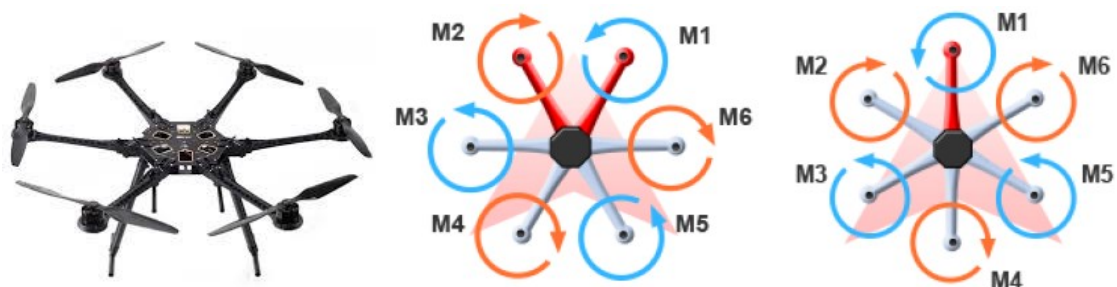


**Figura 18.** Quadricottero: (a) modello reale; (b) configurazione a “I”; (c) configurazione a “V”

Aumentando i giri dei due motori che ruotano in senso orario (e diminuendo i giri degli altri due della stessa quantità in modo che la portanza totale risulti invariata) ci sarà un aumento della coppia di reazione in senso antiorario che produrrà una rotazione del mezzo (imbardata) a sinistra.

### *Esacottero*

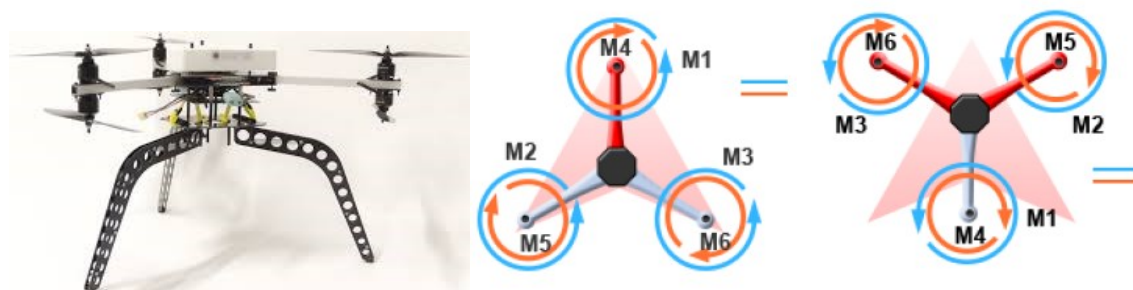
L'esacottero, la cui configurazione è la più utilizzata da chi è interessato alla fotografia aerea, è un tipo di configurazione in cui ci sono sei bracci ed ogni braccio è connesso al suo motore (Figura 19a). In particolare, esistono due differenti tipi di configurazione per l'esacottero: una a “V” (Figura 19b) ed un'altra a “I” (Figura 19c). Sicuramente, una configurazione di questo tipo oltre a permettere al drone di guadagnare quota più velocemente rispetto alle configurazioni precedentemente descritte, consente di equipaggiare il mezzo anche con carichi più pesanti. Inoltre se un motore si spegne, ci sono ancora chance che il drone possa atterrare in sicurezza. Naturalmente un carico maggiore richiede una maggiore autonomia delle batterie.



**Figura 19.** Esacottero. (a) modello reale; (b) configurazione a “V”; (c) configurazione a “I”.

Una configurazione di esacottero particolare è quella a tricottero doppio (Figura 20a). In questo caso il telaio è formato soltanto da tre bracci alle cui estremità sono alloggiati due motori e due eliche.

Anche il tricottero doppio presenta due differenti configurazioni in funzione della tipologia di telaio: quello a “IY” (Figura 20b) e quella a “Y” (Figura 20c). Le due differenti configurazioni differiscono l’una dall’altra esclusivamente per la posizione dei motori rispetto al telaio.

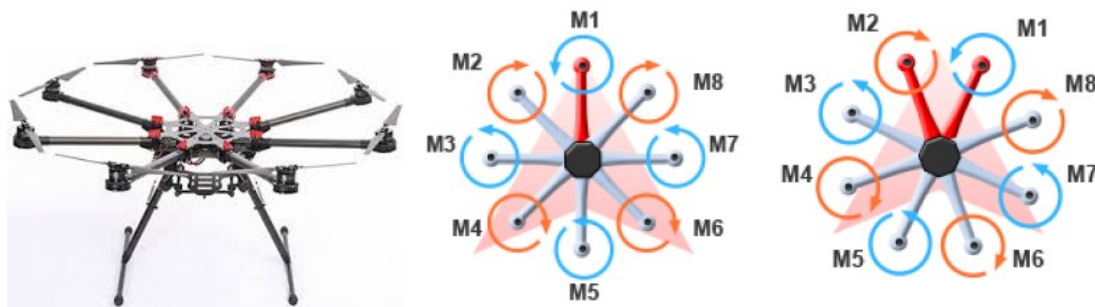


**Figura 20.** Tricottero doppio: (a) modello reale; (b) configurazione a “IY”; (c) configurazione a “Y”.

### *Octacottero*

Infine vi è l’octacottero, configurazione in cui il telaio è formato da otto bracci, ognuno connesso ad un singolo motore (Figura 21a). Anche l’octacottero presenta una configurazione ad “I” (Figura 21b) e una configurazione a “V” (Figura 21c). Un velivolo di questo tipo, grazie all’elevato numero di motori, produce una spinta maggiore rispetto alle configurazioni già analizzate e di conseguenza ha una capacità di carico maggiore.

Come per gli esacotteri, anche questa tipologia di configurazione, nel caso di spegnimento di un motore offre la possibilità di poter atterrare in sicurezza.



**Figura 21.** ottacottero: (a) modello reale; (b) configurazione a “I”; (c) configurazione a “V”.

Una configurazione di octacottero particolare è quella a quadricottero doppio che presenta un telaio formato da quattro bracci soltanto alle cui estremità vi sono due motori, e quindi anche due eliche (Figura 22a-b).



**Figura 22.** Quadricottero doppio: (a) modello reale; (b) schematizzazione

### 3.4 Caratteristiche principali dei SAPR con struttura planare

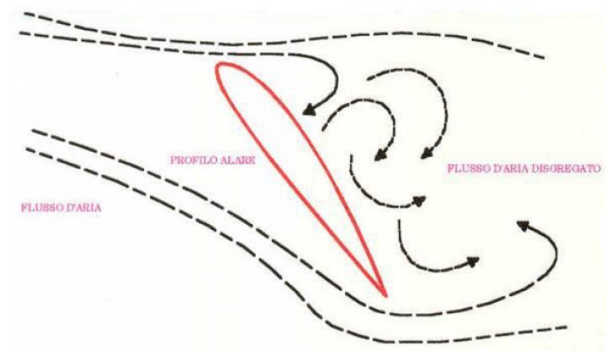
I SAPR con struttura planare sono quei velivoli che assomigliano agli aeromobili convenzionali e, oltre ad offrire la possibilità di coprire superfici fino a 10 Km<sup>2</sup> con un unico volo, presentano una lunga autonomia di volo (Figura 23) in quanto, rispetto ai multirotori che hanno una autonomia di circa 15 minuti, sono in grado di assicurare una autonomia di volo superiore ai 45 minuti



**Figura 23.** Esempi di APR con struttura planare

I SAPR con struttura planare assicurano una migliore resa aerodinamica, una minore influenza delle condizioni ambientali grazie alla capacità di volare anche con velocità del vento che arrivano fino a 45 Km/h, in queste condizioni sono comunque garantite la stabilità del volo ed il mantenimento del corretto assetto azimutale e una maggiore sicurezza di volo perché, a parità di payload, hanno un peso molto inferiore ai multirotori e, in caso di problematiche tecniche ai propulsori, non perdono completamente la propria capacità di volare in maniera controllata.

Poiché i SAPR con struttura planare somigliano agli aeroplani, in quanto tale, un componente fondamentale di questa tipologia di velivoli è rappresentato dalle ali. Come gli aerei convenzionali, anche i SAPR a struttura planare si sostengono in aria grazie alla portanza, ovvero per effetto di quella particolare interazione tra profilo alare e aria per cui quest'ultima viene continuamente accelerata verso il basso trasmettendo una forza uguale e contraria al velivolo (Figura 24).



**Figura 24.** Iterazione aria-ala

Mentre nei multicotteri la portanza è generata dalla rotazione delle eliche, nei SAPR a struttura planare la portanza è generata dalle ali che rivestono quindi un ruolo fondamentale nel volo del velivolo e per tale motivo il loro progetto e la loro scelta richiedono particolare attenzione.

Da un punto di vista fluidodinamico le ali sono infatti lunghe ed affusolate, per avere un corretto *aspect ratio*, mentre dal punto di vista strutturale, poiché i carichi a cui un'ala è sottoposta sono prevalentemente di torsione e flessione (le forze aerodinamiche si manifestano sotto forma di momenti torcenti e flettenti), è composta da un'ossatura portante, che si sviluppa lungo tutto il bordo d'attacco dell'ala e che regge i carichi mentre per la rimanente parte è costituita da un materiale più elastico per rendere la struttura "flessibile" e quindi più deformabile.

Inoltre, tutti i sistemi ad ala rigida sono realizzati con tipici materiali da aeromodellismo, come il legno di balsa, eventualmente irrobustito da fibra di vetro e relativa resina, o il polipropilene espanso (EPP). L'EPP, che assomiglia superficialmente al polistirolo, è elastico, resiliente, resiste ad alte temperature, non subisce facilmente deformazioni plastiche, è leggero e facilmente lavorabile. Il modulo di elasticità non è alto, e ciò generalmente non consente l'impiego del polipropilene espanso per la parte strutturale del velivolo; questo fatto viene ovviato rivestendo la fusoliera in EPP con nastro rinforzato in fibra di vetro, e rinforzando le ali in EPP con longheroni. Le ali spesso sono rivestite con nastro rinforzato e con un rivestimento termoretraibile, quali l'oracover, per aumentare la rigidità delle ali e la loro capacità di resistere a fenomeni di flutter e ad altre flessioni indesiderate.

### 3.5 Payload e funzionalità

Per operazioni specifiche, il SAPR multirottore è dotato di un supporto, detto Gimbal (Figura 25), che offre la possibilità di equipaggiare il mezzo con differenti sensori. Il Gimbal è costituito da un piatto completamente auto-bilanciato che consente al sensore di mantenere l'orizzontalità nel caso il velivolo si muova repentinamente durante il volo.

La possibilità di caricare qualunque tipo di dispositivo per un peso massimo di 5 Kg circa, permette di ampliare notevolmente le possibilità ispettive di questi dispositivi consentendo di ottenere ispezioni e dati ad alta precisione anche in luoghi inaccessibili, ricerche di persone e animali e numerose altre applicazioni.



Figura 25. Gimbal

Gli scenari operativi che, in campo civile, vedono l'impegno di un SAPR sono innumerevoli e il loro utilizzo è spinto da differenti motivazioni tra le quali la possibilità

di utilizzare contemporaneamente sensori diversi che possono essere combinati a seconda delle necessità. Di seguito sono elencate alcune tipologie di sensori e i relativi principali campi di applicazione:

### 3.5.1 Camere fotografiche e videocamere

I SAPR possono essere equipaggiati con videocamere o macchine fotografiche che consentono di acquisire video e immagini dell'area di sorvolo (Figura 26). Questa tipologia di sensore consente di utilizzare tali velivoli anche per rilievi tecnico-ambientali particolarmente complessi, per raggiungere e documentare zone impervie, ispezionare pareti rocciose instabili, elementi geomorfologici, cavità e grotte, gole fluviali, monitorare l'attività delle aree vulcaniche, mappare territori in frana, fare attività di prevenzione del dissesto idrogeologico ed effettuare esplorazioni minerarie.

Nell'ambito delle costruzioni e delle infrastrutture forniscono un punto di vista differente dall'alto per controllare lo stato di manutenzione di un edificio, effettuare operazioni di fotogrammetria, rilevamento di dati ed indagini geomorfologiche in aree inagibili, monitorare la condizione di ponti, dighe e ferrovie, soprattutto nei punti più difficili da raggiungere con altri mezzi ed in tempi molto rapidi e costi ridotti.



**Figura 26.** Esempi di acquisizioni aeree da SAPR equipaggiato con fotocamera

In funzione delle caratteristiche del SAPR ed in particolare della sua capacità di carico, ogni velivolo è in grado di trasportare differenti tipologie di camere: più il SAPR è leggero e meno stabile durante il volo, più leggera dovrà essere la fotocamera che trasporterà. Per questo motivo, tutte le varie tipologie di camere digitali attualmente



disponibili (le action camere, le camere compatte, le mirrorless e le reflex) sono utilizzate con i SAPR (Figura 27).



**Figura 27.** Camere utilizzate per i rilievi da SAPR: (a) Action Cam; (b) Compatta; (c) Mirrorless; (d) Reflex.

La fotocamera più piccola e leggera con cui un SAPR può essere equipaggiato è una Action-Camera. Questa tipologia di camera presenta le caratteristiche di leggerezza e compattezza e garantisce l'acquisizione di fotografie di qualità piuttosto modesta. L'utilizzo di questa tipologia di videocamere per riprese da SAPR è determinata oltre che dalla presenza di un LCD, che permette di vedere le foto e i video in tempo reale, anche dalla presenza di app, wi-fi, giroscopio, controllo a distanza, timelapse, ecc. che la rendono particolarmente prestante.

In considerazione della grandissima diffusione di questi sistemi per attività ludico/ricreative, sul mercato sono presenti tantissime soluzioni tecniche che vedono anche lo sviluppo di SAPR (ma in questo caso sarebbe più corretto parlare di aeromodelli) con camere integrate per i più svariati usi. In questi SAPR la fotocamera è installata su un gimbal motorizzato che fornisce stabilità contrastando il movimento

indesiderato determinato dalla presenza del vento o dalle vibrazioni del SAPR stesso, mantenendosi orizzontale nonostante i beccheggi e i rollii del quadricottero (Figura 28).



**Figura 28.** SAPR dotato di Action-Camera: Phantom 3

I SAPR possono essere equipaggiati anche con le camere compatte, dotate di obiettivo non intercambiabile, in genere un obiettivo zoom che hanno ridotte dimensioni e un peso intorno ai 150 g. Questa tipologia di camera è facile da utilizzare e funziona in maniera completamente automatica, anche se alcuni modelli consentono regolazioni manuali (come la messa a fuoco).

Fino a poco tempo fa, al fine di costruire camere di dimensioni ridotte sia per il corpo che per gli obiettivi, la maggior parte delle compatte montava sensori di piccole dimensioni, che non consentono di ottenere un buon rapporto segnale/rumore, specialmente aumentando la sensibilità della fotocamera in presenza di poca luce, con un peggioramento molto visibile della qualità d'immagine. Oggi, alcuni modelli sono stati dotati anche di zoom ad ampia escursione, fino a 30x che consentono di avere in una fotocamera compatta degli zoom equivalente ad un 24-720 mm di focale. Nonostante queste camere consentono di acquisire dei prodotti di buona qualità sia in presenza che in assenza di luce, sono capaci di acquisire video Full HD a 1920×1080 pixel e offrono funzioni speciali come scene, panorama o filtri particolari, la loro velocità operativa e di messa a fuoco è inferiore a quella delle reflex e delle migliori mirrorless.

I SAPR possono essere equipaggiati anche con camere mirrorless, chiamate così perché a differenza delle reflex sono sprovviste di specchio. Queste fotocamere ad obiettivo

intercambiabile con sensori di varia misura che variano dalla dimensione di 1" corrispondente a 13,2 mm × 8,8 mm al Micro 4/3, 17 mm × 13,5 mm all'APS 23,50 mm × 15,60 mm al fullframe 36 mm × 24 mm.

In commercio esistono mirrorless che assomigliano alle camere compatte, anche nelle dimensioni, spesso senza mirino, e altre, invece, che riprendono la forma delle reflex ma che presentano dimensioni e pesi inferiori (300 g circa) e sono dotate di mirino elettronico.

Le mirrorless, come tutte le fotocamere moderne, possono essere usate sia con impostazioni in modalità manualmente che in automatico. Inoltre, le recenti evoluzioni dell'autofocus permettono di ottenere fotocamere che hanno una velocità di messa a fuoco analoga a quella delle migliori reflex, presentando corpi macchina più compatti e leggeri.

Anche le mirrorless, così come le compatte, offrono la possibilità di acquisire riprese video Full HD a 1920×1080 pixel, alcune possono arrivare anche a 4K (3840×2160 pixel) e, se dotate di sensore full frame, offrono anche la possibilità di regolare manualmente la profondità di campo e la qualità dell'immagine.

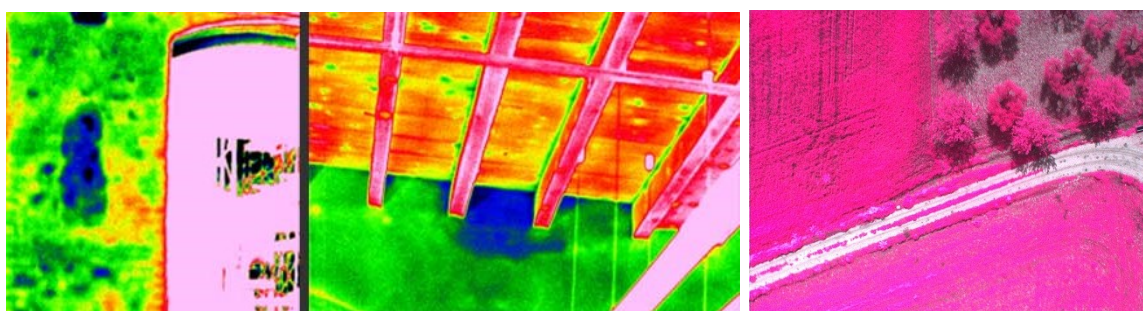
Quando la stabilità strutturale del velivolo lo consente (da un esacottero in su), è possibile equipaggiare un SAPR anche con una camera reflex. Anche se più pesanti (il peso potrebbe essere di circa 500-700 gr) e di dimensioni maggiori rispetto alle fotocamere compatte e mirrorless, questa tipologia di camere viene utilizzata perché garantisce un'immagine di ottima qualità anche in presenza di livelli di luce ridotti. Inoltre le camere reflex si prestano bene per acquisire video in Full HD e offrono la possibilità di regolare manualmente la profondità di campo e la qualità dell'immagine grazie alla presenza di un grande sensore.

Su velivoli molto stabili, come gli octacotteri, che offrono un payload maggiore, è possibile addirittura installare una reflex Full-Frame o videocamere professionali per la realizzazione di filmati con elevati livelli di qualità.

Dal punto di vista della modalità di utilizzo, come il resto delle camere, anche le Reflex possono essere utilizzate in modalità automatica o manuale e presentano una messa a fuoco manuale o automatica con zoom da 15-18x.

### 3.5.2 Camere multispettrali

Le camere multispettrali consentono di analizzare le proprietà del suolo e degli oggetti presenti su di esso attraverso l'analisi della radiazione solare riflessa in regioni dello spettro elettromagnetico invisibili all'occhio umano; ciò consente di rivelare fenomeni, caratteristiche e qualità (siti archeologici sepolti, dispersioni termiche, individuazione di coperture di amianto, ecc.) altrimenti identificabili solo con onerose indagini in loco (Figura 29).



**Figura 29.** Esempi di acquisizioni aeree mediante SAPR equipaggiato con camera multispettrale

I velivoli dotati di sensori multispettrali trovano applicazione nel campo dell'agricoltura di precisione per la diagnostica e la produzione di indicatori agricoli, mappe di land cover e inventario delle coltivazioni, nel campo del monitoraggio ambientale, geologico e marino, in ambito forestale nelle operazioni di inventario e monitoraggio della biomassa, nel monitoraggio e controllo del ciclo del carbonio, tramite individuazione delle situazioni di criticità nella risorsa suolo, nel campo della caratterizzazione atmosferica, nel campo della sicurezza come supporto alla gestione del rischio (incendi, frane, vulcani e terremoti) e a supporto di operazioni di intelligence ed anche per la mappatura delle aree urbane e funzionali, come supporto in campo archeologico ed in campo edile anche per la mappatura delle coperture di amianto. In tal modo, mediante rilievi aerei con sensori multispettrali è possibile ottenere preziosi riscontri, capaci di superare i noti limiti delle applicazioni nel campo del visibile.

Oggi esistono differenti tipologie di camere multispettrali interamente progettate e realizzate per essere utilizzate sui SAPR (Figura 30).



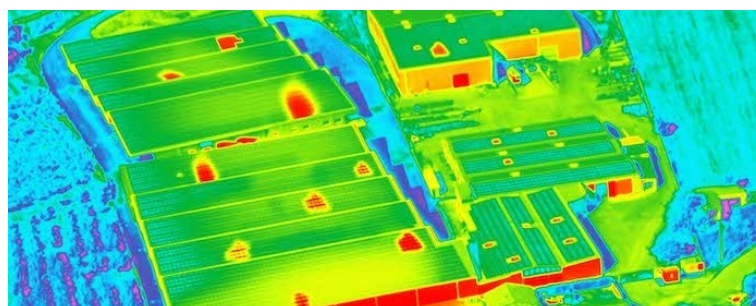
**Figura 30.** Camera multispettrale: (a) Sensore MAIA; (b) Sensore Tetracam "ADC -micro"

Ogni camera nasce con una serie di filtri passa-banda ma ogni modello può essere equipaggiato con filtri ottici intercambiabili in funzione degli indici specifici desiderati.

Generalmente, queste camere possono interfacciarsi con diversi dispositivi come il GNSS, per un accurato log sincronizzato delle posizioni di scatto o il video, per la trasmissione delle immagini in tempo reale del sensore scelto.

### 3.5.3 Camere termiche

Sempre più frequentemente si vedono SAPR attrezzati con termo-camere, ovvero speciali telecamere sensibili all'infrarosso che servono a riprendere mappe termiche. I prodotti di questa tipologia di sensore sono immagini e filmati a falsi colori dove a ogni gradazione di colore, dal blu al rosso acceso, corrisponde una temperatura (Figura 31).



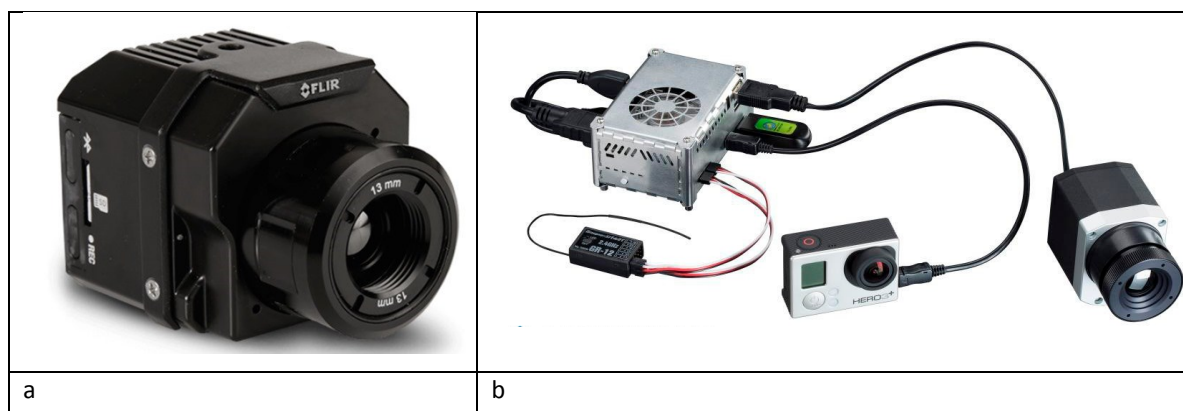
**Figura 31.** Esempi di acquisizioni aeree mediante SAPR equipaggiato con camera termica

I SAPR equipaggiati con termo-camere presentano molte applicazioni pratiche; in agricoltura, poiché consentono di ottenere una mappa precisa dello stato vegetativo, misurando la radiazione solare riflessa (più la foglia riflette meno la pianta sta utilizzando la luce solare per la fotosintesi e quindi è debole o malata), per monitorare e controllare le colture; grazie alle informazioni raccolte è possibile rilevare l'inizio di patologie, micosi, ecc. per valutare lo stato di salute di una coltivazione in modo più completo di quanto sia possibile solo da terra. In edilizia, le termo camere permettono di valutare lo stato di conservazione e le dispersioni termiche o ancora la presenza di problemi all'impianto elettrico e di infiltrazioni di umidità.

La termografia aerea è un prezioso strumento anche per i ricercatori che studiano l'inquinamento delle acque e dei terreni, degli archeologi, per la ricerca e soccorso di persone scomparse o sepolte sotto valanghe, crolli o frane, il controllo strutturale di ponti dighe e grandi infrastrutture.

In generale è possibile distinguere le termo-camere in funzione della risoluzione, del *range* e della frequenza.

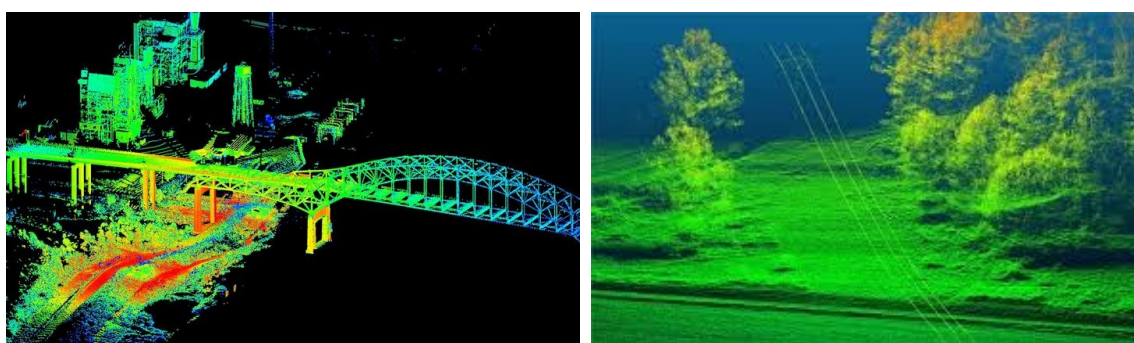
Nel campo delle applicazioni sui SAPR esistono differenti tipologie di camere termiche appositamente realizzate che presentano caratteristiche radiometriche diverse. In genere, con peso e dimensioni ridotte, nelle camere termiche di ultima generazione è possibile misurare temperature da -20 °C a 900 °C acquisendo immagini termiche con una buona risoluzione e ad una velocità (frame rate) abbastanza elevata (Figura 32).



**Figura 32.** Camere termiche: (a) sensore Flir Tau 2; (b) sensore PI LightWeight

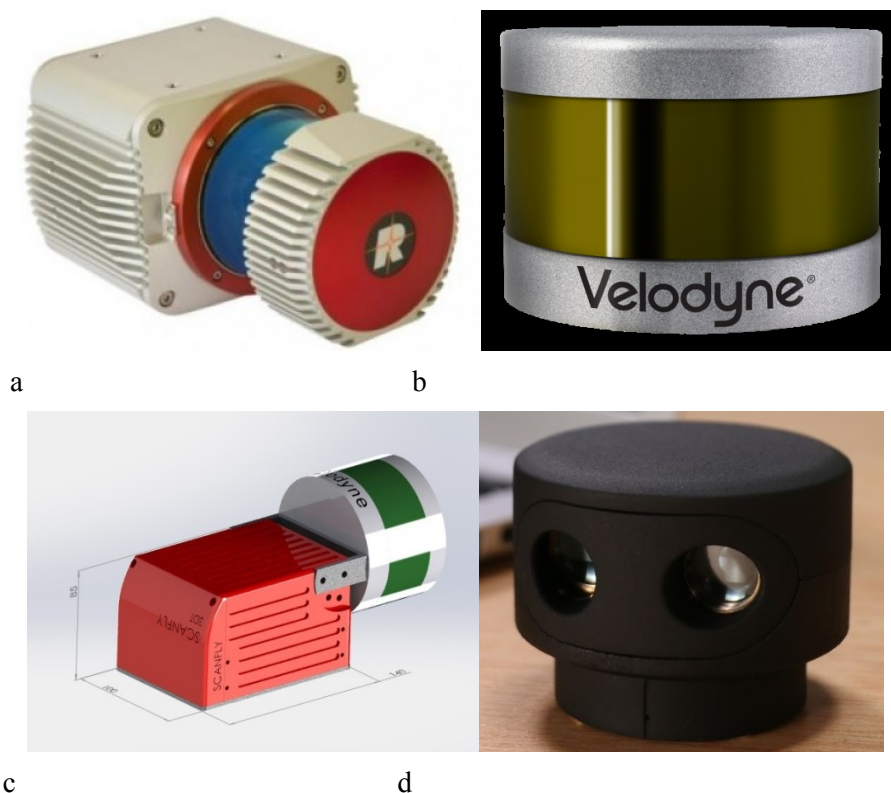
### 3.5.4 Sensori LIDAR

Un SAPR equipaggiato con uno scanner LiDAR può essere impiegato per il monitoraggio di zone agricole e foreste, difesa, mappatura di ampie zone, mappatura di alluvioni, topografia, cartografia, geologia, pianificazione territoriale (soprattutto in ambito urbanistico, catastale ed architettonico), la progettazione ingegneristica, consentendo l'individuazione e la pianificazione di infrastrutture viarie (ferrovie, strade, sentieri, ecc.) e di linee tecnologiche (elettrodotti, linee di telecomunicazioni, ecc.) e l'idrogeologia (Figura 33).



**Figura 33.** Esempi applicativi dei sensori LIDAR

I sensori LIDAR sviluppati per il rilievo da SAPR sono in genere particolarmente compatti e relativamente leggeri (meno di 4 Kg) e sono in grado di essere installati ed impiegati su SAPR di ogni genere (Figura 34). Questa tipologia di sensori sono in grado di produrre dati di alta qualità, anche operando da quote intorno ai 300 metri. Inoltre, alcune tipologie di sensori possono essere integrati da una camera panoramica che consente la documentazione fotografica dell'ambiente circostante.



**Figura 34.** Sensori LIDAR: (a) Riegl Vux-1; (b) Velodyne; (c) Scanfly; (d) SWEEP

### 3.6 SAPR dotati di GNSS con correzione RTK

Il sistema di posizionamento GNSS RTK (Real Time Kinematic) è una delle ultime tecnologie applicate ai SAPR. La miniaturizzazione dei sistemi di posizionamento RTK è in grado di aprire scenari sino a poco tempo fa impensabili per un mezzo a pilotaggio remoto.

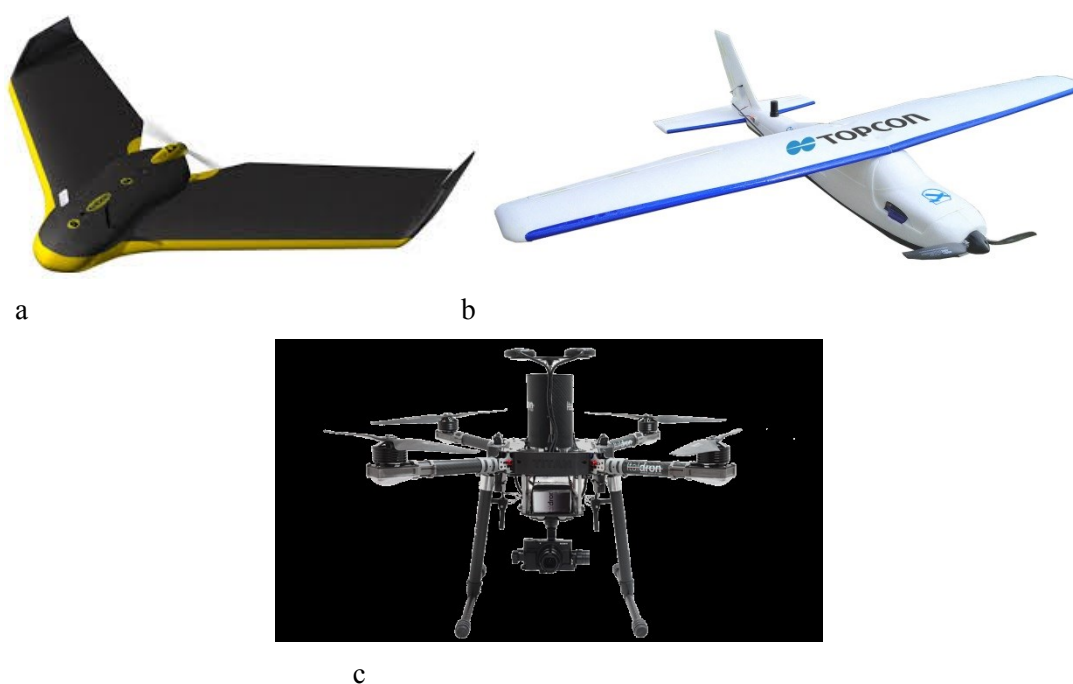
Il sistema di posizionamento GNSS RTK viene integrato sui SAPR perché consentendo di aumentare la precisione e l'accuratezza dei dati ricevuti dai satelliti, permette di ottenere una maggiore precisione, nell'ordine di pochi centimetri, sulla posizione del mezzo aereo.

I SAPR dotati di sistema GNSS con correzione RTK ben si prestano per la realizzazione di rilievi fotogrammetrici aerei di prossimità nei quali l'aspetto metrico rappresenta un parametro fondamentale. Il loro principale vantaggio dovrebbe essere quello che prescindono o quantomeno di ridurre al minimo il rilievo topografico dei punti di appoggio. Allo stato attuale non esiste una adeguata sperimentazione su questi sistemi per



poter confermare effettivamente queste condizioni. Secondo le specifiche tecniche fornite dai produttori, molti sistemi ad ala fissa dotati di correzione GNSS RTK, sarebbero in grado teoricamente di raggiungere precisioni al di sotto dei 5 cm senza l'ausilio di punti di appoggio.

Alcuni esempi di SAPR dotati di GNSS con correzione RTK sono i sistemi eBee RTK, SIRIUS PRO e TITAN 4HSE (Figura 35).



**Figura 35.** SAPR dotati di GNSS con correzione RTK: (a) eBee RTK; (b) Sirius PRO; (c) Titan 4HSE



## CAPITOLO 4- LA NORMATIVA

Il crescente sviluppo degli SAPR, sia in campo militare sia in ambito civile, ha reso fondamentale stabilire una normativa che definisca le caratteristiche e le procedure per rendere l'utilizzo di questi velivoli sicuro ed integrato in un contesto in cui possano operare insieme a velivoli pilotati. Che si tratti di Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto, destinati all'impiego in operazioni specializzate o in attività sperimentali, o di Aeromodelli, utilizzati esclusivamente per impiego ricreazionale e sportivo, il requisito di "non recare danno a persone e cose" è chiaramente prioritario per tutte le tipologie di velivoli.

Anche se a livello internazionale tutt'oggi non esiste una normativa e degli standard chiaramente definiti, le normative italiane e mondiali si pongono come obiettivo quello di definire caratteristiche e procedure che permettono di garantire un uso sicuro di questi velivoli. Per raggiungere tale scopo, ogni paese ha attivato un sistema complesso, di attività e responsabilità che interessano diversi attori tra i quali le autorità di controllo legislativo, i progettisti tecnici, i manutentori e gli operatori. Inoltre, la mancanza di un quadro normativo uniforme rappresenta un ostacolo di carattere operativo in quanto le imprese del settore devono richiedere, di volta in volta, autorizzazioni individuali alle preposte autorità di ogni Stato in cui esse intendano operare.

## 4.1 Definizione di aeromobile

Cronologicamente, la prima definizione giuridica del concetto di aeromobile è stata quella contenuta nella Convenzione per il regolamento della navigazione aerea stipulata a Parigi il 13 Ottobre 1919. Il gruppo di lavoro, formato dai rappresentanti di 12 nazioni, istituito per delineare delle norme apposite dedicate alla navigazione aerea, definisce aeromobile “ogni apparecchio che si può sostenere nell’atmosfera grazie alla reazione dell’aria”. Nonostante la scarsa adesione degli stati, questa definizione, entrata in vigore in Italia con R.D.L. 24 Dicembre 1922 n.1878, rappresenta il primo tentativo di unire più stati in un’attività normativa comune. Successivamente, nel 1944, la definizione contenuta nell’accordo francese precedente è stata ripresa dalla convenzione di Chicago indicando quindi come aeromobile “ogni macchina che possa trarre sostentamento nell’atmosfera da reazioni dell’aria diverse dalla reazione dell’aria sulla superficie terrestre”.

La definizione di aeromobile è rimasta invariata fino ad oggi e si è consolidata a livello internazionale con l’Ordinamento della Comunità Europea che ha adottato la stessa nozione della convenzione di Chicago (art.2 Regolamento CE n.2042/2003).

In ambito nazionale, dove la disciplina aeronautica prescindeva dalla definizione di aeromobile, solo nel 1925 venne emanato un regolamento per la navigazione aerea (R.D. 11 gennaio 1925 n.356). La definizione di Aeromobile adottata, oltre a definire cosa si intendesse per aeromobile, elencava le differenti classificazioni delle tipologie di mezzo considerati aeromobili. In particolare, l’art.1 del Regolamento definiva l’aeromobile come un meccanismo o una qualsiasi struttura che, utilizzando il sostentamento statico o quello dinamico dell’aria, sia atto a trasportare cose o persone.

Oggi, frutto di numerose integrazioni e modifiche nell’elencazione delle diverse classificazioni dei tipi di mezzo considerati automobili susseguitesesi negli anni, il Nuovo Codice della Navigazione nell’art.743 definisce Aeromobile “ogni macchina destinata al trasporto per aria di persone o cose”. Inoltre, il Nuovo Codice della Navigazione (Approvato con R.D. 30 marzo 1942, n. 327 e aggiornato al decreto legislativo 15 marzo 2006, n.151) considera aeromobili i mezzi aerei a pilotaggio remoto, definiti come tali dalle leggi speciali, dai regolamenti dell’ENAC e, per quelli militari, dai decreti del Ministero della difesa.

La definizione di Aeromobile adottata a livello nazionale si ispira alla convenzione di Parigi ma, probabilmente a causa di un errore dovuto alla mancata corrispondenza letterale in fase di traduzione del testo del termine aircraft (velivolo), contraddice la stessa convenzione e risulta molto limitante rispetto all'insieme delle macchine volanti. Infatti, la Convenzione di Parigi e la normativa internazionale, cui le stesse regole emanate si ispirano ed a cui mirano di armonizzarsi, sono riferite a tutti i mezzi capaci di volare contrariamente alla definizione nazionale che individua cosa sia definibile con il termine aeromobile e cosa sia da escludere da tale classificazione. Ciò è dovuto al fatto che la normativa internazionale per indicare l'oggetto del diritto aeronautico utilizza il termine "aircraft" che letteralmente in italiano si traduce con il termine generico velivolo contrariamente a quanto accaduto nella normativa italiana che ha erroneamente tradotto il termine aircraft con il termine aeromobile. L'errore appare evidente dagli stessi Regolamenti i quali utilizzano il termine aircraft (velivolo) in un'accezione più generale che permette di indicare qualsiasi apparecchio in grado di utilizzare l'aria per generare la forza necessaria al mantenimento in volo e il termine aeromobile che invece ha un significato più restrittivo in quanto tende ad individuare categorie omogenee di velivoli.

Se il regolamento italiano avesse utilizzato la traduzione letterale del termine aircraft, la definizione adottata avrebbe interessato tutti i mezzi capaci di volare, indistintamente dalla tipologia e dalle attitudini degli stessi, e sarebbe stata in linea con la Convenzione di Chicago del 1944, che è il più importante atto normativo a livello internazionale, e con i principi della Comunità Europea.

In Italia, l'unica norma che prevedeva l'impiego di questi mezzi aerei era il D.Lgs. 6 marzo 1948, n. 616, ratificata con la legge 17 aprile 1956, n. 561, che, riprendendo l'art. 8 della Convenzione di Chicago, si limitava a stabilire che "gli aeromobili senza pilota (civili, perché la Convenzione non si applica agli aeromobili di Stato) non possono sorvolare il territorio di uno Stato contraente, salvo che abbiano ottenuto l'autorizzazione speciale di detto Stato e conformemente a tale autorizzazione. Ogni Stato s'impegna ad assicurare che il volo degli aeromobili senza pilota, in zone aperte agli aeromobili civili, sia controllato in modo da evitare ogni pericolo per gli aeromobili civili".

Nessun Paese europeo aveva ancora emanato norme in materia e in nessuna nazione europea gli UAV erano stati ancora equiparati agli aeromobili ma in Italia si pensò fosse necessario avere uno strumento giuridico che offrisse agli operatori e alla catena di

comando le dovute garanzie. Sulla base di queste considerazioni, venne approvata in Italia la legge 14 luglio 2004, n. 178, prima legge emanata in Europa in materia di UAV civili o militari, recante “Disposizioni in materia di aeromobili a pilotaggio remoto delle Forze Armate”. Inoltre, spinta dalla consistente evoluzione tecnologica, dall’evoluzione della normativa, ormai differente da quella vigente nel 1942, e dall’aumento del traffico aereo l’Italia ha ritenuto necessario modificare il testo del Codice della Navigazione per adattarlo alla situazione attuale. Con i decreti legislativi del 9 maggio 2005 n.96 e del 15 marzo 2006 n.151, il legislatore italiano aggiorna la parte aeronautica del Codice della Navigazione. Gli aggiornamenti che riguardano anche la definizione di aeromobile, con riferimento all’art. 743, introducono alcuni articoli che prevedono l’inserimento degli UAV tra gli aeromobili.

Con il testo finale del nuovo art. 743 “per aeromobile si intende ogni macchina destinata al trasporto per aria di persone o cose. Sono altresì considerati aeromobili i mezzi aerei a pilotaggio remoto, definiti come tali dalle leggi speciali dai regolamenti dell’ENAC e, per quelli militari, dai Decreti del Ministero della Difesa. Le distinzioni degli aeromobili, secondo le loro caratteristiche tecniche e secondo il loro impiego, sono stabilite dall’ENAC con propri regolamenti e, comunque, dalla normativa speciale in materia”.

L’inserimento dei mezzi aerei a pilotaggio remoto tra gli aeromobili determina l’applicabilità agli stessi di tutte le regole comprese nel Codice della Navigazione e, ai sensi dell’art. 1 dello stesso testo, nelle leggi, regolamenti ed usi del diritto della navigazione, seppur con gli opportuni adattamenti.

Una sostanziale novità del Nuovo Codice della Navigazione consiste nella possibilità, per la prima volta introdotta nei testi di legge, di svolgere attività di volo in ambito civile con velivoli civili privi di pilota a bordo.

## **4.2 Normativa Italiana**

L’Italia è stata una tra le prime nazioni a dotarsi di un quadro normativo che disciplina l’utilizzo dei mezzi aerei a pilotaggio remoto. L’autorità preposta alla redazione di una normativa che regoli le operazioni condotte con questa tipologia di aeromobili è l’ENAC (Ente Nazionale per l’Aviazione Civile) che, nel dicembre 2013 ha approvato il primo

regolamento che disciplina l'impiego dei SAPR per usi professionali e ricreativi, entrato in vigore il 30 aprile 2014. Attualmente, sono state pubblicate due edizioni, rispettivamente del 16 dicembre 2013 e del 16 luglio 2015, seguite da un'ulteriore seconda edizione, emendata («Emendamento 1») e pubblicata il 21 dicembre 2015.

Allineandosi con gli orientamenti dell'ICAO ed del codice della Navigazione, l'ENAC considera gli Aeromobili a pilotaggio remoto alla pari degli aeromobili convenzionali (aeroplani e elicotteri per il trasporto di cose o persone) e ciò ha richiesto la necessità di sviluppare norme specifiche per questo settore.

La normativa ENAC, fornisce un quadro giuridico di riferimento per consentire la operazione degli aeromobili a pilotaggio remoto e fornisce anche i requisiti di safety che devono essere soddisfatti per effettuare le operazioni. In tal senso il Regolamento fornisce le risposte alle tematiche legate allo sviluppo delle attività condotte con SAPR, e propone un approccio bilanciato ai temi della sicurezza in funzione delle caratteristiche tecniche ed operative dei sistemi a pilotaggio remoto, delle modalità di occupazione dello spazio aereo, del contributo conferito dalla capacità di gestione dell'operatore e dalla qualificazione dei piloti di tali mezzi.

Naturalmente, a causa della singolarità di tale settore e a causa delle sostanziali differenze che caratterizzano lo scenario operativo, la redazione del regolamento non è stata una cosa molto facile. In particolare, la normativa si limita a regolare l'attività dei SAPR aventi massa operativa al decollo non superiore ai 150 kg e di tutti quelli progettati o modificati per scopi di ricerca, sperimentazione o scientifici ed esclude dalla regolamentazione in questione i velivoli utilizzati negli spazi indoor (a meno che non siano utilizzati per il sorvolo di assembramenti di persone o spettacoli, o simili, come previsto dall'art. 10.7 seconda edizione) e i velivoli costituiti da palloni frenati o utilizzati per osservazioni scientifiche.

Sulla base degli equipaggiamenti installati sui mezzi, il regolamento suddivide i mezzi aerei a pilotaggio remoto in due categorie:

- *Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR)*: sono i velivoli impiegati o destinati all'impiego in operazioni specializzate o in attività scientifiche, sperimentazione e ricerca. In particolare, i SAPR possono essere definiti come “sistemi costituiti da un mezzo aereo senza persone a bordo, utilizzato per fini

diversi da quelli ricreativi e sportivi, e dai relativi componenti necessari per il controllo e comando (stazione di controllo) da parte di un pilota remoto”.

- *Aeromodelli*: sono i velivoli utilizzati esclusivamente per impiego ricreazionale e sportivo senza persone a bordo, non dotati di equipaggiamenti che ne permettano un volo autonomo e che volano sotto il controllo visivo diretto e costante dell'aeromodellista, senza l'ausilio di aiuti visivi.

Nonostante gli Aeromodelli non sono considerati aeromobili ai fini del loro assoggettamento alle previsioni del Codice della Navigazione e possono essere utilizzati esclusivamente per impiego ricreazionale e sportivo il Regolamento contiene specifiche disposizioni e limitazioni applicabili all'impiego degli aeromodelli, per l'uso dello spazio aereo e a garanzia della sicurezza di cose e persone al suolo e degli altri mezzi aerei.

Oltre alla tipologia di impieghi, la differenza tra le due categorie si basa anche sulla possibilità di equipaggiare il mezzo aereo con sensori che determinano il passaggio da un aeromodello (utilizzato a scopo ludico) ad un SAPR (considerato un mezzo di lavoro).

Per fornire una disciplina delle operazioni flessibile, semplice ed efficace, mirata quindi a regolare secondo le effettive necessità, il regolamento introduce una classificazione dei SAPR per peso alla massa operativa al decollo:

- SAPR con massa al decollo massima maggiore o uguale a 25 kg e non superiore a 150 kg
- SAPR con massa al decollo massima minore di 25 kg

Un'ulteriore classificazione proposta dal regolamento è quella che si basa sulla tipologia delle operazioni condotte («specializzate» e non), accompagnata da una ulteriore distinzione fondata sulla criticità (e non) delle operazioni specializzate e su aspetti operativi legati alla capacità del pilota di rimanere o meno in contatto visivo con l'apparecchio. In particolare, l'ENAC distingue le operazioni condotte con i SAPR in operazioni di ricerca e sviluppo e in operazioni specializzate e individua per le operazioni specializzate dei livelli di criticità che consentono di distinguere le operazioni specializzate critiche dalle operazioni specializzate non critiche

Le operazioni specializzate non critiche sono tipicamente quelle condotte in uno scenario operativo nel quale, in caso di malfunzionamenti, non si prevedono danni a terzi. Invece,



le operazioni specializzate critiche sono quelle che prevedono il sorvolo di aree congestionate, assembramenti di persone, agglomerati urbani e infrastrutture sensibili. In particolare, quando si opera con velivoli di massa uguale o maggiore a 25 kg le operazioni sono da considerarsi sempre critiche (con tutto ciò che ne consegue in termini di autorizzazioni e misure di sicurezza) mentre, per i SAPR con massa *massima al decollo minore* o uguale a 2 kg, *a condizione che gli aspetti progettuali e le tecniche costruttive dell'APR abbiano caratteristiche di inoffensività*, e per i velivoli con massa al decollo inferiore o uguale a 300 g, con parti rotanti protette da impatto accidentale e con velocità massima minore o uguale a 60 km/h, il regolamento considera le operazioni specializzate condotte con questa tipologia di mezzi sempre come operazioni “non critiche” in tutti gli scenari operativi ad eccezione delle operazioni che prevedono il sorvolo di assembramenti di persone, per cortei, manifestazioni sportive o inerenti forme di spettacolo o comunque di aree dove si verificano concentrazioni inusuali di persone.

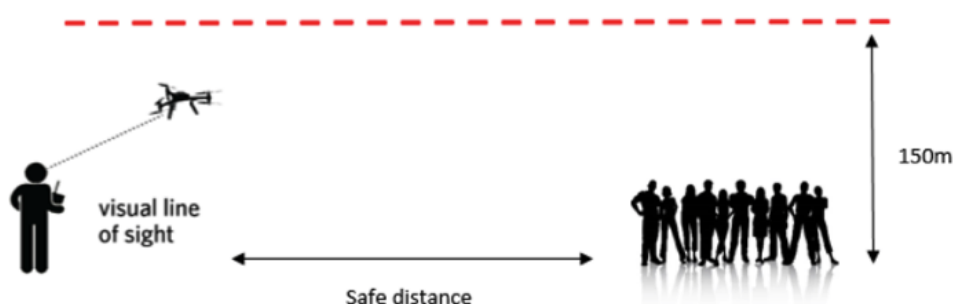
Sulla base degli aspetti operativi legati alla capacità del pilota di rimanere o meno in contatto visivo con l'apparecchio, le operazioni condotte con l'utilizzo dei SAPR sono di 3 tipi:

- **Visual Line of Sight (VLOS)**: operazioni condotte entro una distanza, sia orizzontale che verticale, tale per cui il pilota remoto è in grado di mantenere il contatto visivo continuativo con il mezzo aereo, senza aiuto di strumenti per aumentare la vista
- **Extended Visual Line Of Sight (EVLOS)**: operazioni condotte in aree le cui dimensioni superano i limiti delle condizioni VLOS e per le quali i requisiti del VLOS sono soddisfatti con l'uso di metodi alternativi
- **Beyond Line Of Sight (BLOS)**: operazioni condotte ad una distanza che non consente al pilota remoto di rimanere in contatto visivo diretto e costante con il mezzo aereo, che non consente di gestire il volo, mantenere le separazioni ed evitare collisioni

Al fine di assicurare il requisito di sicurezza per le operazioni di volo, assumono particolare importanza l'esistenza di procedure operative, normali e di emergenza, la capacità del pilota di controllare il volo ed il contesto ambientale in cui si svolgono le operazioni, dalla libertà dello spazio aereo alle regole che ne determinano l'utilizzo, fino alla compatibilità delle condizioni meteo con le performance espresse dall'APR.

L'attuale regolamento prevede che le operazioni in VLOS e le operazioni in EVLOS, con tutte le tipologie di SAPR, siano consentite fino ad una distanza massima sul piano orizzontale di 500 m e fino ad un'altezza massima di 150 m (figura 36) e suddivide le operazioni condotte in funzione della criticità delle stesse. Il Regolamento offre la possibilità di valutare distanze e altezze superiori che, caso per caso, andranno autorizzate dall'ENAC a seguito della presentazione di adeguata valutazione del rischio da parte dell'operatore SAPR.

In casi specifici, le operazioni non critiche condotte in VLOS e EVLOS possono essere svolte dai SAPR con massa operativa al decollo minore di 25 Kg assicurando una distanza orizzontale di sicurezza di almeno 150 m dalle aree congestionate e ad almeno 50 m da persone che non sono sotto il diretto controllo dell'operatore SAPR; le operazioni critiche in VLOS, invece, è richiesto un adeguato livello di sicurezza che può essere dimostrato tramite l'utilizzo di due sistemi indipendenti e dissimilari, di comando e controllo e di terminazione del volo.

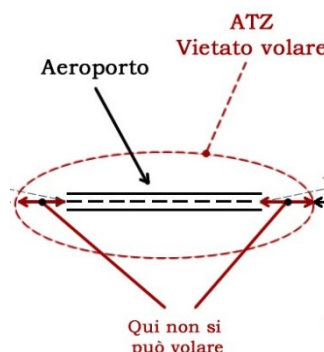


**Figura 36.** Condizioni affinché un'operazione sia condotta in VLOS e EVLOS

Nonostante il nuovo regolamento rispetto ai precedenti introduce ulteriori vincoli tecnici, concede maggior libertà di manovra. In generale, al fine di garantire le condizioni di sicurezza, fatta eccezione per il divieto tassativo di volare all'interno delle aree regolamentate attive e delle aree proibite e di sorvolare zone di assembramento di persone, il Regolamento stabilisce che le operazioni dei SAPR in VLOS e EVLOS non possono essere condotte all'interno dell'ATZ<sup>1</sup> di un aeroporto e nelle aree sottostanti le

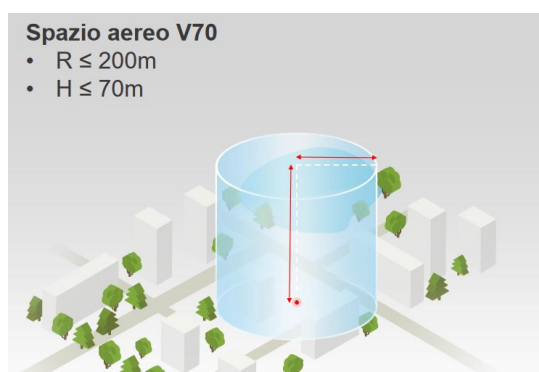
<sup>1</sup> Aerodrome Traffic Zone: spazio aereo di dimensioni definite, in genere di forma cilindrica, istituito intorno ad un aeroporto per la protezione del traffico di un aerodromo, cioè quello in decollo, atterraggio e in volo nel circuito di traffico aeroportuale.

traiettorie di decollo ed atterraggio, oppure ad una distanza inferiore a 5 km dall'aeroporto, laddove non sia istituita una ATZ a protezione del traffico di aeroporto. (Figura 37).



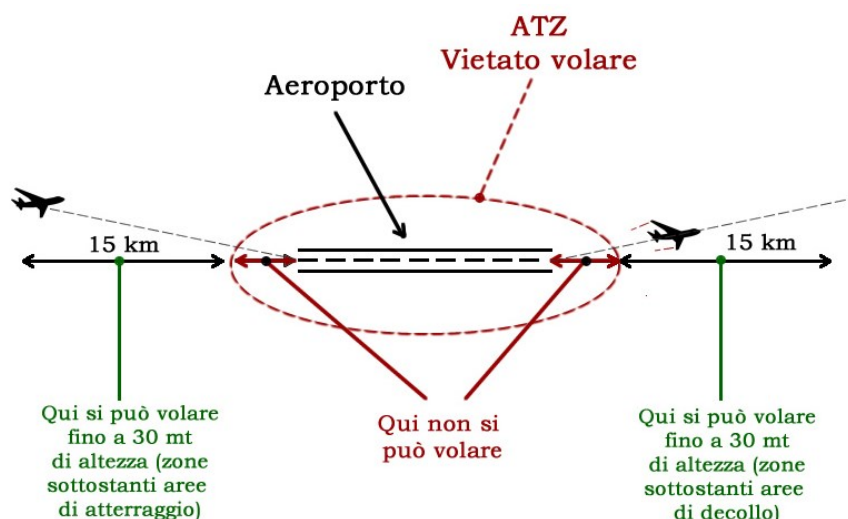
**Figura 37.** Schema aeroporto controllato da ATZ

Inoltre, nonostante le operazioni dei SAPR non possono essere condotte all'interno delle CTR<sup>2</sup>, il Regolamento prevede che i sistemi con mezzi aerei di massa operativa al decollo minore di 25 kg possono volare all'interno delle CTR purché sia garantita un'altezza massima di 70 m e una distanza massima sul piano orizzontale di 200 m (Figura 38). Tuttavia, all'interno delle CTR le operazioni con i SAPR sono consentite nelle aree sottostanti le traiettorie di decollo e atterraggio oltre i limiti dell'ATZ e fino a 15 km dall'aeroporto ad un'altezza pari a 30 m (Figura 39).



**Figura 38.** Schematizzazione dei limiti all'interno delle CTR

<sup>2</sup> Control Zone: spazio aereo controllato posto in corrispondenza di uno o più aerodromi che si estende verso l'alto a partire dalla superficie del suolo fino a un limite superiore specificato.



**Figura 39.** Schema delle eccezioni all'interno delle CTR

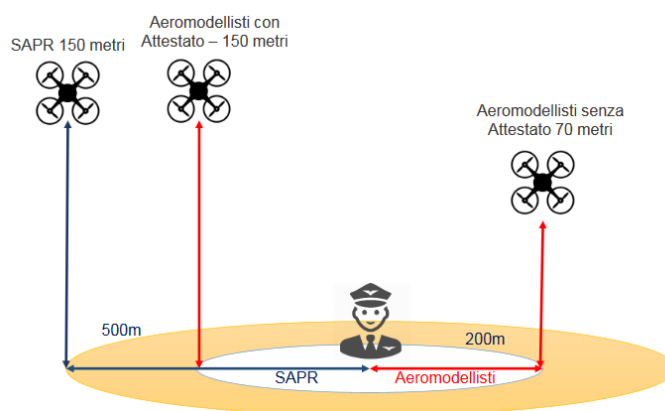
Contrariamente alle operazioni condotte in VLOS, le operazioni in BLOS possono essere condotte esclusivamente all'interno di spazi aerei segregati (temporanei o permanenti).

Per la conduzione di APR in operazioni BLOS è necessario il possesso di una Licenza di Pilota di APR rilasciata dall'ENAC.

I limiti di distanza e altezza di volo all'interno delle CTR e le limitazioni all'interno delle ATZ sono validi anche per gli aeromodelli (sezione VII) per i quali, se assicurati particolari requisiti (massa operativa al decollo, carico alare, superficie alare, potenza dei motori, ecc.) non è richiesta la riserva dello spazio aereo. Inoltre, sulla base delle limitazioni imposte dal Regolamento ENAC, l'attività di volo con gli aeromodelli ad altezze superiori ai 70 m, e comunque ad una distanza massima di 200 m, è permessa solo ed esclusivamente se il pilota sia titolare di un Attestato di aeromodellista con abilitazione al pilotaggio di aeromodelli rilasciato dall'Aero Club d'Italia e comunque al di fuori delle aree proibite o regolamentate (Figura 40).

Se da un lato l'emanazione di un regolamento è un passo importante verso l'impiego dei SAPR in un contesto che garantisca la sicurezza ed il rispetto dei diritti di tutti, dall'altro lato si è temuto che l'eccessiva burocratizzazione potesse essere un freno allo sviluppo di questo nuovo settore economico. Per tale motivo, una sostanziale revisione, in vigore dal settembre 2015 ha modificato il regolamento che ha introdotto la possibilità di utilizzare il SAPR per "consentire lo svolgimento di attività di ricerca pura o finalizzata alla verifica

di determinate concezioni di progetto del SAPR stesso o di nuovi equipaggiamenti, nuove installazioni, tecniche di impiego od usi”.



**Figura 40.** Limiti di altezza per SAPR e aeromodelli

L'attuale normativa sui mezzi aerei a pilotaggio remoto prevede che l'impiego dei SAPR sia subordinato ad una serie di condizioni generali enunciate nell'art. 8, come la dotazione di un manuale di volo, l'installazione di un dispositivo per la terminazione del volo, che consente la terminazione del volo all'interno dell'area di buffer (l'area intorno a quella delle operazioni, stabilita per garantire i livelli di safety applicabili per la tipologia di operazioni), l'installazione di un dispositivo elettronico di identificazione che consenta la trasmissione in tempo reale dei dati inerenti all'APR e al proprietario/operatore, dei dati essenziali di volo, l'apposizione, sia sul mezzo aereo che sulla stazione a terra di una targhetta riportante i dati identificativi del sistema e dell'operatore. Oltre alla targhetta e al dispositivo elettronico di identificazione, l'attuale regolamento prevede anche che I SAPR con massa uguale o maggiore di 25 kg, che effettuano attività all'interno dello spazio aereo italiano devono inoltre essere registrati dall'ENAC mediante iscrizione nel Registro degli Aeromobili a Pilotaggio Remoto con l'apposizione di marche di registrazione dedicate.

Dal punto di vista autorizzativo, il Regolamento stabilisce che il SAPR deve essere condotto da un pilota in possesso di un appropriato riconoscimento di competenza valido (sezione IV) e a tal fine prevede un iter differenziato in relazione alla massa del mezzo, alla criticità delle operazioni e ad altre condizioni esplicitate nella richiesta.

In particolare, per i SAPR con massa al decollo massima maggiore o uguale a 25 kg e non superiore a 150 kg è sempre prevista una certificazione del mezzo aereo, la Licenza di pilota e un'autorizzazione dell'ENAC, indipendentemente dalla criticità delle operazioni di volo. Per tali mezzi, infatti, si mantiene la stessa tipologia di regolamentazione in uso per gli aeromobili tradizionali, certificazioni di aeronavigabilità e autorizzazione all'impiego.

Invece, per i SAPR con massa al decollo massima minore di 25 kg il Regolamento prevede che per effettuare le operazioni critiche l'operatore deve richiedere e ottenere l'autorizzazione dell'ENAC, per effettuare operazioni non critiche, l'operatore deve presentare all'ENAC una dichiarazione che, oltre a lasciare all'operatore la responsabilità di valutare criticità e idoneità del sistema, attesti la rispondenza al Regolamento.

Il Regolamento prevede inoltre che la domanda di autorizzazione o la dichiarazione per effettuare operazioni specializzate con SAPR con massa al decollo massima minore di 25 kg può essere presentata all'ENAC solo dopo che l'operatore abbia completato con esito positivo la relativa attività di volo sperimentale propedeutica alle operazioni. Inoltre, al fine di ottenere l'autorizzazione o effettuare la dichiarazione, è necessario che l'operatore dimostri di disporre di un'organizzazione tecnica ed operativa adeguata all'attività e che si doti di un manuale delle operazioni che definisce le procedure necessarie per gestire le attività di volo e la manutenzione dei sistemi. Il manuale include le modalità con cui l'operatore effettua l'analisi del rischio associato alle operazioni e la gestione delle relative mitigazioni.

Per i SAPR con massa operativa al decollo minore o uguale a 2 kg, che possono operare anche in agglomerati urbani, senza bisogno di specifica autorizzazione, il regolamento non prevede alcun tipo di autorizzazione ma solo una dichiarazione con cui il pilota, assicura la corretta conduzione del mezzo e l'effettuazione della manutenzione prevista.

La stessa procedura vale anche per i SAPR con massa al decollo massima minore o uguale a 0,3 kg, per cui, la realizzazione di operazioni specializzate, purché condotte con velocità massima minore o uguale a 60 km/h e purché i velivoli abbiano le parti rotanti protette da impatto accidentale, non è soggetta ad alcuna autorizzazione ma solo alla presentazione presso ENAC di una dichiarazione.

Per i SAPR con massa al decollo massima minore di 25 kg il Regolamento prevede anche la possibilità di sorvolare aree urbane purché il volo sia condotto in VLOS e purché si dimostri un accettabile livello di sicurezza.

Come si è già detto, al fine di garantire un livello di sicurezza adeguato, è fondamentale il riconoscimento del ruolo dei piloti mediante un titolo aeronautico personale che ne attesti il percorso formativo e la capacità di conduzione appare un passaggio fondamentale per costruire un sistema sicuro ed adeguato alle caratteristiche del settore. Dal punto di vista autorizzativo, infatti, il Regolamento prevede anche che il SAPR debba essere condotto da un pilota in possesso del riconoscimento della competenza in stato di validità. A tale scopo, in funzione alla tipologia di operazioni condotte, sono previsti l'Attestato di Pilota e la Licenza di Pilota. L'Attestato di Pilota, rilasciato da un Centro di Addestramento, per categorie di SAPR, ha una validità di cinque anni, contiene le limitazioni operative per l'esercizio dei privilegi ad esso associati ed è sufficiente per la conduzione delle operazioni in condizioni VLOS. Per ottenere l'Attestato di Pilota il richiedente deve: essere in possesso di una certificazione medica che attesti l'idoneità psicofisica rilasciata da un Esaminatore Aeromedico (Aero Medical Examiner - AME) secondo gli standard relativi alla licenza LAPL, di cui al Regolamento (UE) n. 1178/2011; frequentare un corso di formazione presso un Centro di Addestramento APR autorizzato e acquisire la conoscenza delle regole dell'aria applicabili, delle cognizioni aeronautiche di base, degli aspetti di safety e dei rischi operativi; effettuare con esito positivo un programma di addestramento sul tipo o classe di APR da condurre; infine, superare un esame pratico con un Esaminatore presso un Centro di Addestramento APR autorizzato. La Licenza di Pilota, rilasciata sulla base delle procedure in uso per il rilascio delle altre licenze per il personale di volo, invece, è prevista per le operazioni condotte in BLOS o per gli SAPR di massa uguale o superiore a 25 kg.

Dal punto di vista assicurativo, l'articolo 32, del Regolamento ENAC attuale (già previsto dall'edizione 2013) impone che le operazioni condotte con un SAPR siano soggette alla stipula di un'assicurazione per la Responsabilità Civile verso terzi.

Sotto il profilo della protezione dei dati personali, il regolamento richiama la normativa nazionale, e specifica all'art. 22 che nel caso in cui le operazioni svolte attraverso un SAPR possano comportare un trattamento di dati personali, tale circostanza dovrà essere menzionata nella documentazione sottoposta ai fini del rilascio della pertinente

autorizzazione. Il trattamento dei dati personali deve essere effettuato in ogni caso nel rispetto del decreto legislativo 30 giugno 2003, n. 196 e successive modificazioni (Codice in materia di protezione dei dati personali), con particolare riguardo all'utilizzo di modalità che permettano di identificare l'interessato solo in caso di necessità ai sensi dell'art. 3 del Codice, nonché delle misure e degli accorgimenti a garanzia dell'interessato prescritti dal Garante per la protezione dei dati personali (informativa privacy). Il profilo della protezione dei dati deve inoltre essere previsto nei contratti e accordi fra operatori del SAPR e committenti (v. art. 6, terzo comma del regolamento).

Nel caso di operazioni specializzate per conto terzi, in merito alla prassi da seguire, alcune associazioni di settore (per esempio ASSORPAS, Associazione Italiana per i Light RPAS) hanno redatto appositi formulari contrattuali, utilizzabili dai propri associati, che stabiliscono le regole essenziali del rapporto tra le parti, rispettivamente indicate come «Operatore» e «Committente».

### 4.3 Normativa Europea

Dato il crescente sviluppo dei SAPR, sia in campo militare sia in ambito civile, e data la loro classificazione come aeromobili, si è reso fondamentale stabilire una normativa che definisca le caratteristiche e le procedure per rendere l'utilizzo di queste macchine sicuro ed integrato in un contesto in cui possano operare insieme a velivoli pilotati.

Ancora oggi, a livello europeo, non esiste però una normativa definitiva ma un quadro regolamentare frammentato che fa riferimento alle norme nazionali di base in materia di sicurezza, variabili da uno Stato all'altro e che non affrontano in modo coerente diversi aspetti sulla sicurezza. Infatti, a livello internazionale, nonostante diversi progetti e programmi, non esistono ancora degli standard chiari.

Il primo tentativo di regolamentare i mezzi aerei a pilotaggio remoto risale al 2002, anno in cui la Joint Aviation Authorities (JAA) ed EUROCONTROL hanno stilato un modello per la regolamentazione dei velivoli pilotati in remoto in ambito civile, con particolare riguardo alla sicurezza, aeronavigabilità, operatività, gestione e licenze. Ma queste norme non furono applicate ai SAPR con massa al decollo inferiore ai 150 kg perché la loro regolamentazione è affidata agli organi nazionali.



Le prime azioni verso una regolamentazione specifica sono state intraprese dall’Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (EASA) nel 2009, con l’emanazione della Policy Statement Airworthiness Certification of Unmanned Aircraft System (UAS), relativa ai SAPR civili aventi massa massima al decollo (MTOM) superiore ai 150 kg.

Successivamente, nel 2010, l’ICAO (International Civil Aviation Organization) emana la circolare n.238 “Unmanned Aircraft System (UAS)”, con lo scopo di regolamentare la disciplina degli aeromobili con massa al decollo superiore ai 150 kg senza pilota a bordo.

Solo recentemente, con la Dichiarazione di Riga emanata il 12 marzo del 2015, il quadro regolamentario per disciplinare l’uso dei SAPR in Europa raggiunge il suo apice. Ad oggi, però, dei 28 stati membri dell’UE soltanto una decina hanno un quadro normativo nazionale, fra cui Regno Unito, Italia, Francia e addirittura oltreoceano ci sono gli Stati Uniti e il Brasile, che hanno tuttora proposte in fase di approvazione, o il Canada e l’Australia che posseggono un quadro normativo parziale.

A settembre 2015, la Commissione Trasporti e Turismo del Parlamento Europeo ha approvato la Relazione Foster, redatta dall’Europarlamentare Jacqueline Foster, vicepresidente dell’Inter-gruppo parlamentare “Sky & Space”. La relazione, la prima approvata dall’Europarlamento con riguardo ai SAPR civili, in un contesto nel quale non esiste ancora una normativa a livello europeo, mira a realizzare l’obiettivo dichiarato dal Consiglio europeo di dicembre 2013, ossia una progressiva regolamentazione che integri i SAPR nello spazio aereo, già a partire dal 2016, e non crei intralci allo sviluppo, ma salvaguardi privacy e sicurezza.

La Dichiarazione di Riga del marzo 2015 si colloca in questo scenario, caratterizzato dagli sforzi della Commissione Europea verso l’elaborazione di un set di regole standard per coprire gli aspetti di safety, security, privacy, assicurazione e responsabilità.

Il documento, che riprende molti dei temi già affrontati nella Comunicazione della Commissione Europea COM 207 dell’anno precedente (2014), “A new era for aviation - opening the aviation market to the civil use of remotely piloted aircraft systems in a safe and sustainable manner”, ha come obiettivo quello di adottare un approccio basato sul livello di rischio, attraverso norme che stimolino e non reprimano lo sviluppo di un settore che coinvolge più di 2.500 operatori. Inoltre, il documento approva e sancisce l’importanza dell’integrazione a livello normativo delle politiche sui SAPR con i

programmi europei in tema di aviazione, quali la Single European Sky Air Traffic Management Research (SESAR) e anche Horizon 2020 e in termini di privacy, regole dell'aria, sanzioni, diritto ambientale e proprietà intellettuale così come aveva già sancito l'art. 29 Working Party.

Dal punto di vista operativo, il documento dell'Europarlamento, per quanto riguarda la navigazione, prevede che i SAPR debbano essere equipaggiati con sistemi di "see and avoid", per rilevare gli aeromobili che condividono lo stesso spazio aereo, e che si debba tenere conto anche delle no-fly zones, come gli aeroporti e le infrastrutture critiche. Altro argomento certamente importante è quello della privacy; il report ritiene che non sia necessaria una regolamentazione specifica, ma raccomanda l'armonizzazione delle linee guida a livello nazionale per trovare un equilibrio tra le esigenze di privacy e la necessità di non porre vincoli troppo stringenti sugli operatori.

Da quanto detto sopra, si coglie come il regolamento dell'europarlamento sottolinea la necessità di una regolamentazione armonica che consenta di riaffermare il primato europeo in un settore in grandissimo sviluppo.

Nello stesso periodo, la Commissione europea ha ritenuto opportuno adottare nuove norme più rigorose per disciplinare l'uso dei SAPR in ambito civile e a tale scopo ha incaricato l'EASA (Agenzia Europea per la Sicurezza dell'Aviazione), le cui competenze ad oggi sono limitate ai veicoli di massa superiore ai 500 Kg, di sviluppare un insieme di norme europee per garantire un utilizzo sicuro dei sistemi aerei pilotati in remoto.

L'EASA, acronimo di European Aviation Safety Agency, è l'Autorità europea per la sicurezza aerea, nata nel 2002, con sede a Colonia, in Germania, e conta più di 650 funzionari ed esperti provenienti da tutta Europa. Il suo principale approccio si basa sulle analisi del rischio: maggiore è il potenziale pericolo e più alte diventano le caratteristiche richieste al pilota e al velivolo a pilotaggio remoto; minore il rischio più bassi i requisiti obbligatori.

La necessità di garantire uno sviluppo dei SAPR affidabile e sostenibile oltre che nel rispetto della sicurezza anche nel rispetto della privacy dei cittadini e della protezione dei dati ha spinto l'EASA a proporre delle modifiche alle norme già esistenti in materia di aviazione, in modo da tener conto degli ultimi sviluppi nel settore dei SAPR. Infatti, le norme UE sulla privacy, applicate fino a questo momento, perdono la loro efficacia in

quanto non tengono conto delle attività di raccolta di dati personali operate dall'intelligence, dalla polizia o giornalisti, e neppure delle attività private delle persone, non garantendo così sufficiente protezione dei diritti fondamentali dei cittadini.

La necessità di adottare una normativa comune almeno all'interno della Comunità Europea, è spinta soprattutto dall'attuale frammentazione della normativa causata dal fatto che, ad oggi, le norme per l'aviazione, in applicazione del regolamento (CE) N. 216/2008, assimilano i mezzi aerei a pilotaggio remoto con massa al decollo superiore ai 150 kg agli aeromobili convenzionali (con pilota a bordo), mentre, i mezzi aerei a pilotaggio remoto al di sotto di questo peso impongono, a ciascuno stato membro dell'EASA, di regolamentarne l'utilizzo in base alle proprie esigenze. Poiché gli operatori desiderano lavorare in tutta l'Unione Europea con le stesse norme, ciò sta creando interpretazioni differenti da Paese a Paese perché gli stati membri sono costretti a reagire rapidamente formulando ognuno una propria normativa.

Infatti, per esempio, mentre in Italia, l'ENAC ha pubblicato il regolamento che classifica i mezzi con massa massima al decollo minore di 25 kg, per i quali non è richiesta la certificazione di aeronavigabilità ma specifiche autorizzazioni e limitazioni, e quelli di massa massima uguale o maggiore, per i quali serviranno la certificazione di aeronavigabilità, registrazione, identificazione con marche apposte sul mezzo e sulla stazione di controllo, nome del costruttore, tipo e numero di serie, a un passo da noi, in Francia, questo tetto è elevato fino ai 150 Kg sia per i voli a vista che per quelli da remoto.

Su questo tema, l'ICAO, l'autorità internazionale per l'aviazione civile, già dal 2015 sta lavorando per definire delle linee guida generali alle quali dovranno adeguarsi i Paesi aderenti all'organizzazione entro il 2018, e l'Easa, ha pubblicato un regolamento definito "A-NPA-2015-10" (Advance Notice of Proposed Amendment) dal titolo "Introduction of a regulatory framework for the operation of drones", che evidenzia i rischi nell'uso dei SAPR in particolare nei cieli urbani o in aree aperte al traffico civile e definisce norme di sicurezza europee comuni per le operazioni dei SAPR indipendentemente dal loro peso.

In particolare, il documento propone un approccio che pone l'attenzione su "come" e "in quali condizioni" viene utilizzato il SAPR e propone di collocare sotto le normative di sicurezza sia le attività commerciali sia quelle non commerciali.

Le Istituzioni Europee stanno spingendo soprattutto per regolamentare questa seconda tipologia d'impiego, poiché, sarebbero proprio gli operatori che pilotano gli aeromodelli "per divertimento" quelli che causano i maggiori problemi, violando con i loro apparecchi leggi già esistenti, riguardanti la sicurezza e la privacy.

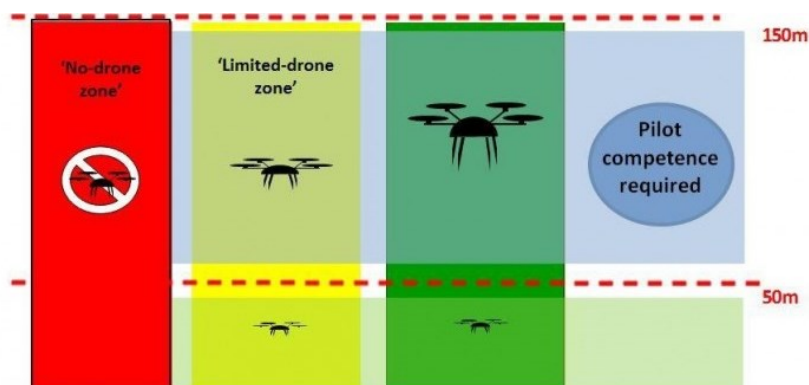
Tuttavia, i passi fondamentali verso l'elaborazione di un articolato normativo ad hoc sono contenuti nel documento di sintesi «Concept of Operations for Drones», del marzo 2015, in cui si suggerisce un approccio diverso, fondato sull'analisi del rischio delle operazioni associate ai droni e tale da risultare sufficientemente flessibile per le necessità dell'industria e del settore dei servizi.

In base all'emanazione da parte di EASA di una Opinion tecnica, che modifica il documento "Concept of Operations for Drones" del 18 dicembre 2015, frutto di una valutazione effettuata in parallelo con l'elaborazione della bozza di proposta di modifica al Regolamento 216/2008/CE e confluita in un documento contenente ventisette proposte di regolamentazione, i SAPR sono assoggettati a norme di sicurezza europee comuni per le operazioni dei SAPR.

L'attuale versione del documento EASA "Concept of Operations for Drones" introduce tre categorie di operazioni, distinguendo tre livelli di operatività, che si basano sui rischi verso terzi (persone o proprietà). Il primo, Open category, è riservato ad azioni con SAPR a basso rischio, lontani da aree a rischio sicurezza e dagli aeroporti, per cui non è necessario richiedere permessi alle autorità aeronautiche e basta rispettare i limiti previsti per le operazioni di massimo 500 metri di ampiezza e massima di 150 metri di altezza; Il secondo, Specific category, è riservato ad operazioni più rischiose per gli operatori che dovranno essere preventivamente autorizzate dalle autorità aeronautiche; infine, Certified category, che rappresenta il livello più alto a cui è più difficile accedere e che riguarda tutti i movimenti più rischiosi, paragonabili per questo a quelli che oggi rientrano nei voli eseguiti con velivoli con pilota a bordo. Per quest'ultima classe, occorrerà ottenere preventivamente una speciale certificazione che di fatto associa la possibilità di utilizzo dei velivoli più grandi e complessi a quella di un vero e proprio aereo con pilota a bordo.

EASA propone inoltre l'individuazione di una serie di zone in cui limitare i voli dei SAPR (Figura 41). L'autorità competente di ogni Stato può individuare delle aree definite "no-drone zone" in cui nessuna operazione è consentito senza l'approvazione dell'autorità stessa, e "zone limitate-drone, all'interno delle quali i SAPR per poter volare devono

essere dotati di sistemi che consentono una facile identificazione e una limitazione automatica dello spazio aereo.



**Figura 41.** Classificazione EASA delle zone di volo di un SAPR

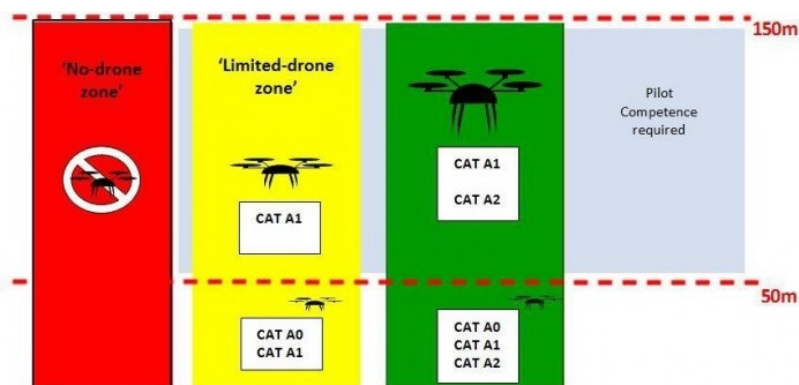
All'interno della Open category, cui afferiscono i SAPR fino a 25 Kg di peso, EASA effettua un'ulteriore suddivisione, che poco si discosta da quella proposta dall'ENAC se non per differenze riguardo altezze, limiti di peso e quote di volo, e individua tre classi di mezzi a pilotaggio remoto (Figura 42):

**CLASSE A0 – SAPR fino a 999 grammi.** Potranno volare liberamente eccetto che nelle zone “No-Drone-Zone” e non richiederanno attestati da parte del pilota, a patto di non superare i 50 metri di altitudine (per ENAC sono 150 metri).

**CLASSE A1 – SAPR da 1 a 3,99 Kg.** Potranno volare liberamente, sempre sotto i 50 metri di altezza, ma richiederanno riconoscimenti del pilota crescenti al crescere dello scenario di rischio.

**CLASSE A2 – SAPR da 4 a 25 Kg.** Non potranno volare in zone urbane e dovranno avere diverse caratteristiche tecniche di sicurezza di elevato livello tecnologico.

Ma il peso del velivolo non è il solo criterio utilizzato. Come il regolamento ENAC, anche il regolamento EASA, si basa sulla regola di buon senso che rende crescenti le richieste di riconoscimento per il pilota e le caratteristiche tecniche per il drone al crescere del rischio delle aree di sorvolo.



**Figura 42.** Limiti di volo in funzione delle zone e del peso del SAPR

Dal punto di vista della sicurezza, i SAPR utilizzati in ambito civile possono essere oggetto di azioni potenzialmente illecite e di minacce per la sicurezza, come gli altri aeromobili. A tale scopo, l'AESA ha introdotto nel documento "Concept of Operations for Drones" le necessarie prescrizioni di sicurezza, nella fattispecie quelle intese a tutelare i flussi di informazioni. Il regolamento EASA stabilisce che la reale applicazione delle misure di sicurezza nella Open Category, debba essere garantita dalle forze di polizia che attraverso un minimo insieme di norme, hanno l'obiettivo di descrivere i limiti operativi per le operazioni dei SAPR senza restringere gli utilizzi innovativi e garantendo al tempo stesso la sicurezza per tutte le terze parti (persone e proprietà).

Più severe, secondo il concetto di rischio delle operazioni, le limitazioni per i SAPR appartenenti alla classe A1 con un peso compreso tra 1 e 4 kilogrammi per cui è necessario l'attestato per il pilota e l'identificazione elettronica del SAPR. Ancora più restrittive le condizioni di volo per i SAPR della classe A2, compresi tra i 4 e i 25 Kg di peso, che non possono essere assoggettati alla Open Category e hanno il divieto al sorvolo delle zone urbane dato l'alta possibilità di creare seri incidenti in caso di caduta o gravi faillure di sistema.

Ma le condizioni di volo variano a seconda che i velivoli operano in modalità Visual Line of Sight (VLOS, ovvero a distanze tali da consentire al pilota di rimanere in contatto visivo con il drone, senza aiuto di dispositivi ottici e/o elettronici, e di rispettare le regole dell'aria applicabili allo spazio aereo interessato, oppure in modo Beyond Visual Line of Sight (BVLOS), con il pilota non in contatto visivo diretto e costante con l'aereo.

Il pilota in comando, responsabile delle operazioni di volo, come pre-requisito per richiedere l'autorizzazione come pilota remoto di SAPR deve essere in possesso di una

licenza di volo civile o dell'attestato Vds-Avanzato secondo il Dpr 133/2010 o di Cpl in caso di attività commerciali. Sopra i 150 kg interverrà Easa con la certificazione (anche del sistema di controllo remoto, per il quale si parla di requisiti di "integrity"), rilasciando il Permit To Fly e ipotizzando anche una licenza apposita (Remote Pilot License).

A settembre 2015, nel documento dal titolo "Una proposta per la definizione di norme comuni per il funzionamento dei droni in Europa", per impedire che si possa volare inavvertitamente all'esterno dell'area di sicurezza e al fine di migliorare la conformità alle norme applicabili, si propone di imporre il "geo-fencing" (l'area in cui il drone non può volare, definita via software) e l'identificazione per alcuni SAPR e per alcune aree operative e chiarisce, rispetto alla normativa ENAC, il termine "assembramento di persone" definendo "assembramento" un numero uguale o superiore a 12 persone.

L'Unione Europea, all'inizio del 2015, con la "Dichiarazione di Riga sui droni per usi civili" ha espresso anche la necessità di norme internazionali con le quali sia possibile identificare il pilota o l'operatore di un drone. La dichiarazione impone la presenza di una carta d'identità elettronica per ogni drone e di una polizza assicurativa come gli altri mezzi di trasporto. Ciò consente all'operatore di essere facilmente individuato dalle autorità nel momento in cui si fa volare un mezzo aereo a pilotaggio remoto in uno spazio aereo vietato, o si eseguono manovre pericolose o lo si utilizza per commettere reati.

Già nel 2014, la Nasa aveva lanciato un progetto per la creazione di un sistema di gestione per i velivoli che volano a 400 - 500 metri da terra, quota di gran lunga inferiore alla quota di crociera di un aereo convenzionale. Oggi la stessa Nasa ha coinvolto molte aziende, università e agenzie federali per monitorare il volo degli aerei tradizionali elaborando i dati forniti da 650 stazioni terrestri. Queste stesse stazioni, opportunamente attrezzate per le basse quote, permetterebbero di controllare anche il volo dei SAPR.

Il sistema, una volta messo a punto, dovrebbe essere capace di verificare la presenza di traffico a bassa quota, e, allo stesso tempo, aiutare i piccoli velivoli senza pilota a non scontrarsi contro edifici e altri ostacoli. I dati dovrebbero inoltre incrociarsi con le previsioni meteo, per evitare che avverse condizioni meteorologiche potrebbero abbattere il SAPR.

Anche in Europa ci si sta muovendo sullo stesso terreno. La rivista italiana Dronezine racconta dell'esperimento del consorzio francese TEMPAERIS per gestire il volo di un

SAPR nell'ambito del circuito di atterraggio dell'aeroporto civile di Bordeaux-Merignac. I comandi del velivolo erano tutti gestiti dalla stazione a terra, anche se a bordo del MCR4S c'era comunque un pilota vero, pronto a intervenire in caso di emergenza. È stata simulata ogni sorta di avaria (perdita di collegamento radio, avaria del GNSS, ecc.) e l'esperimento è perfettamente riuscito.

In Italia, invece, si sta lavorando ai rilevatori di ostacoli in volo, con un progetto del FabLab Ivrea basato su software open source e hardware Arduino. I ricercatori piemontesi proseguono così la loro attività per incrementare la sicurezza dei droni.

### FRANCIA

Analogamente a quanto accaduto in Italia, con il nuovo regolamento ENAC, in vigore dal 15 settembre, anche in Francia dal 1 gennaio 2016 è entrata in vigore una nuova versione della normativa sui droni.

Il nuovo regolamento francese sui droni, frutto del lavoro compiuto dalla DGAC (la nostra ENAC) e da diverse associazioni di categoria come la FFAM (aeromodellisti), DSAC, FPDC (professionisti), introduce semplificazioni e interessanti novità, sia per quanto riguarda l'uso professionale che per l'aeromodellismo e gli usi ludici/sportivi.

Per l'ambito aeromodellistico, le principali novità del nuovo regolamento francese, consistono nell'ufficializzazione delle gare dei droni pilotati in prima persona, l'FPV Racing purché il mezzo non superi i 2 kg di peso, i 200m di distanza dal pilota e un'altezza massima di 50m. E' necessario però un osservatore che, seppur non obbligato ad essere collegato in doppio comando, ha il compito di informare il pilota su potenziali pericoli e di intervenire nei casi estremi per porre fine al volo.

Per l'ambito professionale le semplificazioni e le migliorie sono numerose sia dal punto di vista amministrativo che operativo, a partire dalla possibilità di volare nelle CTR come è avvenuto in Italia. Il nuovo regolamento ha ridotto i limiti imposti dalla precedente normativa variando distanze e pesi in relazione agli scenari operativi. In particolare, nello scenario S1 la distanza dal pilota che prima era di 100m è stata portata a 200m; nello scenario S2 per i droni che pesano meno di 2kg è concessa un'altezza massima di 150m; infine, nello scenario S3, ovvero per le operazioni in zone urbane, il limite dei 4 kg di



peso è stato portato ad 8 a patto che vi sia un paracadute e una distanza minima da persone terze di 30m.

### REGNO UNITO

Mentre il resto del mondo affrontava il quadro regolamentare dei droni, Il Regno Unito è stato a guardare e la normativa che regola l'impiego dei droni è abbastanza recente. Ma se l'eccesso di regolamentazione può soffocare lo sviluppo dei droni, la mancanza di regole può essere altrettanto dannosa. La Camera Alta ha quindi istituito una commissione che porti alla definizione di regole per volare per lavoro in Gran Bretagna il provvedimento chiave, argomentano i Lord, dovrebbe essere un database pubblico interrogabile attraverso una app che identifichi tutti i droni inglesi che volano per lavoro: in questo modo chiunque può sapere a chi appartiene il robot volante che gli volteggia sulla testa.

Attualmente, la normativa britannica non fa distinzione tra SAPR e aeromodelli (cioè droni che lavorano per hobby o per lavoro) e stabilisce una regola comune per tutti i droni di volare oltre i 150 metri da persone, case, strade e non più vicino di 50 metri da veicoli e navi che non siano sotto il diretto controllo dell'operatore del drone. Inoltre, il regolamento britannico ammette, solo il volo a vista (o per lo meno entro il raggio visivo del pilota) e sono proibisce droni oltre le 44 libbre (20 kg circa).

La Camera ha poi aggiunto una serie di raccomandazioni:

- Maggior ricorso al geo-fencing, cioè nel software dei droni dovrebbe esserci un sistema che impedisca il volo e il decollo nelle aree proibite: vicino agli aeroporti, sopra le prigioni e altri luoghi sensibili
- Formazione agli agenti di polizia per sapere come comportarsi con i droni
- L'introduzione di un marchio che indichi che quel tal drone è stato certificato come sicuro
- Più linee guida per garantire che i droni siano correttamente assicurati.

## 4.4 La normativa degli Stati Uniti

In fatto di norme applicate alle nuove tecnologie, gli Stati Uniti sono sempre più avanti rispetto all'Europa. Infatti, nonostante la forte predisposizione ad investire sul futuro dei SAPR, ben presto, l'amministrazione americana si è resa conto della necessità di delineare parallelamente un quadro normativo per impedire che l'uso smodato di queste tecnologie potesse indebolire le garanzie costituzionali a protezione dei diritti civili. A tale scopo, nel 2012 il Congressional Unmanned System Caucus ha stanziato fondi a favore della FAA (Federal Aviation Commission) perché delineasse una normativa che permettesse l'uso commerciale dei SAPR entro il 2015 ed il decollo di quelli più piccoli entro il 2014. L'obiettivo principale consiste nel renderli più sicuri, dotarli cioè di sistemi di anticollisione e nel rispondere alle minacce alle libertà civili.

Successivamente, nel corso dell'Aerospace Industries Association del novembre 2013, la FAA ha presentato l'Integration of Civil Unmanned Aircraft Systems in the National Airspace System (NAS) Roadmap. In sostanza si tratta dei principi base che hanno guidato la successiva elaborazione delle norme che autorizzano i velivoli senza pilota a sorvolare i cieli americani.

Il piano FAA ha la durata di cinque anni, ricalca più o meno i principi che regolano il traffico commerciale tradizionale e in generale, prevede che siano rilasciate autorizzazioni al pilota, il quale ha la responsabilità per il mezzo a pilotaggio remoto che utilizza.

Inoltre la FAA si impegna a scegliere 6 siti di prova per la fase sperimentale, in cui i SAPR voleranno insieme agli aerei commerciali e per i quali è necessario stabilire una politica di privacy a protezione dei diritti dei cittadini, conforme ai "Fair Information Practice Principles". Molto lavoro è stato fatto anche per i SAPR più piccoli che non invadono lo spazio aereo.

Il piano FAA prevede inoltre, l'elaborazione di norme sull'addestramento dei piloti, che dovranno rispondere agli stessi requisiti medici dei "flight physical", anche se la FAA non richiede un certificato per operare perché normalmente la traiettoria dei velivoli non incrocia le rotte commerciali. Gli operatori dovranno tuttavia schedare i piani di volo, a meno che non volino totalmente a vista.

Oggi, un grosso problema per gli Stati Uniti sarà quello di coordinare queste regole con i bisogni e i regolamenti del governo e dei singoli stati. Ad esempio, il Texas ha già vietato la maggior parte degli usi privati dei SAPR proprio per tutelare la privacy e la Florida ha approvato una legge, in vigore dal primo di luglio 2015, che vieta le riprese a mezzo SAPR in caso di rischi per lo stesso motivo.

All'inizio del 2015, la *Federal Aviation Commission* (FAA) americana ha proposto, un'altra bozza di regolamento sull'uso dei droni per scopi commerciali che impedisce ai droni stessi di volare per lavoro, mentre l'Unione Europea, sta ancora lavorando per uniformare le regole che ad oggi sono diverse da Paese a Paese.

Il regolamento statunitense presenta molti aspetti in comune con i regolamenti europei, dalla registrazione del velivolo e al divieto di volo sulle persone alla necessità di operare nelle ore diurne e in VLOS (visual line of sight). Di contro la bozza statunitense norma soltanto i droni sotto i 25 kg e consente il volo in "first person view" (utilizzando dei visori collegati ai droni).

Negli ultimi tre anni, da quando i SAPR, a seguito del FAA Modernization and Reform Act del 2012, sono stati inseriti tra i velivoli abilitati a volare nello spazio aereo nazionale e sono impiegati da diverse Agenzie Federali (Ministeri ed enti pubblici statunitensi), l'interesse verso le problematiche legate al tema della privacy è diventato più intenso a tal punto che, nella primavera del 2015, il Presidente Obama ha chiesto a tutte le Agenzie Federali degli Stati Uniti di redigere una roadmap sulla base della precedente esperienza europea.

Infatti, nel giugno 2013, per normare i velivoli più piccoli, che coinvolgono più da vicino l'ambito civile, è stata pubblicata la European UAV Roadmap, secondo cui l'integrazione degli UAV nello spazio aereo civile rappresenta "la principale priorità a supporto dello sviluppo del settore in Europa" e "porterà l'aviazione nel regno della terza rivoluzione industriale". Si tratta di un approccio incrementale volto ad allentare l'attuale regime altamente restrittivo, che ha bisogno di un'approvazione caso per caso ai voli, e concentrato sugli investimenti in ricerca e sviluppo e su iniziative che favoriscano l'accettazione sociale di tali nuove tecnologie.



## Capitolo 5: L'USO DEL SAPR NELL'AMBITO DEL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO DI PROSSIMITÀ

La miniaturizzazione dell'elettronica, l'avvento dei microprocessori, che hanno reso possibile l'installazione a bordo degli aeromodelli di veri e propri computer in grado di rendere sempre più semplice ed automatico il controllo del mezzo, e la possibilità di equipaggiare il velivolo con sensori in grado di acquisire immagini fotografiche dell'area sorvolata, hanno spinto, a partire dal 2012, l'impiego dei SAPR nella fotogrammetria aerea di prossimità.

La diffusione dei Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto nell'ambito fotogrammetrico è stata anche favorita dal quasi contestuale sviluppo di algoritmi derivati dalla Computer Vision che consentono un elevato livello di automazione di alcune fasi del *processing* fotogrammetrico. In particolare, l'integrazione nelle procedure fotogrammetriche della *Structure from Motion* (SfM) ha consentito lo sviluppo di software fotogrammetrici/computer vision nei quali l'intero processo fotogrammetrico (orientamento immagini, calibrazione camera, produzione elaborati) è quasi del tutto automatico. Inoltre, la diffusione dei SAPR nell'ambito fotogrammetrico è dovuta allo sviluppo sempre più spinto di nuove camere digitali, che permettono di acquisire immagini con un elevato livello di qualità pur mostrando dimensioni sempre più compatte

e peso sempre più ridotto, e nuovi sensori GNSS, che con tecnologie sempre più evolute consentono una navigazione aerea più affidabile.

Fino a poco tempo fa, in funzione della metodologia utilizzata per effettuare l'acquisizione e in funzione dell'oggetto da rilevare, era possibile distinguere due differenti tipologie di tecniche fotogrammetriche: la fotogrammetria aerea e la fotogrammetria terrestre. La fotogrammetria aerea è utilizzata per acquisizioni di porzioni di superficie terrestre finalizzate alla produzione e all'aggiornamento della cartografia, alla generazione di DTM e alla produzione di ortofoto. La fotogrammetria terrestre è impiegata per acquisizioni di tipo ingegneristico e architettonico, per il monitoraggio degli edifici e per il rilievo di oggetti di piccole e medie dimensioni.

Oggi, invece, questa distinzione non è più così netta. L'impiego dei SAPR come strumento per l'acquisizione di dataset fotogrammetrici ha determinato la comparsa di una nuova classe di fotogrammetria ovvero la fotogrammetria da SAPR detta anche fotogrammetria aerea di prossimità. La fotogrammetria aerea di prossimità si caratterizza per la tipologia di presa, quota di volo, tipologia di camera, scopo e soprattutto costi (Tabella 2).

	Fotogrammetria Aerea	Fotogrammetria terrestre	Fotogrammetria Aerea di prossimità
<b>Planning</b>	(Semi) automatico	Manuale	Automatico e manuale
<b>Acquisizione dati/volo</b>	Assistito, manuale	Autonomo, assistito, manuale	Autonomo, assistito, manuale
<b>Dimensioni dell'area</b>	km <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup> - m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> - km <sup>2</sup>
<b>Risoluzione immagine (GSD)</b>	cm - m	mm - dm	mm - m
<b>Distanza dagli oggetti</b>	100 m - 10 km	cm - 300 m	m - km
<b>Geometria di presa</b>	Caso Normale, anche obliquo	Caso Normale, anche obliquo	Caso Normale, anche obliquo
<b>Dimensioni del blocco (numero immagini)</b>	10 - 100	1 - 500	1 - 1000
<b>Applicazioni</b>	Mappe a piccola scala	Mappe a grande scala, rilievo industriale e architettonico	Mappe a grande scala, rilievo in zone pericolose, monitoraggio in tempo reale

**Tabella 2.** Confronto tra le differenti tipologie di rilievo fotogrammetrico

Poiché, nonostante lo sviluppo di software, commerciali e non, in grado di automatizzare la totalità del processo di elaborazione fotogrammetrica i principi base su cui si fonda la fotogrammetria non cambiano; prima di introdurre il rilievo fotogrammetrico da SAPR è bene soffermarsi sulle condizioni geometriche/analitiche che sono alla base della fotogrammetria moderna.

## 5.1 Evoluzione della tecnica fotogrammetrica

Anche se storicamente l'origine della fotogrammetria si fa risalire alla metà dell'Ottocento quando in Europa fu inventata la fotografia (la storia della Fotogrammetria è infatti legata alla storia della geometria descrittiva, che ne ha determinato i principi teorici, e naturalmente all'ottica e alla fotografia), è solo dai primi decenni del Novecento, parallelamente allo sviluppo della tecnologia aeronautica, che questa tecnica di rilievo ha assunto un ruolo fondamentale nello studio e nella rappresentazione del territorio a tal punto che oggi che è divenuta la protagonista assoluta nella realizzazione di documenti cartografici.

La tecnica fotogrammetrica deve la sua invenzione a Johan Heinrich Lambert che nel 1759, nella sua opera *Perspectiva liber*, definì le Leggi matematiche, che legano la posizione di un punto nello spazio alla sua posizione in un'immagine e su cui si basa tutta la fotogrammetria. Ma, nonostante i primi tentativi di rilevamento fotografico furono eseguiti nel 1855 da I. Porro e nel 1878 da P. Paganini, la fotogrammetria si sviluppò rapidamente solo con l'introduzione del metodo stereoscopico a opera di K. Pulfrich e di E. Van Orel (1909). Solo successivamente, nel 1924, quando Otto von Gruber perfezionò le leggi matematiche applicate alla fotogrammetria, ebbe origine la fotogrammetria analitica, che, utilizzando principalmente un metodo analitico, è in grado di rendere più veloce il processo di restituzione fotogrammetrica.

A partire dalla Prima Guerra Mondiale, il rapido sviluppo dell'aviazione aprì un nuovo orizzonte alla fotogrammetria. Un primo esperimento che ha permesso di eseguire fotografie dall'alto per servirsene in rilievi topografici fu quello compiuto dall'italiano Capitano Morris che, nel 1907, ha rilevato la planimetria di un tratto del Tevere per

mezzo di macchina da presa con otturatore azionato elettricamente. Questo evento segna un punto di svolta per la fotogrammetria aerea che oggi ha sostituito tutti gli altri metodi per la produzione di rilievi a media e grande scala.

A partire dagli anni '90, il passaggio dalle immagini fotografiche analogiche alle immagini numeriche, cioè immagini digitali, strutturate in una matrice di piccoli elementi detti pixel, e la recentissima disponibilità e diffusione di calcolatori in grado di manipolare grosse quantità di dati, unitamente ai progressi tecnologici nella computer grafica, ha permesso di eseguire molte elaborazioni del processo di rilievo fotogrammetrico in ambiente digitale.

Rimanendo validi i principi della fotogrammetria analitica, oggi l'evoluzione si sta orientando verso le tecniche digitali che trovano terreno fertile sia in fase di presa dei fotogrammi, attraverso l'uso di fotocamere digitali e strumenti di misura di moderna generazione, sia in fase di restituzione e ricostruzione dei modelli virtuali, attraverso software di modellazione. Le costose e complesse strumentazioni ottico-meccaniche utilizzate nel passato non sono più in parte indispensabili ed in parte perfino obsolete.

Proprio grazie a questa evoluzione tecnologica verso il digitale, nell'ambito della fotogrammetria si è assistito ad una rapida diffusione ed uno sviluppo che ha portato ad applicare più frequentemente questa metodologia di rilievo anche in nuovi settori, nonostante rimanga comunque una disciplina specialistica che richiede competenze vaste e grande esperienza per poter essere applicata con risultati attendibili.

## **5.2 Fotogrammetria: definizione e relazioni geometriche di base**

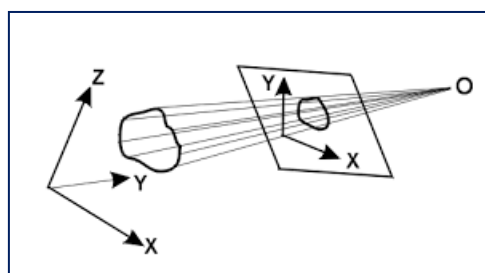
La fotogrammetria è quella tecnica di rilevamento che, senza diretto contatto con l'oggetto da rappresentare, consente di ottenere informazioni metriche (forma, posizione e dimensioni) di oggetti reali, utilizzando le informazioni contenute in opportune immagini fotografiche degli stessi oggetti, riprese da punti di presa differenti (Figura 43).





**Figura 43.** Schema di acquisizione dei fotogrammi

Definendo delle relazioni geometriche fra le posizioni tridimensionali dei punti sull'oggetto e quelle delle loro immagini sulla fotografia, è possibile determinare la posizione di tutti i punti di un oggetto. La relazione che lega le grandezze dello spazio oggetto ( $X, Y, Z$ ) con quelle dello spazio immagine ( $x, y$ ) si denomina *proiettività* (Figura 44).



**Figura 44.** La proiettività

Questo è possibile perché la fotografia è pensata come a una “proiezione centrale” (Figura 45) e di conseguenza la tecnica fotogrammetrica si fonda sui principi della geometria proiettiva. In base a questa assunzione, i segmenti che congiungono i punti dell'oggetto con le loro corrispondenti immagini (stella proiettante) si incontrano tutti in un punto  $O$ , detto centro di presa. E' proprio questo aspetto geometrico che conferisce alla fotografia, oltre ad un contenuto qualitativo, anche un contenuto metrico.

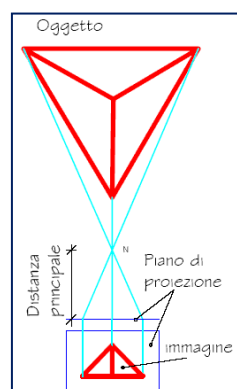


Figura 45. Schema della geometria di presa fotografica

Il sistema che si genera non è biunivoco, infatti mentre da ogni punto dello spazio oggetto (definito da tre coordinate) possiamo determinarci il relativo punto immagine (in due coordinate), viceversa dallo spazio immagine non abbiamo una soluzione univocamente determinata, ma una infinità di soluzioni, ottenute fissando un valore arbitrario ad una delle tre coordinate spaziali. Ad ogni punto immagine corrispondono dunque infiniti punti nello spazio oggetto, tutti appartenenti alla stessa retta proiettiva passante per lo stesso punto e per il centro di proiezione.

Per determinare la posizione spaziale di un oggetto, in fotogrammetria, si utilizzano due prospettive centrali (due foto dell'oggetto) di uno stesso punto oggetto da due distinti centri di proiezione. Questo significa che per un oggetto tridimensionale bisogna considerare almeno due immagini per avere soluzioni uniche (fotogrammetria stereoscopica) (figura 46).

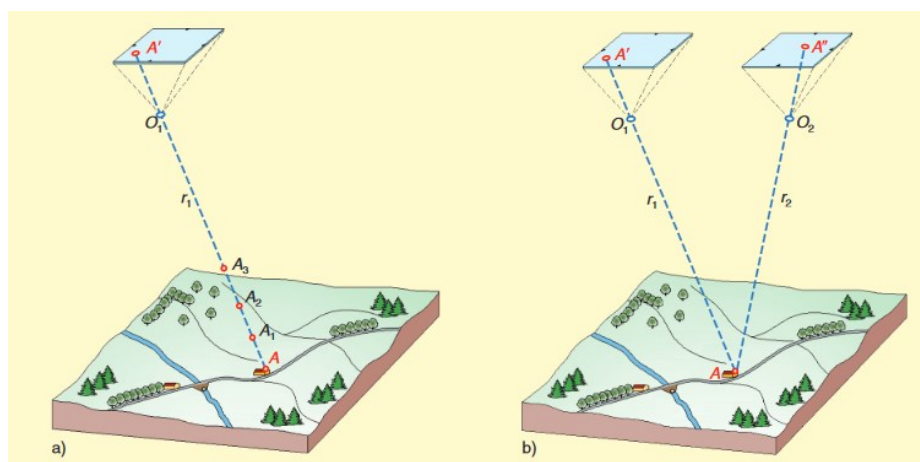


Figura 46. Schema intersezione raggi ottici

La necessità di avere almeno due fotografie dello stesso oggetto, dipende dal fatto che una sola immagine non contiene informazioni sufficienti a definire la posizione e le dimensioni di un oggetto tridimensionale. Infatti, come si vede dalla Figura 46, il punto  $A_1$ , sul piano di una sola immagine con centro di presa  $O_1$ , è l'omologo di tutti gli infiniti punti  $A_1, A_2, \dots$  che si trovano sul raggio proiettante  $r_1$ , rendendo il problema indeterminato.

Utilizzando due fotografie dello stesso oggetto, invece, acquisite da due punti di vista differenti, al punto  $A$  del terreno corrisponde il punto omologo  $A'$  sulla prima fotografia e il punto  $A''$  sulla seconda fotografia. Nota con precisione la posizione dei punti omologhi  $A'$  e  $A''$  sulle due fotografie, e la posizione delle due immagini al momento della presa e dei due punti di presa  $O_1$  e  $O_2$ , il punto  $A$  rimane geometricamente definito, in quanto punto di intersezione dei due raggi proiettanti  $r_1$  e  $r_2$  che congiungono i due punti omologhi con i centri di presa corrispondenti.

Nel 1759, Johan Heinrich Lambert, nella sua opera "Perspectiva liber", definì le leggi matematiche su cui si basa la fotogrammetria che legano la posizione di un punto nello spazio alla sua posizione nell'immagine. Sulla base di queste leggi matematiche, il problema fotogrammetrico viene risolto ottenendo le coordinate dell'intersezione nello spazio delle rette  $r_1$  e  $r_2$  attraverso la risoluzione di un sistema di equazioni, detta equazione di collinearità.

Risolvere un problema fotogrammetrico significa quindi relazionare le grandezze dello spazio oggetto da rilevare  $(X, Y, Z)$  con quelle dello spazio immagine  $(x, y)$  della fotografia.

I due sistemi di coordinate (quello relativo allo spazio immagine e quello relativo allo spazio oggetto) sono legati tra loro da parametri di orientamento che regolano la corrispondenza tra i punti e individuano le caratteristiche della camera da presa e il suo assetto durante la fase di acquisizione dell'immagine (Figura 47).

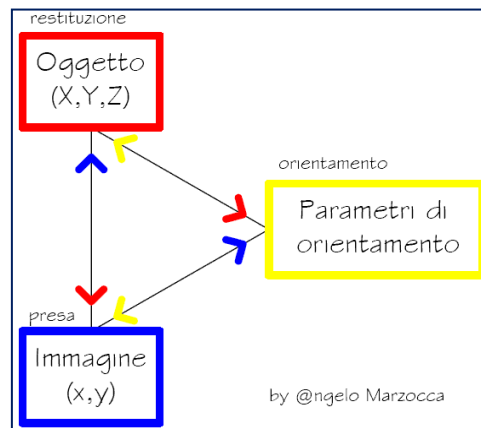


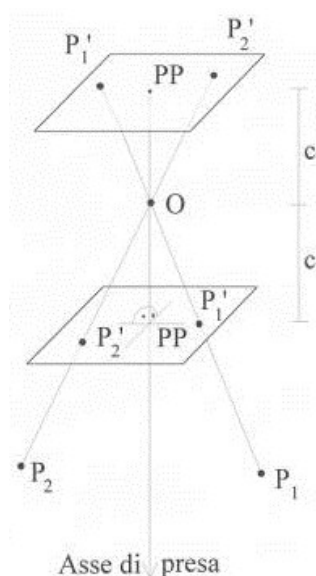
Figura 47. Schema del problema fotogrammetrico

In particolare esistono:

- *parametri di orientamento interno*, ossia la posizione del punto principale e la distanza principale (focale), costanti, caratteristici della camera utilizzata e calcolati attraverso procedure di “calibrazione della camera”;
- *parametri di orientamento esterno*, ossia gli angoli di assetto ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ) dell’immagine e la posizione del centro di presa ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) rispetto al sistema di riferimento oggetto.

### 5.3 L’equazione di collinearità

Le relazioni analitiche che si stabiliscono tra coordinate oggetto sul terreno e coordinate immagine sul fotogramma si basano sul presupposto che durante una presa fotogrammetrica il punto oggetto P, il punto immagine P’ ed il centro di presa O sono allineati sulla stessa retta (Figura 48).



**Figura 48.** Relazione geometrica tra coordinate oggetto sul terreno e coordinate immagine

Dove:

O = Centro di proiezione o punto di presa

P = Punto oggetto

P' = Punto immagine

C = distanza principale

Le relazioni che legano le coordinate del punto immagine P' (bi-dimensionali) con le coordinate X,Y,Z del corrispondente punto oggetto P, sono l'equazione di collinearità, che consentono di risolvere il problema fotogrammetrico ottenendo le coordinate dell'intersezione nello spazio delle rette r1 e r2 con la risoluzione di un sistema di equazioni (detta appunto equazione di collinearità) ottenute da relazioni di geometria analitica.

Queste equazioni, che costituiscono il principio base della fotogrammetria analitica, esprimono la relazione secondo la quale, per ogni fotogramma, il centro di presa O, il punto oggetto A e il punto immagine A1 sul fotogramma sono allineati sullo stesso raggio proiettante r1 (Figura 49). L'intersezione delle rette relative a due prese consecutive, che esprimono la condizione di collinearità per ciascuno dei due raggi proiettanti, permette di determinare la posizione del punto oggetto A che ha generato le due immagini A1 e A2 sui due fotogrammi.

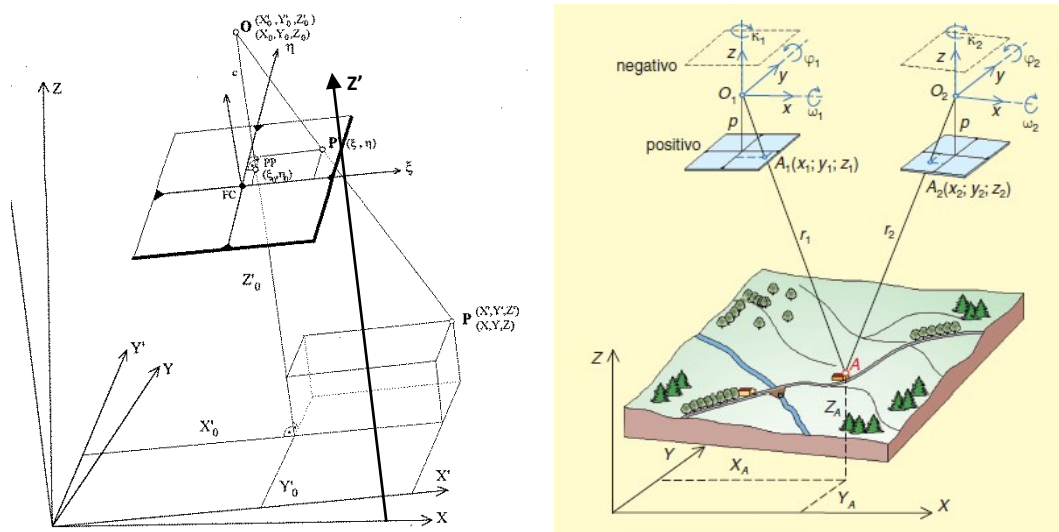


Figura 49. Allineamento del centro di proiezione O, del punto immagine P' e del punto oggetto P

L'equazione di collinearità può essere espressa come segue:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\xi - \xi_0}{c} = \frac{X' - X'_0}{Z' - Z'_0} \\ \frac{\eta - \eta_0}{c} = \frac{Y' - Y'_0}{Z' - Z'_0} \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \xi = \xi_0 - c \frac{X' - X'_0}{Z' - Z'_0} \\ \eta = \eta_0 - c \frac{Y' - Y'_0}{Z' - Z'_0} \end{array} \right.$$

Il sistema di riferimento  $X', Y', Z'$ , parallelo al sistema di riferimento dei punti immagine sul fotogramma, attraverso il quale sono state espresse le coordinate del punto oggetto sul terreno, è ruotato e traslato rispetto al sistema di riferimento  $X, Y, Z$  del terreno ed è proprio questa assunzione che consente di ottenere la relazione diretta tra coordinate terreno e coordinate immagine.

Il passaggio da sistema di riferimento  $X', Y', Z'$  al sistema di riferimento  $X, Y, Z$ , si realizza ruotando gli assi degli angoli  $(\omega, \phi, \kappa)$  attraverso la matrice di rotazione  $r_{ij}$  che contiene i coseni direttori degli angoli  $(\omega, \phi, \kappa)$  formati tra gli assi coordinati del sistema immagine e terreno cioè gli angoli di cui il fotogramma era ruotato, nel momento della presa, rispetto al sistema di riferimento del terreno (1).

$$\begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X' - X'_0 \\ Y' - Y'_0 \\ Z' - Z'_0 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} \cos(xX) & \cos(yX) & \cos(zX) \\ \cos(xY) & \cos(yY) & \cos(zY) \\ \cos(xZ) & \cos(yZ) & \cos(zZ) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos \phi \cos \kappa & -\cos \phi \sin \kappa & \sin \phi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \phi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

In definitiva, l'equazione di collinearità può essere espressa nella seguente forma che mostra che ad ogni punto oggetto corrisponde un punto immagine (2).

$$\begin{cases} \xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases} \quad (2)$$

dove:

$r_{ij}$  sono gli elementi di una matrice di rotazione nello spazio che definisce l'assetto spaziale del fotogramma, al momento della presa, relativo al sistema di coordinate oggetto X,Y,Z;

$\zeta_0, \eta_0$  sono le coordinate immagine del punto principale

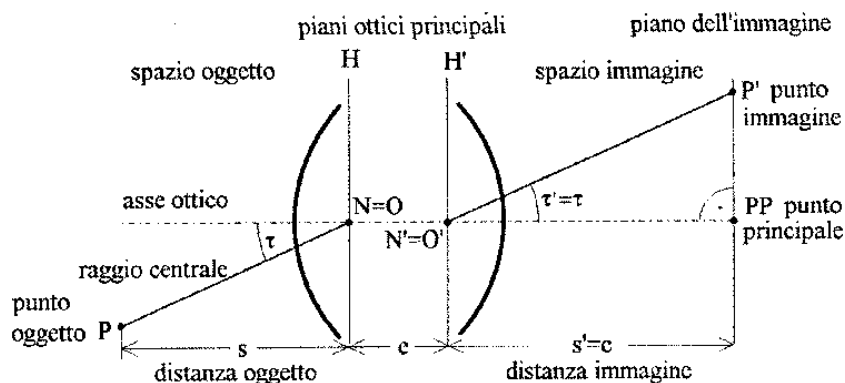
c è la distanza principale

## 5.4 La distorsione ottica

Nonostante una presa fotogrammetrica sia assimilabile ad una prospettiva centrale rigorosa, in cui il centro della prospettiva è situato ad una distanza c dal punto principale del fotogramma generato, questo modello ideale non corrisponde fedelmente alla realtà. Per ottenere la massima precisione possibile si deve, quindi, tenere conto degli inevitabili errori causati dall'obiettivo, dalla camera e dal fotogramma stesso.

La figura 50 illustra il funzionamento ideale di una camera fotografica in cui, quando si realizza una presa fotografica; il piano su cui giace l'oggetto e il piano su cui giace

l'immagine sono paralleli tra loro e perpendicolari all'asse ottico il quale interseca il piano oggetto e il piano immagine rispettivamente nei punti nodali  $N$  e  $N'$ , detti punti ottici principali. In tali punti il raggio luminoso che intercetta il punto oggetto determinando il punto immagine, forma con l'asse ottico un angolo  $\tau$  identico per lo spazio immagine e per lo spazio oggetto.

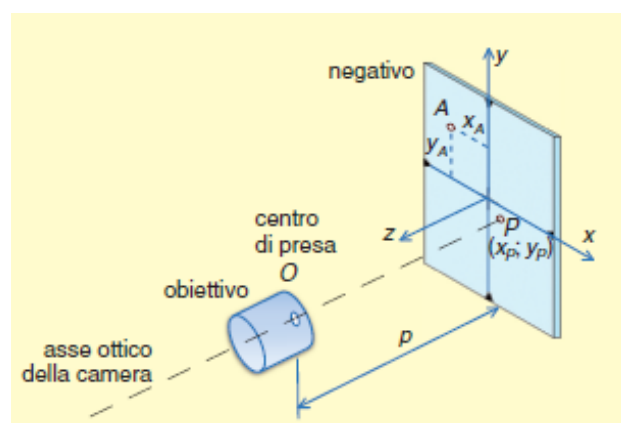


**Figura 50.** Geometria di formazione dell'immagine in un sistema ottico ideale

Se tutte queste condizioni fossero vere le immagini fotografiche potrebbero essere considerate esattamente identiche ad una immagine ottenuta tramite una proiezione centrale. Ma le camere fotografiche reali però non corrispondono allo schema ideale in quanto gli obiettivi delle camere sono molto complessi e producono degli effetti che non sono trascurabili sulle immagini.

Teoricamente l'obiettivo della camera dovrebbe essere realizzato in modo che la perpendicolare condotta dal centro di presa  $O$  al piano della lastra (detta punto principale e indicata con  $P$ ) cada esattamente nell'origine del sistema  $xy$ , intersezione delle congiungenti le marche fiduciali. Le marche fiduciali sono dei punti sui fotogrammi che consentono di definire un sistema di assi di riferimento avente origine nel punto  $O$  di intersezione delle congiungenti le coppie stesse; le coordinate del punto principale e il valore  $d$  della distanza principale definiscono la posizione del centro ottico  $c$  dell'obiettivo rispetto al piano principale (Figura 51).



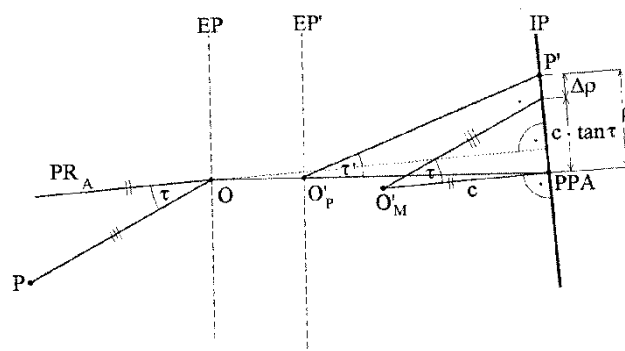


**Figura 51.** Geometria di formazione dell'immagine in un sistema ottico ideale

Nella realtà, gli obbiettivi utilizzati per scopi fotogrammetrici sono sistemi ottici costituiti da una serie di lenti che, a causa dello spessore, della tipologia del vetro con cui sono realizzati e della modalità di assemblaggio delle lenti stesse, presentano i centri di curvatura non perfettamente allineati; ciò determina che i due centri di proiezione  $O$  e  $O'$  non coincidono con i punti nodali  $N$  e  $N'$  producendo effetti di distorsione sull'immagine.

Una immediata conseguenza di quanto detto è l'accumulo di una serie di errori: il piano immagine non è precisamente perpendicolare all'asse ottico, l'angolo  $\tau$  non è identico per lo spazio immagine e per lo spazio oggetto, la distanza principale realizzata meccanicamente differisce dalla distanza principale ottica  $c$  ed infine l'asse ottico non interseca il piano immagine al centro del fotogramma ma in un punto (prossimo al centro) definito punto principale di auto-collimazione PPA (Figura 52).

Per valutare gli effetti sull'immagine reale rispetto all'immagine ideale si procede calcolando un modello di camera ideale in cui si impone l'esistenza di un centro di prospettiva matematico  $O'_M$  posizionato ad una distanza  $c$  (distanza principale) perpendicolare al piano dell'immagine che consenta di riprodurre gli angoli  $\tau$  il più similmente possibile rispetto agli angoli ideali.



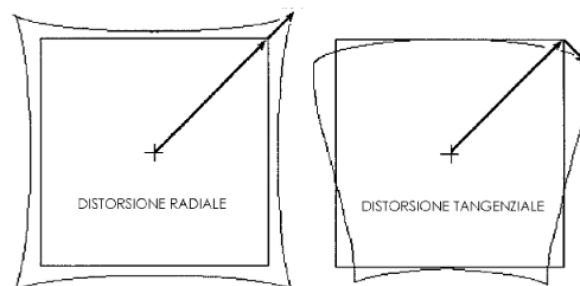
**Figura 52.** Geometria di formazione dell'immagine in un sistema ottico reale

Gli errori dovuti alla variazione dell'angolo sono da attribuire alla distorsione ottica  $\Delta\rho$ , che determina la non coincidenza del centro ottico con il punto principale e la cui equazione è (3):

$$\rho = c \tan \tau + \Delta\rho \quad (3)$$

Il valore della distorsione ottica  $\Delta\rho$  non è costante, ma variabile con l'angolo di inclinazione  $\tau$  rispetto all'asse ottico. Inoltre, la distorsione ottica può essere scomposta in tre componenti (Figura 53):

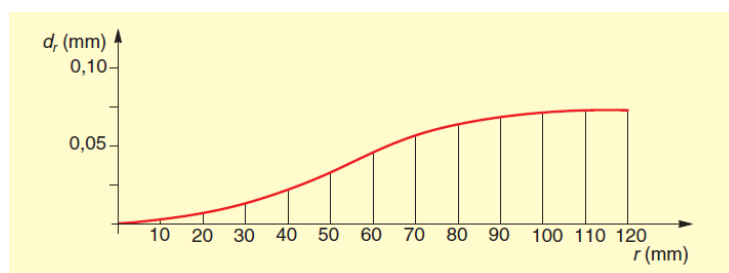
- *distorsione radiale* o simmetrica così chiamata perché procede dal centro del fotogramma fino ai bordi;
- *distorsione tangenziale* o asimmetrica;
- *distorsione affine*.



**Figura 53:** Distorsione: (a) radiale; (b) tangenziale

Tutte e tre le tipologie provocano deformazione delle immagini e quindi vengono corrette mediante procedure di calibrazione delle camere.

La distorsione radiale è principalmente dovuta all'effetto di rifrazione delle lenti dell'obbiettivo ma è funzione anche della messa a fuoco della camera e della distanza camera-oggetto. L'andamento della distorsione radiale è rappresentata con un diagramma (detto curva di distorsione), determinato in fase di calibrazione della camera, che si ottiene riportando in ascisse le distanze dal centro dell'immagine, e in ordinate i valori della distorsione radiale (Figura 54). Di fatto la curva di distorsione rappresenta la media delle curve di distorsione ottenute misurando le deformazioni in corrispondenza delle 4 semi-diagonali dell'immagine. La distorsione tangenziale è principalmente causata dal disallineamento degli elementi delle lenti dell'obbiettivo e in genere produce effetti di distorsione dell'immagine che sono molto più piccoli di quelli della distorsione radiale. La distorsione affine, infine, è causata dalla non ortogonalità del sensore rispetto all'asse ottico e dell'incertezza della forma del pixel. Anche in questo caso produce effetti di distorsione dell'immagine che sono molto più piccoli di quelli della distorsione radiale.



**Figura 54.** Esempio di curva di distorsione radiale

## 5.5 La calibrazione della camera

L'utilizzo di camere non metriche rende particolarmente importanti le problematiche connesse alla calibrazione delle camere a tal punto che la fase di calibrazione della camera stessa è un pre-requisito necessario all'estrazione dalle immagini di informazioni metriche tridimensionali precise e affidabili.

Sulla base di quanto detto precedentemente, in un modello ideale la definizione della prospettiva centrale richiede la determinazione di 9 parametri incogniti: 6 relativi all'orientamento esterno e 3 relativi all'orientamento interno, riferibili alla coordinate immagine del centro di presa e alla distanza principale. I parametri di orientamento interno, specifici per ogni singola camera utilizzata, possono essere desunti dal certificato

di calibrazione oppure calcolati attraverso le procedure di calibrazione che consentono di considerare in un modello fisico reale gli errori sistematici indotti dalla camera che provocano uno spostamento del punto immagine, dalla posizione teorica giacente sulla retta collineare al punto oggetto.

Risolvere un problema di calibrazione significa, quindi, calcolare i parametri fisici intrinseci che definiscono la fotocamera (Remondino et al, 2006) ed in particolare:

- la distanza principale ( $c$ ) e la posizione del punto principale ( $x_p, y_p$ );
- i parametri di distorsione delle lenti.

Questi parametri, che nelle camere metriche e semimetriche sono riportati nel certificato di calibrazione, per le camere amatoriali devono essere determinati attraverso procedure analitiche per cui è necessario sviluppare un sistema che sia in grado di identificare il modello migliore per il calcolo di tutti i parametri.

Molti ritengono che il pioniere della calibrazione fu il canadese Deville, che nel 1910 costruì un piccolo laboratorio personale per calibrare i componenti ottici della sua fotocamera. Solo negli anni '40, quando a Parigi fu organizzato un meeting fra i paesi europei più rappresentativi si riprese a discutere sulle tecniche di calibrazione delle camere. In questa occasione restarono irrisolte le problematiche legate agli effetti tangenziali di difficile soluzione con le risorse di calcolo disponibili a quei tempi.

Negli stessi anni, furono tanti gli studiosi interessati allo studio delle caratteristiche delle distorsioni delle lenti (Lewis, 1956; Thompson, 1957; Hothmer, 1958; Hallert, 1963) e nel 1965, al Convegno Annuale della American Society of Photogrammetry, Brown (1971) presentò il risultato di alcuni suoi esperimenti che gli permisero di formulare una serie di relazioni importanti per risolvere il calcolo delle distorsioni. Rivisitando il lavoro scientifico dei precedenti 40 anni, che in gran parte aveva identificato la distorsione tangenziale come effetto ottenuto disponendo un prisma sottile davanti all'obiettivo, Brown (1971) dimostrò come la distorsione tangenziale fosse principalmente attribuibile al decentramento delle lenti rispetto all'asse ottico. Inoltre, per Brown la distorsione radiale ed il decentramento potevano essere modellate efficacemente in quanto non ci sarebbero stati ostacoli nell'uso di buoni obiettivi della lunghezza focale adatta, con varie aperture e campi angolari distinti.

Fin dal 1956 aveva pubblicato i rapporti tecnici sulla determinazione simultanea dei parametri dell'obiettivo e dell'orientamento della fotocamera ed aveva utilizzato il bundle adjustment come modello per risolvere simultaneamente la localizzazione delle fotocamere e i parametri degli obiettivi.

Lo sviluppo e l'uso del modello bundle adjustment per le fotografie terrestri (Ziemann e El-Hakim, 1983) rese possibile, teoricamente, in maniera simultanea avendo a disposizione un certo numero di punti di controllo di cui è nota la posizione nello spazio tridimensionale, la determinazione di tutti i parametri incogniti della fotocamera.

Lo sviluppo della tecnica di bundle adjustment ha fatto sì che nuove procedure di calibrazione via software della camera, necessarie per l'utilizzo di camere digitali non metriche, si affermassero. Le procedure, che prevedono l'esecuzione di una serie di immagini secondo schemi di presa ben determinati e si basano sulla soluzione di un calcolo eseguito considerando come incognite i parametri di orientamento esterno delle immagini e i parametri di orientamento interno e di distorsione ottica della camera, sono:

- self calibration: indipendentemente effettuata dalle procedure di rilievo fotogrammetrico, viene eseguita predisponendo un reticolo di calibrazione appositamente realizzato e consente di ottenere i migliori risultati;
- on-the-job calibration: si basa invece sulla determinazione dei parametri di orientamento interno e di distorsione delle lenti contestualmente alla fase di rilievo fotogrammetrico; i parametri di calibrazione calcolati sono specifici per ogni singolo rilievo.

Nel corso degli anni sono state studiati e sviluppati differenti metodi e modelli matematici di calibrazione analitica; alcune di queste tecniche, oggi, non più sono più utilizzate, altre, invece, sono state migliorate per essere utilizzate per la calibrazione delle camere amatoriali (Clarke e Fryer, 1998).

L'instabilità nell'orientamento interno delle comuni camere digitali comporta la ripetizione della calibrazione ogni qual volta ci si appresti ad un nuovo rilievo fotogrammetrico; la fase della calibrazione diventa quindi una fase fondamentale per la corretta esecuzione del rilievo affinché dalle fotografie si possano estrarre accurate informazioni geometriche.

Nel caso di camere digitali amatoriali, in cui tutti i parametri di orientamento interno, sono incogniti, la procedura di calibrazione che meglio si adatta a questa situazione è la self-calibration con bundle-adjustment (Grün e Beyer, 2001) che considera gli errori sistematici dovuti al processo di acquisizione dei fotogrammi; tali errori vengono calcolati ed espressi mediante l'utilizzo dei cosiddetti parametri addizionali (APs).

Oggi, tra i diversi modelli per il calcolo dei parametri addizionali uno largamente utilizzato in fotogrammetria dei vicini è quello indicato da Brown (1971), che consta di 10 parametri relativi a:

- posizione punto principale e distanza principale ( $x_p, y_p, c$ );
- distorsione simmetrica radiale delle lenti ( $k1, k2, k3$ );
- distorsione tangenziale delle lenti ( $p1, p2$ );
- distorsione affine delle lenti ( $b1, b2$ )

Molti dei parametri addizionali individuati da Brown non vengono considerati nella risoluzione della self-calibration con bundle adjustment perché, come già dimostrato da Fraser nel 1982, la sovra-parametrizzazione indebolisce la soluzione del modello e influenzare negativamente la determinazione di tutti i parametri del sistema in quanto determina la modellazione di errori che si possono assumere assenti o comunque irrilevanti, soprattutto nell'era digitale, come ad esempio la distorsione affine che contempla l'incertezza nella forma del pixel.

Remondino e Fraser (2006) confrontano le differenti tecniche di calibrazione utilizzate per la calibrazione delle camere digitali e individuano che i modelli più utilizzati per la calibrazione delle camere digitali nel campo della Computer Vision sono quelli di Tsai (1987), Heikkila & Silven (1997) e Zhang (2000). Il metodo di calibrazione di Tsai, che presuppone che alcuni parametri della fotocamera vengano forniti dal produttore per ridurre l'iniziale incertezza di stima, richiede: in una prima fase, l'individuazione di  $n$  punti caratteristici ( $n > 8$ ) per immagine per risolvere il problema di calibrazione attraverso  $n$  equazioni lineari basate sul vincolo di allineamento radiale; in una seconda fase, invece, utilizza un modello di distorsione radiale ma non considera alcun termine relativo alle distorsioni causate dal decentramento delle lenti rispetto all'asse ottico. Il metodo di calibrazione di Heikkila & Silven, invece, in una prima fase consente di effettuare una stima iniziale dei parametri della fotocamera utilizzando una soluzione in

forma chiusa e nella seconda fase esegue una stima non lineare ai minimi quadrati, che impiega l'algoritmo di Levenberg-Marquardt, per perfezionare la stima dei parametri precedenti e calcolare i parametri di distorsione. Infine, il metodo di calibrazione di Zhang, che richiede l'acquisizione con differenti schemi di presa (almeno 2) di una griglia piana a scacchiera, utilizza, l'angolo estratto dai punti della scacchiera per calcolare una trasformazione proiettiva tra i punti dell'immagine delle  $n$  differenti immagini, una soluzione in forma chiusa per determinare i parametri della camera e un metodo lineare dei minimi quadrati per calcolare i termini di distorsione radiale.

Nel corso degli anni, numerosi studi sono stati effettuati in merito all'individuazione dei parametri addizionali (Abraham e Hau, 1997) ma quello elaborato da Brown è ancora oggi il modello più utilizzato per la calibrazione delle camere digitali. Seppur integrati con successivi studi e sviluppi, alla base di quasi tutti gli attuali software di camera calibration che sfruttano l'approccio della self-calibration, si pongono i lavori di Tsai (Tsai, 1987) e di Zhang (Zhang, 1999 e 2000).

## 5.6 Le immagini digitali a scopo fotogrammetrico

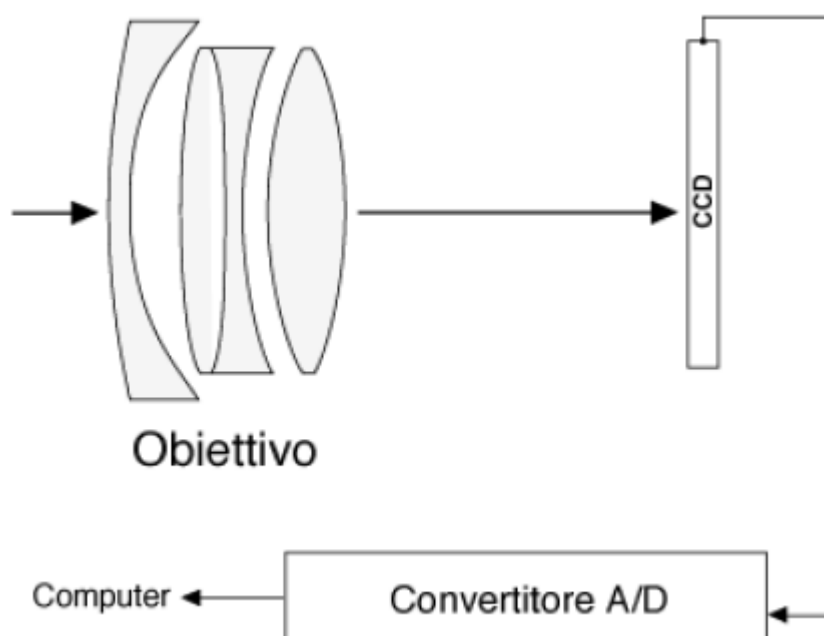
Oggi, in fotogrammetria, l'acquisizione delle immagini avviene principalmente utilizzando camere digitali. L'impiego di questa tipologia di camera ha permesso di semplificare l'intero procedimento di presa e elaborazione dei dataset che, ciò nonostante, si basa su metodi ed equazioni classiche della fotogrammetria analitica.

Poiché nelle immagini acquisite tramite camere digitali (immagini digitali) il contenuto fotografico è acquisito e registrato sotto forma numerica, la principale innovazione apportata dall'utilizzo delle camere digitali è che, pur rimanendo validi gli algoritmi di base della fotogrammetria analitica anche nella fotogrammetria digitale, le immagini permettono di individuare in maniera semplice ed automatica, attraverso l'utilizzo di computer e software, i punti caratteristici e i punti omologhi.

La natura numerica dell'immagine è dovuta al fatto che, nelle fotocamere digitali, a differenza delle fotocamere analogiche che prevedono l'utilizzo della pellicola fotografica, l'immagine è catturata da un sensore che ha la funzione di digitalizzare una scena trasformandola in una matrice di numeri.

Il processo di formazione di un'immagine con camere digitali prevede che la luce incidente sull'obiettivo della camera venga convertita dal sensore sottoforma di tensione elettrica, con intensità proporzionale alla quantità di luce e quest'ultima, successivamente convertita, attraverso un convertitore analogico/digitale (A/D), in bit di informazioni (Figura 55).

Il sensore, di dimensioni variabili, è in grado di memorizzare le informazioni trasportate dall'energia elettromagnetica e renderle disponibili all'utente.



**Figura 55.** Formazione dell'immagine digitale

Le immagini acquisite tramite camere digitali sono costituite da una matrice di elementi, detti pixel, ognuno dei quali ha una posizione fissata a priori e non variabile nel tempo, individuata univocamente da due numeri interi, detti indice di riga e indice di colonna, che rappresentano la posizione del pixel all'interno della matrice.

Inoltre, ad ogni pixel che costituisce l'immagine digitale è associato un valore detto Numero Digitale (ND).

Dal punto di vista numerico, è possibile definire una immagine digitale come una funzione continua  $g(x,y)$ , dove  $x$  e  $y$  sono le variabili spaziali e poiché, attraverso la



digitalizzazione dell'immagine è possibile convertire la rappresentazione continua in una discreta, cioè in un'immagine numerica, l'immagine digitale può essere rappresentata come una matrice  $g(x,y)$  di pixel (4).

$$g(x,y) = \begin{pmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0,C-1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1,C-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(R-1,0) & g(R-1,1) & \dots & g(R-1,C-1) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Dove:

- $i = 0, 1, \dots, C-1$  indice di riga
- $j = 0, 1, \dots, R-1$  indice di colonna
- $R$  = massimo numero di righe
- $C$  = massimo numero di colonne
- $g(x,y) = 0, 1, \dots, \text{max valori radiometrici}$

Le caratteristiche fondamentali delle immagini digitali sono la *risoluzione radiometrica* e la *risoluzione geometrica*; la prima legata al processo di quantizzazione e la seconda al processo di campionamento.

La risoluzione radiometrica rappresenta i livelli cromatici dell'immagine ed è legata alla conversione del segnale luminoso incidente in un numero intero; è memorizzata su ogni singolo pixel dell'immagine utilizzando o un singolo bit (0/1) per rappresentare solo 2 livelli di radianza (bianco = 1, nero = 0) oppure 8 bit ( $2^8$  combinazioni di 0/1) per rappresentare i 256 livelli di radianza necessari per la formazione delle immagini a colori.

La risoluzione geometrica, invece, è legata al processo di campionamento dell'immagine e, poiché le immagini digitali sono costituite da una matrice di pixel, dipende dal numero di pixel contenuti sull'immagine e quindi, di conseguenza dalla loro dimensione.

Conoscere la dimensione del pixel e la relazione fra la sua posizione ed il sistema di coordinate immagine è fondamentale se si vuole utilizzare le immagini digitali in

fotogrammetria perché la dimensione geometrica del pixel influisce sulla qualità dell'immagine e quindi sulla riproduzione dei dettagli di una scena.

La risoluzione geometrica è espressa in punti per pollice DPI (Doth Per Inch) (5):

$$\text{dpi} = \frac{\text{n}^\circ\text{pixel}}{2.54 \text{ cm}} \quad (5)$$

In fotogrammetria, invece, il modo più corretto per valutare la risoluzione geometrica di una immagine digitale è quello di prendere in considerazione l'area di superficie reale dell'immagine proiettata sul piano focale, quindi sul piano del sensore. Questa grandezza denominata Ground Sample Distance (GSD) è data dalla relazione (6):

$$\text{GSD} = \text{dpix} * \frac{D}{c} \quad (6)$$

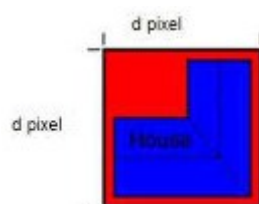
dove:

$d_{\text{pix}}$  = dimensione pixel

D = distanza di presa

c = distanza focale

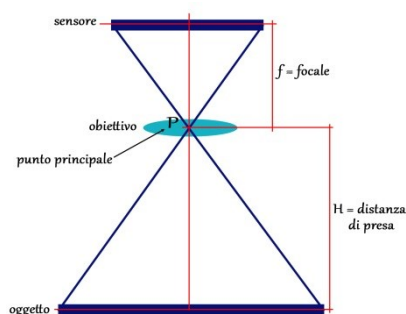
Il GSD, la cui definizione è basilare nella fotogrammetria digitale sia aerea che terrestre, rappresenta la distanza tra il centro di due pixel consecutivi, cioè la “quantità di oggetto contenuta” all'interno di un pixel (Figura 56).



**Figura 56.** Definizione di GSD

Il parametro del GSD è dipendente dall'altezza di volo nel caso di prese aeree o dalla distanza di presa nel caso di prese terrestri, dalle caratteristiche della camera utilizzata, ma soprattutto dall'obiettivo del rilievo e dal livello di dettaglio che si desidera ottenere. Ciò determina la condizione per la quale il GSD è legato da un rapporto di proporzionalità inversa alla “definizione di un'immagine” infatti: maggiore è la

dimensione del pixel minore è il suo livello di dettaglio; viceversa, minore è il GSD, più dettagliata è l'informazione contenuta nel relativo pixel (Figura 57).



**Figura 57.** Fattori che influenzano la definizione del GSD

Secondo lo schema riportato in Figura 57 la definizione del GSD è legata alle regole geometriche che stabiliscono la similitudine di due triangoli. Due triangoli sono simili se hanno ordinatamente gli angoli uguali e i lati in proporzione; il rapporto tra due lati omologhi è quindi costante.

dimensione pixel : dimensione oggetto = focale : altezza (distanza) di presa

$$\text{cioè } d : D (\text{GSD}) = f : H$$

dove  $d$  è la dimensione del pixel ottenuta come rapporto tra la dimensione del sensore (dato tecnico della fotocamera) e il numero di pixel in ogni fotogramma (dato contenuto nell'EXIF delle foto). In definitiva, a parità di quota/distanza di scatto la GSD (pixel) è tanto più piccola quanto più grande è la focale e viceversa.

Per utilizzare le immagini digitali a scopo fotogrammetrico è necessario definire la relazione tra la posizione del pixel e il sistema di coordinate immagine e a tal fine la dimensione del pixel è legata alla definizione del sistema di riferimento interno dell'immagine che ha l'origine spostata di mezzo pixel all'esterno della matrice immagine (Figura 58). Per determinare le coordinate immagine del centro di un pixel si ottengono moltiplicando il numero di indice per la dimensione del pixel.

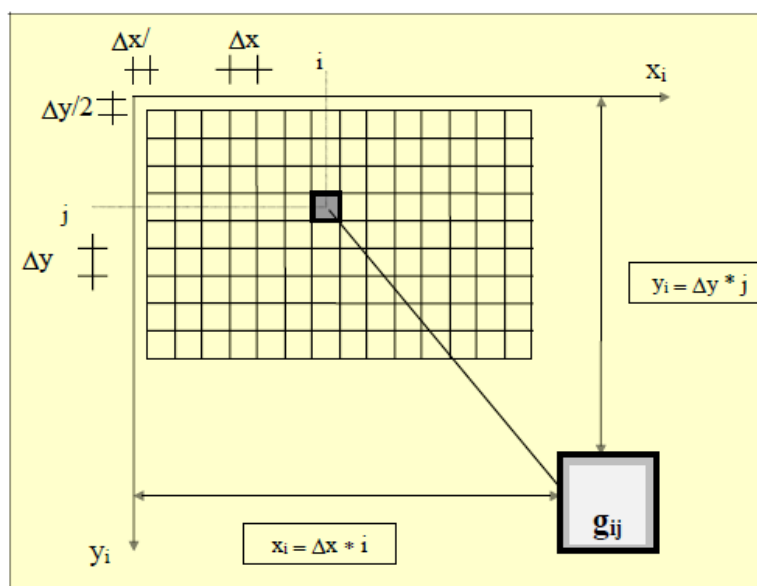


Figura 58. Sistema di riferimento in una immagine digitale

Successivamente, sfruttando le relazioni analitiche della fotogrammetria è possibile trasformare la posizione del pixel all'interno della matrice in coordinate reali oggetto.

## 5.7 I sensori nelle camere digitali

I sensori utilizzati nelle fotocamere digitali possono essere del tipo CCD (Charged Coupled Device ovvero dispositivo ad accoppiamento di carica) o del tipo C-MOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor ovvero semiconduttore a metallo ossido complementare) (Figura 59).

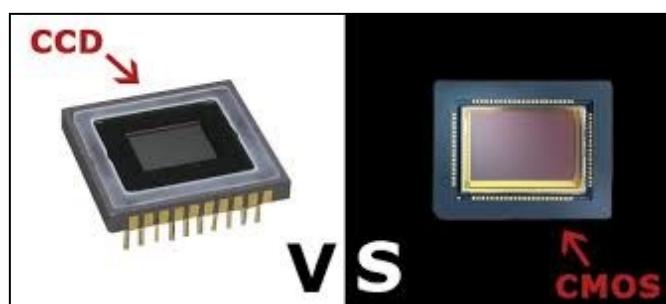


Figura 59. Sensori CCD (a sinistra) e CMOS (a destra)

L'elemento base che costituisce entrambe le tipologie di sensore è il fotodiodo, elemento fotosensibile che converte un segnale luminoso (fotoni) in carica elettrica (elettroni). In questo modo ogni elemento di base è in grado di fornire in uscita una carica elettrica proporzionale alla quantità di fotoni (intensità di luce) da cui è stato colpito.

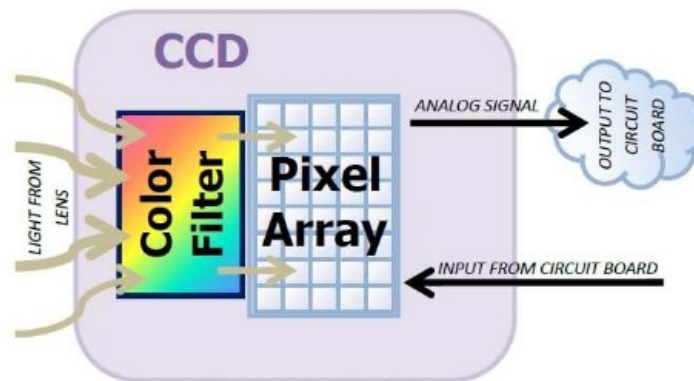
I sensori CCD, i primi ad essere stati creati (Boyle e Smith, 1970), si basano sul principio fisico dell'effetto fotoelettrico. La struttura, il cui costituente fondamentale è il silicio, è formata da una matrice di elementi, detti pixel, ognuno dei quali è costituito da fotodiodi dedicati esclusivamente alla lettura della luce. In questo tipo di sensori durante il processo di conversione in voltaggio la carica elettrica viene trasferita attraverso pochi "nodi" di uscita ed esce dal sensore come segnale analogico, si genera un segnale molto uniforme che conferisce qualità all'immagine.

Grazie a questa particolare struttura, quando si genera una differenza di potenziale tra l'anodo e il catodo, si crea, immediatamente sotto lo strato di ossido, una zona (detta svuotamento) priva di cariche positive; esse infatti si spostano verso il basso del substrato per effetto della polarizzazione positiva a cui è sottoposto l'elettrodo di alluminio.

E' possibile schematizzare il funzionamento di un sensore CCD in quattro differenti fasi:

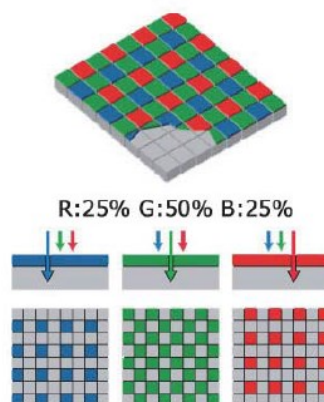
- la generazione delle cariche per effetto fotoelettrico
- la raccolta delle cariche;
- il trasferimento delle cariche, variando i potenziali degli elettrodi in modo opportuno;
- l'estrazione della carica mediante il circuito di uscita.

Un'ulteriore componente del sensore CCD è il filtro di colore che scompone la luce incidente sul pixel nelle tre bande RGB, solitamente rosso, verde o blu ma anche ciano, giallo, verde e magenta, in funzione della tipologia di filtro utilizzato, e consente, dopo un'opportuna fase di rielaborazione dei dati, una visione dell'immagine a colori (Figura 60).



**Figura 60.** Parti principali di un sensore CCD

Il filtro più utilizzato è il filtro di Bayer (Figura 61) che, costituito da una matrice di filtri colorati con un determinato reticolo spazialmente periodico composto dallo stesso numero di elementi del sensore e perfettamente allineati a ciascun fotodiodo del sensore stesso, permette il passaggio di una sola banda di lunghezza d'onda della luce corrispondente ad un ben determinato colore. Ciò determina il fatto che solamente un colore viene misurato per ogni pixel del sensore ed è la camera a dover stimare i due colori mancanti in corrispondenza di ciascun pixel. La stima dei colori mancanti avviene per interpolazione con i valori dello stesso colore adiacenti (demosaicizzazione). In questo modo si ottengono tre immagini che sovrapposte restituiscono l'immagine RGB. Un inconveniente di questa tecnica è la creazione di un effetto di aberrazione cromatica sulle immagini ed una riduzione nel contrasto dell'immagine, che può generare problemi se le immagini devono essere utilizzate per scopi metrici.



**Figura 61.** Filtra di Bayer

Il sensore CMOS, invece, è un sensore d'immagine che, a differenza del CCD, contiene gran parte delle funzionalità necessarie in ogni singolo pixel. In un sensore CMOS ogni singolo fotodiodo è accoppiato ad un convertitore che trasforma l'energia luminosa in voltaggio, e spesso anche a dei convertitore analogico digitale e un controllore digitale che determinano l'uscita di un segnale in formato digitale. A causa di questi ulteriori circuiti, lo spazio dedicato alla cattura della luce è ridotto e di conseguenza anche l'uniformità del segnale.

Le principali parti di un sensore C-MOS sono: il filtro di colori, la matrice di pixel, il controllore digitale e il convertitore analogico digitale (Figura 62).

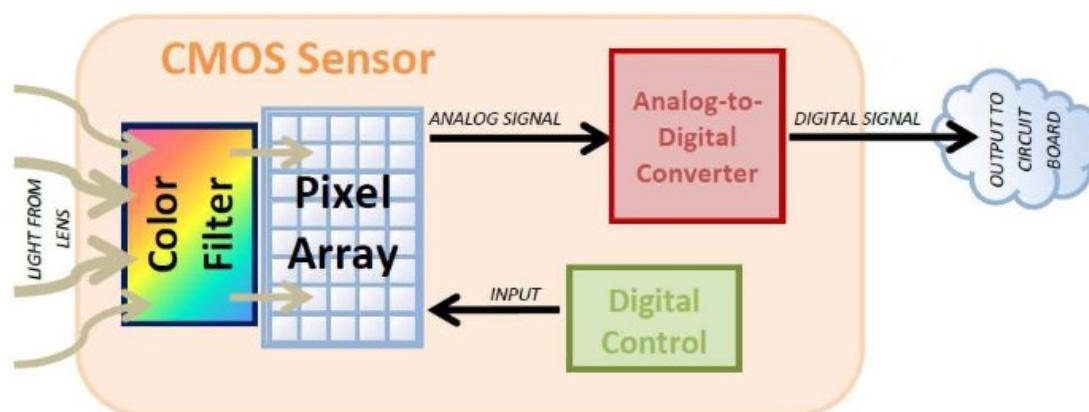


Figura 62. Parti principali di un sensore CMOS

I sensori CMOS sono molto più semplici dei sensori CCD e la trasformazione da carica elettrica a tensione avviene all'interno di ogni pixel. Infatti, quando la luce precedentemente filtrata dal filtro di colore raggiunge la matrice di pixel, ogni singolo pixel converte la luce in una tensione amplificata che verrà elaborata dal resto del sensore che trasferisce direttamente il Digital Number

Come si è visto in precedenza, nei sensori CCD, invece, la carica di ogni pixel è trasferita ad un nodo di output (chip) per essere poi convertita tutta insieme in tensione, memorizzata ed inviata come segnale analogico alla camera, che poi lo trasferisce come Digital Number.

Le differenze tecniche tra i due sensori influenzano la maniera in cui questi due diversi dispositivi vengono utilizzati. Sebbene l'idea di un pixel con amplificatore incorporato

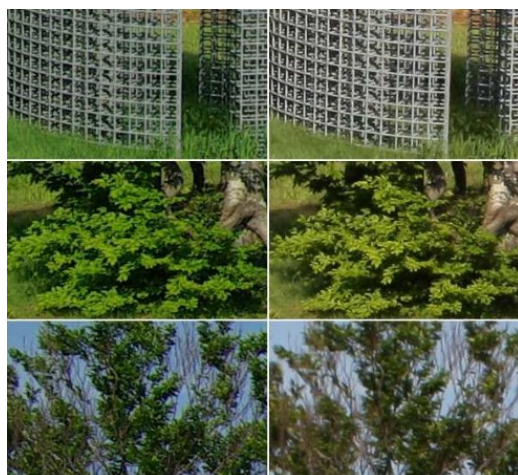
esistesse già negli anni '70, solo negli ultimi decenni si è dato avvio alla fabbricazione di tali sensori proprio grazie ai continui sviluppi di integrazione dei circuiti CMOS che sono diventati competitivi, sia dal punto di vista prestazionale che da quello commerciale, nei confronti dei diretti concorrenti CCD.

Le differenze principali possono essere così riassunte:

- il CCD crea un'immagine di alta qualità e basso livello di rumore, mentre il CMOS è più suscettibile al rumore
- il CCD consuma una grande quantità di energia, mentre il CMOS consente di risparmiarla
- i sensori di tipo CCD sono più costosi dei CMOS
- i sensori CMOS hanno una maggiore complessità costruttiva dei CCD

In linea generale i sensori CCD superano i CMOS in termini di qualità dell'immagine, però hanno bisogno di più energia e sono lenti nelle operazioni read in/out. Al contrario i sensori CMOS acquisiscono le immagini molto velocemente ma con una qualità inferiore rispetto al CCD in quanto la carica è amplificata per ogni pixel, quindi si ha una minore uniformità del dato in output (Figura 63).

Inoltre, i sensori CCD sono ampiamente utilizzati in ambiti che richiedono la massima qualità dell'immagine possibile (come quello fotografico, scientifico e industriale), anche a discapito delle dimensioni del sistema, mentre i sensori CMOS offrono più funzioni all'interno del chip, minore dissipazione di energia e la possibilità di realizzare un sistema di minori dimensioni.



**Figura 63.** Foto ottenute con CCD (colonna a sinistra) e sensori CMOS (colonna a destra)



L'impiego di uno o dell'altro sensore nel contesto fotogrammetrico è influenzato dalle prestazioni offerte dal sensore stesso come: la dimensione, il rumore del sensore, la risoluzione, il frame rate e la velocità dell'otturatore

La *dimensione* del sensore è una delle caratteristiche più importanti perché determina la quantità di luce che il sensore riesce a catturare e del rumore. Poiché un sensore è composto da tanti pixel, maggiore è lo spazio su cui i pixel sono distribuiti maggiore sarà la loro dimensione e quindi maggiore è anche la quantità di luce che il sensore riesce a catturare.

Sebbene sensori più grandi sono in grado di riprodurre immagini qualitativamente migliori, bisogna tener presenti anche alcuni aspetti negativi legati ai costi, sensori più grandi hanno anche un costo maggiore, e alle ottiche utilizzabili. Per questi motivi la maggior parte delle fotocamere compatte presentano un sensore molto piccolo che determina la compattazione delle ottiche in maniera proporzionale.

Il *rumore* è un aspetto caratteristico di ogni sensore digitale. La forma di rumore più comune è rappresentato dal rumore termico (dark current), detto anche corrente di buio, propria di tutti i sensori digitali e insito al loro funzionamento. Il rumore termico, la cui entità dipende sia dalla qualità del sensore sia soprattutto dalla temperatura alla quale si trova il sensore, è determinato dalla presenza costante di un flusso di elettroni (corrente) sul sensore CCD, anche quando il sensore non è esposto alla luce.

La *risoluzione* indica la quantità di pixel presenti sul sensore il cui numero costituisce anche il dettaglio dell'immagine. A seconda del numero di pixel che il sensore della camera riesce a gestire, la qualità dell'immagine risultante varia in modo proporzionale: questo vuole dire che se nello stesso spazio trovano posto più pixel la loro dimensione sarà minore, rendendoli quindi meno visibili ad occhio nudo; risulta quindi più conveniente utilizzare una camera con una risoluzione maggiore.

Il *frame rate* è il numero di acquisizioni al secondo e cambia dal sensore CCD ai sensori CMOS. La differenza è dovuta al fatto che poiché un sensore CCD deve trasferire i dati di tutti i pixel per svuotare i suoi registri di trasmissione, prima che possano accogliere la successiva immagine, il frame rate massimo è dipendente dalla velocità di trasporto dei dati dai singoli; nei sensore CMOS invece, ogni pixel è dotato di convertitore in

voltaggio, quindi l'amplificatore del pixel non ha bisogno di essere veloce per supportare un alto frame rate.

La velocità dell'otturatore, che rappresenta la quantità di tempo in cui l'otturatore della camera rimane aperto, regola il passaggio della luce attraverso l'obiettivo e la conseguente impressione dell'immagine sul sensore. Poiché questa caratteristica è strettamente legata al tempo, può essere definita anche come “tempo di apertura” o “tempo di posa.

In casi di situazioni di estrema luminosità (all'aria aperta in pieno sole) vengono utilizzati tempi di esposizione molto brevi perché il sensore viene impressionato molto velocemente. In questi casi, infatti, l'uso di tempi di esposizione più lunghi, genererebbero normalmente fotografie “sovraesposte”.

In condizioni di scarsa illuminazione, invece, i sensori CCD, che hanno una maggiore superficie fotosensibile rispetto all'area complessiva del sensore rispetto al pixel di un CMOS, generano un output più omogeneo mentre i sensori CMOS, in cui la superficie fotosensibile è minore, generano un'immagine con illuminazione e rumore poco uniformi.

## **5.9 Problematiche relative all'uso dei SAPR in ambito fotogrammetrico**

In ambito fotogrammetrico, lo sviluppo dei SAPR, come mezzo per acquisire dati spazialmente referenziati, è dovuto soprattutto alla possibilità offerta da tali velivoli di eseguire rilievi aerei a bassa quota, necessari per ottenere rilievi fotogrammetrici di dettaglio per esempio in ambito architettonico, archeologico e ambientale.

Tra i principali vantaggi nell'utilizzo di tali sistemi vi sono la rapidità di acquisizione del dato e la riduzione dei costi di impiego. Inoltre, grazie alla loro ridotta dimensione, i SAPR consentono di superare i limiti imposti dalla grandezza dei velivoli convenzionali generalmente utilizzati per le acquisizioni aeree e permettono di eseguire voli a quote diversificate che consentono di operare voli in prossimità degli oggetti da rilevare.

Poiché i SAPR volano a quote più basse rispetto ai classici aerei utilizzati per le riprese fotogrammetriche, non meno importante è il vantaggio di poter utilizzare questi mezzi per realizzare rilievi anche in presenza di nuvole che limitano l'operatività dei classici aerei i quali hanno delle quote minime di volo di gran lunga superiori a quelle necessarie per il volo di un SAPR. Di contro, la ridotta quota di volo e la ridotta dimensione dei sensori, rispetto ad un volo aereo classico, costringe a rivedere le tradizionali procedure di pianificazione del volo e di elaborazione delle immagini.

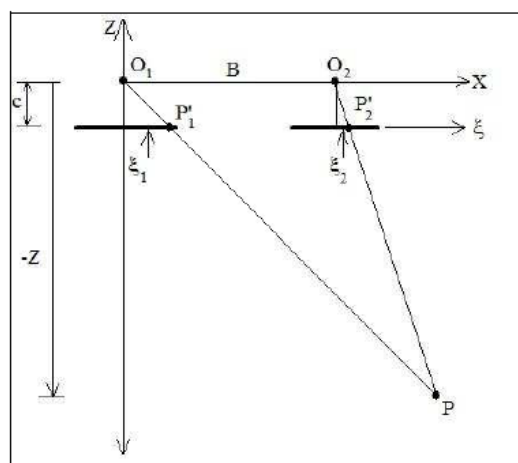
Uno degli aspetti fondamentali nell'uso dei SAPR per scopi fotogrammetrici è legato al numero dei fotogrammi acquisiti. Poiché questi sistemi sono equipaggiati con camere generalmente utilizzate per la fotogrammetria terrestre, che presentano dimensioni dei sensori notevolmente più piccole delle camere digitali aeree, è necessario, a parità di area da rilevare, acquisire un maggior numero di fotogrammi per garantire le adeguate sovrapposizioni tra fotogrammi successivi.

In ambito fotogrammetrico, lo straordinario impiego dei SAPR è determinato anche dall'opportunità di equipaggiare il mezzo con svariate tipologie di sensori. In particolare, i limiti imposti dal payload dei SAPR, variabile in un range compreso tra 100g e 5Kg come nel caso di SAPR equipaggiati con sensori LIDAR, favoriscono l'utilizzo di camere a basso costo, che utilizzano sensori caratterizzati da focali e dimensioni del pixel variabili a seconda del tipo di sensore, e che consentono di acquisire immagini con elevato livello di dettaglio e con un Ground Sample Distance (GSD, dimensione del pixel a terra) anche dell'ordine del millimetro.

Le camere fotografiche digitali utilizzate sui SAPR sono camere non metriche, di tipo compatto e di tipo reflex, che causa della geometria interna della camera sconosciuta e variabile nel tempo, determinano la presenza di rilevanti effetti della distorsione dell'ottica nelle sue principali forme: distorsione radiale o simmetrica, distorsione tangenziale o asimmetrica e la distorsione affine. Infatti, l'utilizzo di una camera non metrica per scopi fotogrammetrici rende particolarmente importanti le problematiche connesse alla calibrazione della camera utilizzata a tal punto che la fase di calibrazione della camera stessa è un pre-requisito necessario all'estrazione dalle immagini di informazioni metriche tridimensionali precise e affidabili.

La presenza di un sistema GNSS per la navigazione e di sensori per il controllo dell'orientamento, consente al SAPR di percorrere in maniera completamente autonoma una rotta attraverso la riproduzione di un piano di volo caricato sul velivolo e questo determina la diffusione dei SAPR per acquisizioni tipiche della fotogrammetria aerea. Inoltre, la possibilità di installare sulla camera con cui il mezzo è equipaggiato, un sistema GNSS (per esempio detto Geobox per l'esacottero Aibot x6-v2 della Aibotix), differente dai sensori GNSS di navigazione contenuti all'interno dell'IMU, consente di acquisire immagini georeferenziate che possono immediatamente essere processate.

Anche l'assetto di volo durante la presa delle immagini riveste un ruolo fondamentale nell'acquisizione di dataset fotogrammetrici: basti pensare che, quando si pianifica un rilievo fotogrammetrico aereo si parte dall'ipotesi di "caso normale" (Figura 64). In questa configurazione, in cui le immagini sono acquisite in maniera tale che siano tra di esse sovrapposte e con gli assi ottici paralleli tra loro, gli angoli di assetto, omega ( $\omega$ , rotazione intorno all'asse della direzione di volo) e phi ( $\phi$ , rotazione intorno all'asse trasversale alla direzione di volo) sono nulli contrariamente a kappa ( $\kappa$ , rotazione intorno all'asse che completa la terna di assi) che dipende dalla direzione di volo.



**Figura 64.** Assetto di volo per presa normale

Nonostante i tanti aspetti positivi, i SAPR presentano un grande limite determinato dalla autonomia di volo che, oltre dalla dimensione del velivolo e dal payload è fortemente influenzata anche dalla presenza del vento. Durante il volo, la presenza di vento contribuisce a rallentare o accelerare il mezzo che al fine di assicurare un andamento

costante richiede una maggiore potenza ai motori che di conseguenza contribuiscono ad aumentare il dispendio di energia. Di conseguenza, l'accelerazione e la decelerazione del mezzo influenza la corretta realizzazione del piano di volo perché, sotto queste condizioni, il mezzo non riesce ad assicurare la corretta sovrapposizione tra fotogrammi successivi aspetto fondamentale per l'esecuzione di un rilievo fotogrammetrico.

## **5.10 Fasi operative del rilievo fotogrammetrico aereo da SAPR**

L'iter metodologico di acquisizione ed elaborazione di dati provenienti da prese aeree da SAPR prevede una serie di operazioni che in parte vengono svolte in laboratorio ed in parte vengono svolte in campo.

In particolare, il rilievo fotogrammetrico aereo di prossimità da SAPR prevede 3 fasi di seguito elencate:

- progetto del rilievo;
- esecuzione dei voli;
- elaborazione dei dataset.

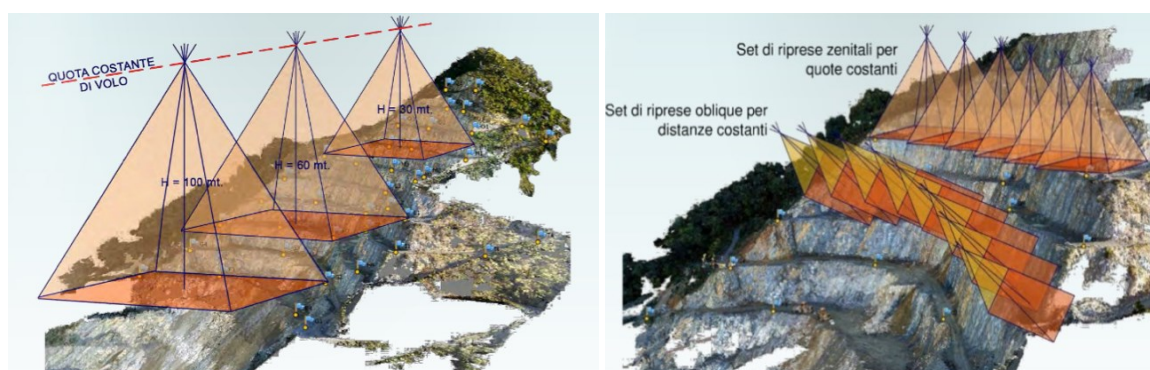
Le operazioni che vengono svolte in laboratorio sono quelle preliminari che prevedono la progettazione del rilievo; quelle svolte in campo, prevedono, invece, oltre l'esecuzione dei voli anche il rilievo topografico di una serie di punti di appoggio opportunamente materializzati sull'area da sorvolare. Infine vi è la fase di elaborazione dei dati che prevede la triangolazione fotogrammetrica, la ricostruzione del modello 3D e la generazione di DTM e ortofoto.

Le fasi di progettazione ed esecuzione di un rilievo aereo di prossimità da SAPR sono fortemente influenzate da una serie di parametri il cui studio si rivela fondamentale affinché i dataset acquisiti durante il volo abbiano le caratteristiche attese e siano utilizzabili per la successiva fase di restituzione.

Il primo elemento da valutare per la progettazione di un rilievo aereo di prossimità da SAPR è lo schema di presa. A tal fine, un aspetto particolarmente importante in fase di

progettazione dei voli è lo studio dell'oggetto del rilievo e dell'orografia dell'area del sorvolo che permette di determinare l'orientamento dei piani voli.

Generalmente, in fotogrammetria aerea le prese sono effettuate seguendo uno schema nadirale (Figura 65) in cui l'immagine è acquisita esclusivamente dall'alto verso il basso; nella fotogrammetria aerea da SAPR, invece, grazie al fatto che la camera può essere montata sul gimbal, è possibile effettuare acquisizioni oltre che con prese nadirali anche con prese inclinate.



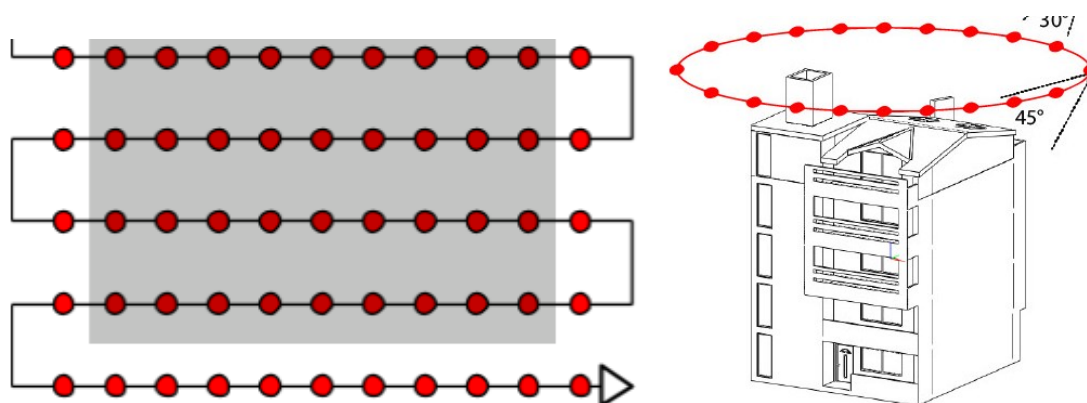
**Figura 65.** Assetto di volo: (a) presa nadirale; (b) presa inclinata e nadirale

L'elettronica di bordo, grazie al GNSS integrato ed al sistema di controllo permette al SAPR di eseguire i voli sia in maniera autonoma da piano di volo, scattando automaticamente le fotografie, sia in modalità manuale, sotto il diretto controllo del pilota.

Durante l'acquisizione in modalità autonoma, il velivolo segue una traiettoria rettilinea, a velocità e quota di volo costante, assegnati da piano di volo, seguendo direzioni parallele analogamente ai velivoli convenzionali; oppure, ruota a 360° attorno all'oggetto del rilievo se, in fase di pianificazione del volo, si è introdotto un punto di interesse (Figura 66). Ciò però è valido soltanto teoricamente; nella pratica, durante il volo il velivolo è influenzato da agenti esterni come il vento che agiscono sul mezzo variandone la traiettoria e la velocità.

In fase di pianificazione del volo, il SAPR permette di realizzare il rilievo sfruttando due differenti modalità di acquisizione dei fotogrammi: con scatto continuo o con scatto sui waypoint. La prima modalità di acquisizione permette alla camera di acquisire in

continuo con scatti ad intervallo di tempo; con la seconda modalità, invece, le immagini vengono acquisite esclusivamente in corrispondenza dei waypoint, ovvero punti di stazionamento del mezzo durante la realizzazione della traiettoria.



**Figura 66.** Traiettoria del SAPR durante l'acquisizione dei fotogrammi

I fotogrammi ripresi lungo uno stesso percorso rettilineo costituiscono una strisciata e l'insieme di più strisciate è definito blocco fotogrammetrico.

Stabilito lo schema di presa, l'intera pianificazione del volo dipende dalla quota di volo, da cui dipende la scala dei fotogrammi, e dalle caratteristiche della camera utilizzata per l'acquisizione dei fotogrammi. Inoltre, analogamente ai rilievi eseguiti con gli aerei convenzionali, in fase di progettazione del volo, per assicurare che la fase di elaborazione dei dataset avvenga correttamente, un parametro fondamentale è il ricoprimento, ovvero la sovrapposizione longitudinale e trasversale tra due fotogrammi successivi. Poiché è necessario che ogni punto rilevato sia visibile su più fotogrammi, è necessario fissare la percentuale di sovrapposizione tra fotogrammi successivi (Figura 67a-b), detto ricoprimento longitudinale (lungo la strisciata) e ricoprimento trasversale (tra strisciate adiacenti).

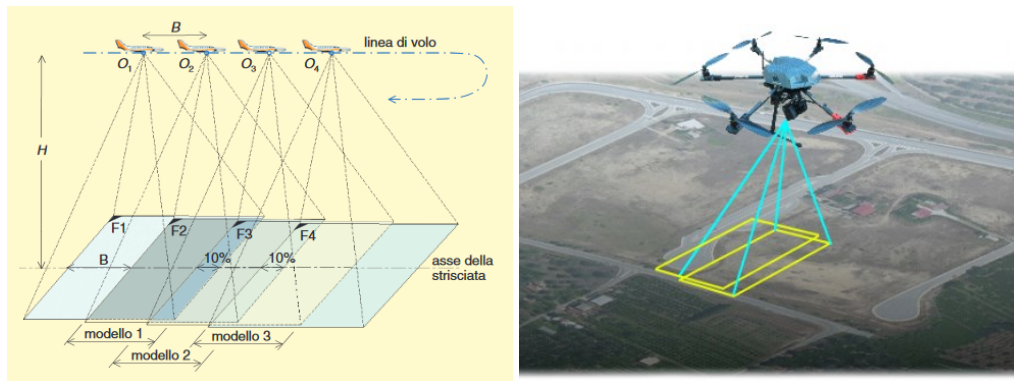


Figura 67. Sovrapposizione tra fotogrammi successivi: (a) schematizzazione; (b) caso reale

Il ricoprimento e la quota di volo consentono di determinare il numero dei fotogrammi necessari per acquisire l'oggetto del rilievo, il tempo necessario per l'esecuzione del volo, e l'abbracciamento (figura 68), ovvero la porzione di oggetto contenuta all'interno di ciascun fotogramma, la base di presa, ovvero la distanza tra i centri di presa di due fotogrammi successivi, che è pari alla distanza percorsa dal velivolo tra due scatti consecutivi, e l'interasse tra strisciate parallele (Figura 69).

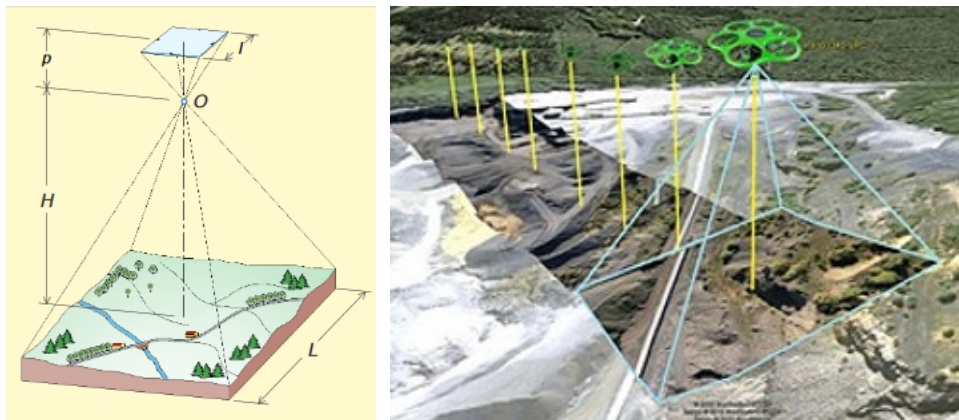
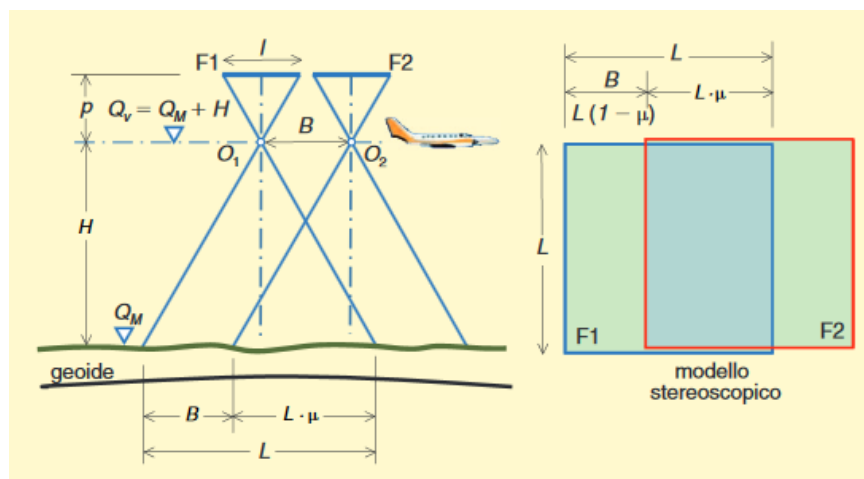


Figura 68. Determinazione dell'abbracciamento





**Figura 69.** Parametri che influenzano la progettazione di un volo

La stima di tutti i parametri che intervengono nella progettazione di un rilievo aereo, consente di calcolare il numero complessivo dei fotogrammi necessari a coprire l'area da rilevare e di stimare il costo del rilievo e il tempo necessario. A causa della ridotta autonomia delle batterie, spesso durante la progettazione di un volo da SAPR, è necessario suddividere i piani di voli in più voli per consentire la sostituzione delle batterie.

In generale, è opportuno che i voli siano realizzati solo con condizioni meteorologiche ottimali (assenza di vento, ma anche di foschia) e negli orari centrali della giornata per sfruttare la massima illuminazione disponibile e per minimizzare l'influenza delle ombre al suolo.

## 5.11 Tecniche automatiche per le applicazioni fotogrammetriche

La fotogrammetria analitica in uso tra gli anni '70 e gli anni '90 del secolo scorso prevedeva la disponibilità e l'utilizzo di uno stereo-restitutore analitico con annesso personal computer e software dedicato, oltre alla dotazione di una camera metrica. Il computer non era la componente principale, ma semplicemente un raccogliitore di dati che

venivano generati dallo stereo-restitutore, una macchina dotata di un'ottica molto sofisticata attraverso cui visualizzare e restituire il modello stereoscopico.

Oggi, invece, con l'avvento della fotogrammetria digitale, e quindi il passaggio dai fotogrammi analogici alle immagini digitali, la fase della restituzione si realizza sfruttando il computer per ricostruire un modello 3D completo. L'elaborazione delle immagini acquisite è realizzato sfruttando la Computer Vision (CV), tecnica di visione artificiale o computazionale volta a riprodurre le abilità della visione umana in dispositivi elettronici per l'acquisizione e la comprensione delle immagini.

Lo scopo principale della CV è quello di ricostruire ciò che l'uomo vede del mondo reale ed in particolare la forma, l'illuminazione e la distribuzione del colore in un dato oggetto o scena reale rappresentati in una o più immagini (Szeliski, 2011). Poiché, la CV è “il campo dove informazioni significative devono essere ricavate/estratte automaticamente dalle immagini” (Shapiro & Stockman, 2001) al computer è demandato il compito più importante di interpretare le immagini (Trucco & Verri, 1998).

La CV sfrutta gli algoritmi di SfM per estrarre i parametri di orientamento interno ed esterno e gli algoritmi di Dense Image Matching per estrarre le informazioni necessarie dalle immagini al fine di ricostruire tridimensionalmente una scena o un oggetto.

Nonostante, il principale obiettivo della fotogrammetria è l'accuratezza del risultato, mentre quello della CV la qualità del contenuto informativo e descrittivo della scena, l'integrazione tra le due tecniche ha permesso di sfruttare l'elevato livello di automazione della CV al fine di rendere l'intero processo fotogrammetrico molto più efficiente. Ciò è dovuto al fatto che la CV fornisce alla fotogrammetria degli algoritmi e dei modelli matematici alternativi che hanno semplificato i problemi di orientamento e di identificazione dei punti omologhi, utilizzando contemporaneamente i modelli geometrici e stocastici rigorosi della fotogrammetria tradizionale.

La recente integrazione tra gli algoritmi della CV e le procedure fotogrammetriche ha favorito lo sviluppo di procedure ed algoritmi che hanno automatizzato l'intero processo, comprendendo sia le procedure di orientamento (Remondino e altri, 2012) che le procedure di ricostruzione 3D a differenti scale (Lafarge e altri, 2012; Haala, 2013).

Oggi, sempre più software commerciali offrono, al loro interno, moduli di orientamento automatico di blocchi anche senza l'ausilio di target per l'individuazione dei punti omologhi. Queste procedure consentono di ottenere dalla definizione delle coordinate di punti oggetto sparsi fino alla creazione di vere e proprie nuvole di punti di significativa consistenza (Figura 70).



Figura 70. Ricostruzione tridimensionale di una scena

### 5.11.1 Structure from Motion

La strategia SfM consente di ricostruire una nuvola di punti sparsi di una scena o di un oggetto una volta determinate le caratteristiche corrispondenti, dette features, nelle diverse immagini catturate in serie da punti di vista differenti.

Essenzialmente gli algoritmi SfM, avendo a disposizione delle immagini di una scena prese da punti diversi, permettono di stimare il movimento tra le viste (posizione, orientamento e focale della camera) e utilizzare questo movimento in 3D per creare la struttura della scena (Figura 71) (Fermüller & Aloimonos).

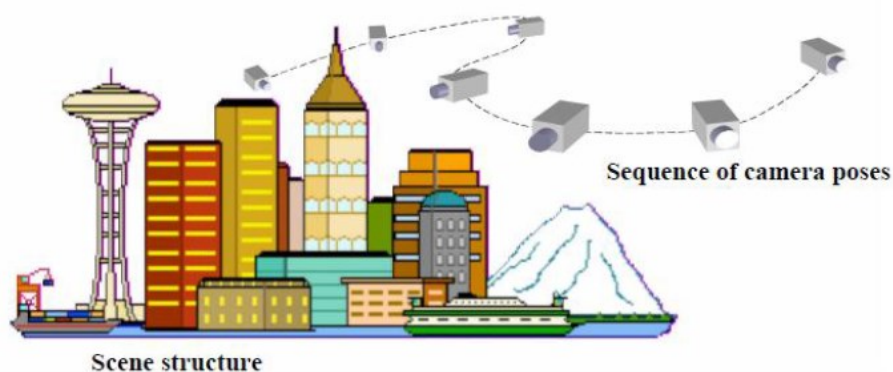
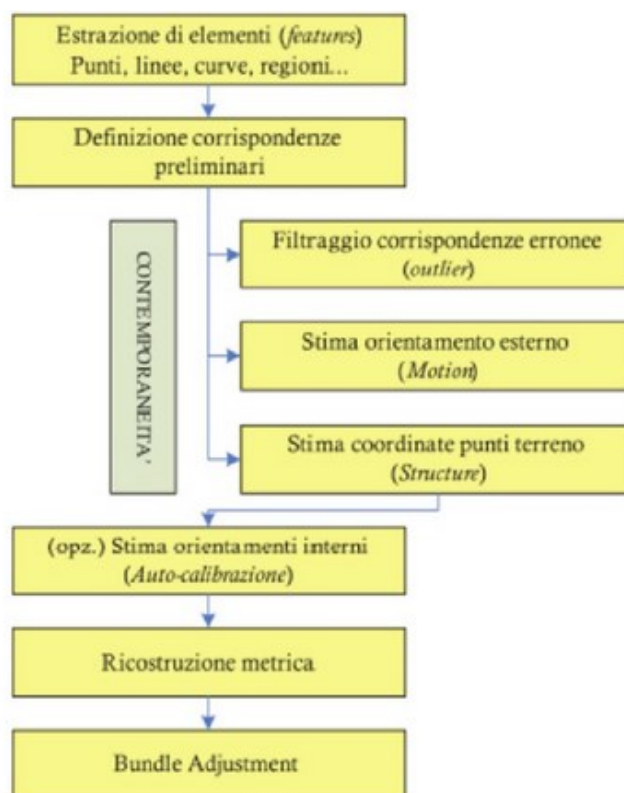


Figura 71. Funzionalità degli algoritmi SFM

Negli anni '90, con l'impiego di camere digitali nell'ambito fotogrammetrico, con la SfM si sviluppa una tecnica di calcolo che, nonostante i parametri di calibrazione della camera siano sconosciuti, permette di ricostruire la forma di oggetti attraverso la collimazione automatica di punti da un insieme di foto. Grazie alla SfM, infatti, è possibile risolvere orientamenti interni ed esterni di un blocco fotogrammetrico ricavando dalle fotografie tutte le informazioni necessarie e quindi con il minor numero di informazioni note a priori.

In particolare, questo algoritmo è formulato per individuare e descrivere le features locali in ciascuna immagine e per far corrispondere questi punti bidimensionali nelle immagini multiple. Utilizzando le corrispondenze come input, l'algoritmo di SfM stima il posizionamento di questi punti di interesse nelle coordinate di un sistema di riferimento locale, che prende il nome di spazio modello, e produce una nuvola di punti tridimensionale sparsa che rappresenta la geometria della scena. Nello specifico, l'algoritmo prevede tre differenti step (Figura 72):

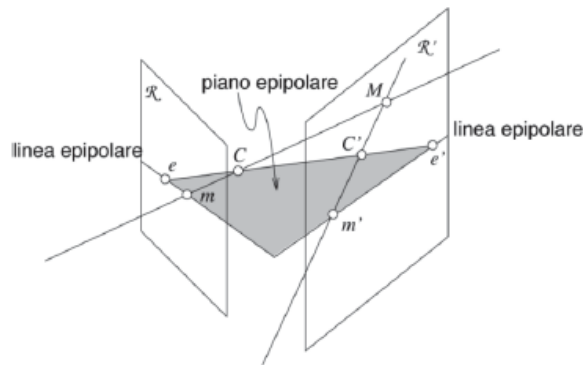
- 1- Rilevamento ed estrazione delle *feature* e individuazione dei punti di legame (*keypoint*);
- 2- Accoppiamento delle *feature*: una volta individuati ed estratti i punti omologhi, viene eseguito il loro accoppiamento (*matching*) nelle diverse immagini;
- 3- Stima dei parametri della camera: calcolo dei parametri di orientamento interno ed esterno attraverso una procedura iterativa.



**Figura 72.** Workflow generale per la risoluzione della SfM (Roncella 2007)

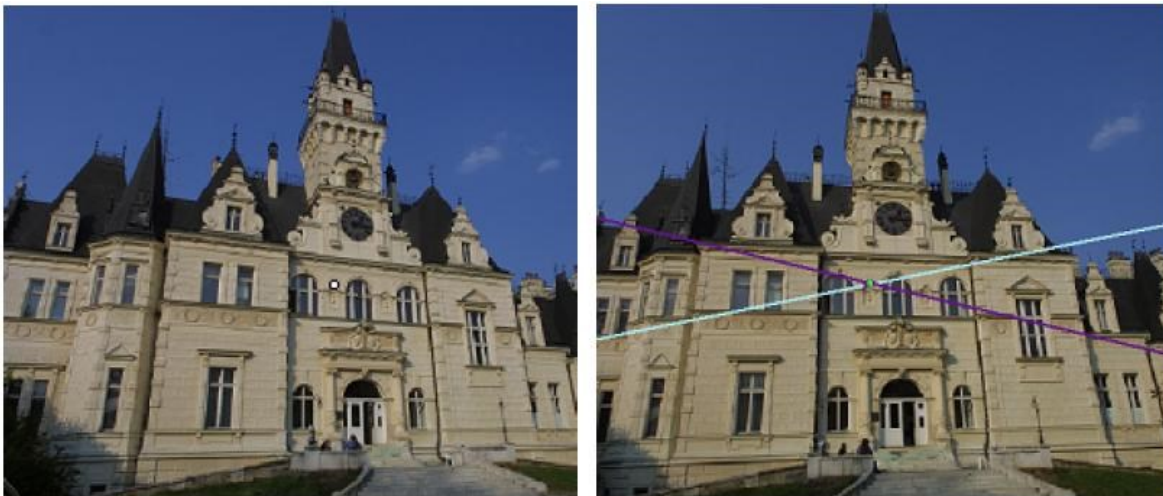
La risoluzione delle procedure automatiche di orientamento delle immagini prevede che venga calcolata la geometria proiettiva relativa delle immagini. Per descrivere le relazioni e i vincoli geometrici che legano due immagini della stessa scena catturata da due fotocamere con posizione e orientamento distinto, si utilizza la geometria epipolare secondo la quale il corrispondente di un punto su un'immagine può trovarsi solo su una retta (detta epipolare) nell'altra immagine. Il vincolo epipolare, poiché permette di ridurre lo spazio di ricerca delle corrispondenze, consente di minimizzare la presenza di false corrispondenze.

Gli elementi principali della geometria epipolare (Figura 76) sono rappresentati: dagli epipoli, che sono i punti di intersezione dei piani immagine con la retta passante per i centri ottici e sono congiunti dalla retta chiamata baseline; dalle rette epipolari, che congiungono gli epipoli con le proiezioni dei centri ottici; infine, dal piano epipolare, che è il piano su cui giacciono la baseline e le rette epipolari.



**Figura 73.** La geometria epipolare

Sfruttando sia la rappresentazione algebrica della geometria epipolare, ovvero la cosiddetta matrice epipolare, che è una matrice  $3 \times 3$ , sia la regola fondamentale della geometria epipolare secondo la quale il corrispondente di un punto su un'immagine può trovarsi nell'altra immagine solo sulla corrispondente retta epipolare, è possibile trovare le corrispondenze tra punti omologhi tramite geometria epipolare (Figura 74).



**Figura 74.** Corrispondenze tra punti omologhi tramite geometria epipolare

Le tecniche automatiche per l'identificazione dei keypoints, ovvero punti salienti il più possibili identificativi di quella porzione di immagine, si basano, oltre che sull'ausilio della geometria epipolare, attraverso cui è possibile ridurre lo spazio di ricerca delle corrispondenze tra punti coniugati, anche su algoritmi di ultima generazione denominati operatori di interesse (keypoint detector).

Questi algoritmi, determinate le posizioni dei keypoint, calcolano i descrittori, ovvero strutture che codificano l'informazione contenuta nei pixel in un intorno di ciascuno di essi, e poiché i descrittori devono permettere il confronto tra features sono il più possibile invarianti rispetto alle variazioni di scala, rotazione, traslazione e al cambio di illuminazione e dei punti di vista.

In questa fase i descrittori ricercano punti omologhi da accoppiare o in zone ristrette come spigoli o elementi con discontinuità radiometriche (point detector) oppure in zone più ampie come regioni, superando in questo caso, problemi di occlusione e di deformazioni prospettiche (region detector).

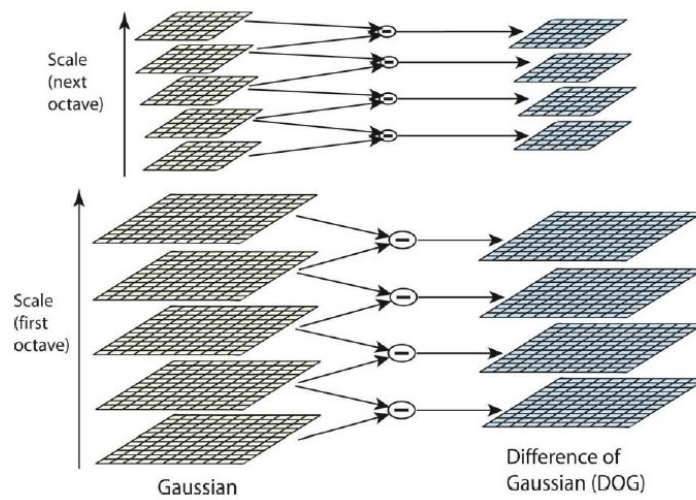
Le corrispondenze precedentemente determinate, sono utilizzate nella fase successiva per il calcolo dei parametri di orientamento interno ed esterno che permettono la ricostruzione reale del blocco fotogrammetrico e della scena. Naturalmente, affinché i parametri di orientamento vengano correttamente determinati è necessario che le immagini utilizzate abbiano una elevata percentuale di sovrapposizione per garantire la presenza di un elevato numero di corrispondenze.

Esistono diversi keypoint detector i cui algoritmi si differenziano per velocità computazionale, robustezza e impiego di risorse e vengono adottati in base al particolare scopo (generalmente registration o recognition).

Gli operatori di interesse più noti sono il SIFT (Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 2000) e il SURF (Speeded Up Robust Features); il primo è il più utilizzato perché rispetto alle variazioni di scala, rotazione, traslazione, punto di vista e illuminazione è uno degli operatori più robusti (Lowe, 2004).

Il SIFT (Scale Invariant Features Transform) è un operatore, proposto da Lowe nel 2004, che consente l'estrazione di features da un'immagine, in modo da garantire buone performance di matching da differenti viste di uno stesso oggetto o di una stessa scena. Le features estratte sono locali, invarianti a cambiamenti di scale (dovute ad esempio ad un'operazione di zoom) ed a rotazioni. Allo stesso tempo sono particolarmente robuste a cambi di illuminazione, rumore, trasformazioni geometriche affini e a variazioni del punto di vista nello spazio 3D.

Il SIFT ricerca i keypoint sull'intera immagine superando in tal modo i problemi legati alla presenza di occlusione e alla deformazione prospettica. Il processo di individuazione dei keypoint prevede prima il filtraggio delle immagini attraverso convoluzioni gaussiane che generano uno "spazio delle scale" (Figura 75) e poi, una volta calcolate le differenze tra gaussiane adiacenti, il calcolo dei massimi e dei minimi della funzione differenza. (Difference of Gaussian - DoG).



**Figura 75.** Calcolo della funzione DoG alle diverse scale

Lo "spazio delle scale"  $L(x, y, \sigma)$  è definito dall'equazione (7) (Lingua et al., 2009)

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (7)$$

dove:

$G(x, y, \sigma)$  indica le convoluzioni gaussiane

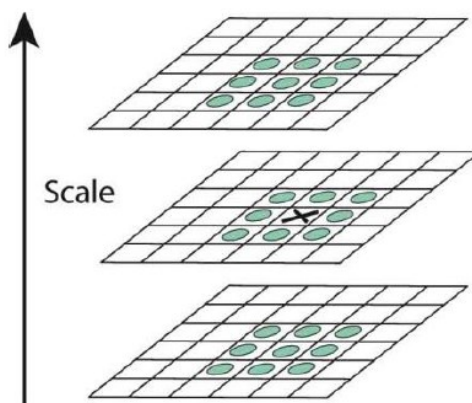
$I(x, y)$  indica le immagini

Invece, la differenza tra gaussiane adiacenti (DoG), calcolata come differenza tra gli 8 vicini individuati nell'immagine corrente e i 9 vicini che si trovano alla scala superiore e a quella inferiore è calcolata con l'equazione (8):

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (8)$$



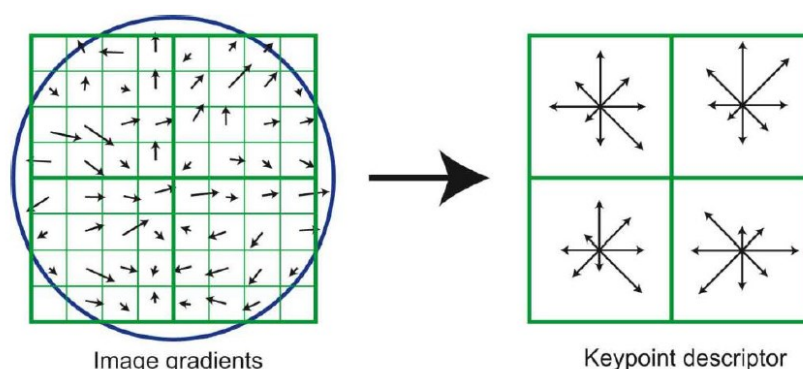
La localizzazione dei keypoint avviene solo se i minimi e i massimi della funzione differenze gaussiane  $D(x,y,\sigma)$  sono minimi e massimi assoluti (Figura 76).



**Figura 76.** Confronto del massimo individuato dalla funzione DoG con gli 8 pixel adiacenti e i 18 pixel localizzati alla scala superiore e inferiore

Successivamente, per assegnare ad ogni punto selezionato le coordinate immagine, la scala e l'orientamento si generano i descrittori locali. A tale scopo, per ogni singola immagine, sulla base dei gradienti individuati in una regione attorno al punto scelto, si individua l'orientamento dominante utile per ruotare l'immagine.

Il descrittore finale è costruito dividendo i 16 pixel vicini al keypoint in sotto-regioni di dimensioni 4x4 pixel; per ognuna di queste regioni vengono individuati 8 orientamenti: ciò comporta che ogni descrittore sia un vettore composto da 128 elementi (Figura 77).



**Figura 77.** Generazione dei descrittori locali: descrittore di dimensioni 2x2, costruito a partire da un set di 8x8 campioni dell'immagine.

Sulla base dei descrittori delle coppie di punti estratti dalle diverse immagini, valutando la distanza euclidea tra il punto più vicino e il secondo più vicino, l'algoritmo consente di

individuare i punti omologhi e allo stesso tempo eliminare tutti quei punti che non presentano un buon matching.

Il SURF (Speed Up Robust Feature), invece, è un operatore di interesse, proposto da Bay nel 2006 (Bay et al., 2006), che consente di estrarre features da una immagine in modo invariante rispetto a rotazioni, traslazioni, cambiamenti di scala, occlusioni parziali, deformazioni e cambiamenti di illuminazione, cambiamenti di prospettiva limitati.

Rispetto al SIFT, il SURF è caratterizzato da tempi computazionali inferiori nonostante dimostri un elevato livello di robustezza. La rapidità dell'algoritmo è dovuta al fatto che SURF utilizza le immagini integrali (Viola e Jones, 2001).

Il SURF, così come il SIFT prevede tre differenti step per la ricerca delle corrispondenze tra le immagini: l'identificazione dei punti di interesse, la descrizione della regione intorno al punto all'interno di un descrittore e il matching tra i diversi punti identificati sui fotogrammi.

Per la ricerca dei Keypoint, l'algoritmo utilizza la matrice Hessiana  $H(x, y)$  il cui determinante è utilizzato per la determinazione dello "spazio delle scale" (9).

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{vmatrix} L_{xx}(x, \sigma) & L_{xy}(x, \sigma) \\ L_{xy}(x, \sigma) & L_{yy}(x, \sigma) \end{vmatrix} \quad (9)$$

Dove:

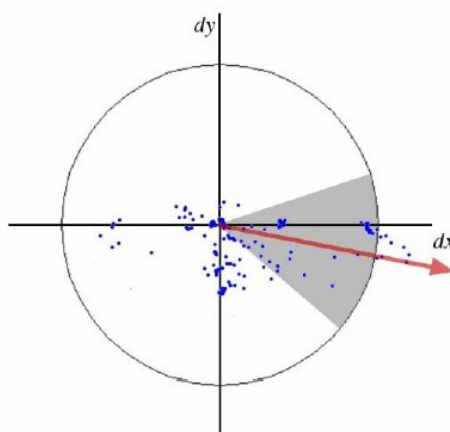
$L_{xx}(x, \sigma)$ ,  $L_{xy}(x, \sigma)$ ,  $L_{yy}(x, \sigma)$  sono le convoluzioni della derivata del secondo ordine della funzione Gaussiana

Lo "spazio delle scale" all'interno del quale vengono identificati i keypoint grazie all'uso delle immagini integrali è analizzato aumentando le dimensioni del filtro invece che ridurre iterativamente le dimensioni dell'immagine ed è implementato con una piramide di immagini ottenuta lisciando ripetutamente le diverse immagini attraverso una funzione di tipo gaussiano (Figura 78).



**Figura 78.** Uso delle immagini integrali permette di incrementare le dimensioni del filtro e mantenere costanti quelle dell'immagine

La prima fase di costruzione dei descrittori prevede, per ogni punto d'interesse, l'individuazione dell'orientamento dominante; questo processo può essere rappresentato con una serie di punti nello spazio bidimensionale e a partire da questi si determina l'orientamento dominante della features (Figura 79). In particolare, per ogni punto di interesse estratto nella precedente fase è identificato un orientamento attraverso la definizione di una funzione gaussiana (con  $\sigma=2s$ ) centrata nel punto di interesse che consente di pesare le risposte di Haar wavelet nelle direzioni  $x$  e  $y$ , in un intorno pari a 6 volte  $s$  attorno al punto di interesse (dove  $s$  rappresenta la scala alla quale il punto è identificato). La direzione dominante, assunta come orientamento locale, è stimata calcolando la somma di tutte le risposte con una finestra di orientamento mobile, avente dimensione pari a  $\pi/3$ ; il vettore più lungo tra tutti quelli calcolati con le diverse finestre definisce l'orientamento del punto di interesse.

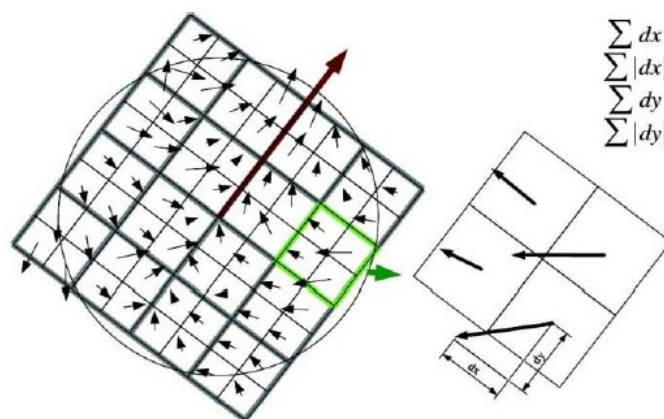


**Figura 79.** Assegnazione dell'orientamento dominante

Dopo aver determinato l'orientamento, il calcolo del descrittore è realizzato costruendo una regione quadrata centrata nel punto di interesse, suddivisa in sotto-regioni regolari di dimensioni 4x4 per preservare un maggior numero di informazioni spaziali, orientata come indicato dall'orientamento assegnato al punto (Figura 80).

Per ogni singola sotto-regione, la risposta di Haar Wavelet  $dx$  e  $dy$ , pesate con una funzione gaussiana centrata nel punto di interesse, sono sommate per formare un primo set di grandezze da inserirsi nel descrittore che assume la struttura (10):

$$v = (\Sigma dx; \Sigma dy; \Sigma |dx|; \Sigma |dy|) \quad (10)$$



**Figura 80.** Assegnazione dell'orientamento per ogni sotto-regione

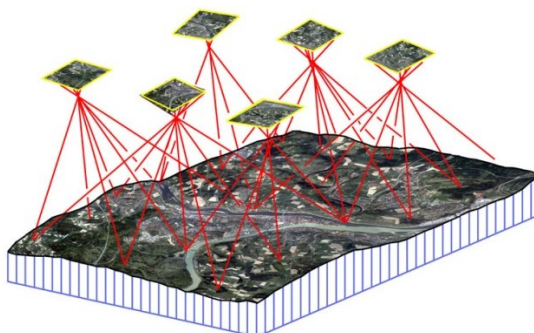
Successivamente, features corrispondenti sono accoppiate sfruttando la distanza euclidea tra i descrittori che permette di valutare la somiglianza tra due punti di interesse. In questa seconda fase, in funzione delle caratteristiche degli oggetti rilevati, è possibile che si verifichino errori nel matching dovuti al fatto che gli oggetti hanno caratteristiche molto simili o elementi ripetitivi: è possibile, infatti, che il punto sulla seconda immagine non sia individuato correttamente generando outlier (ovvero corrispondenze false ed errate).

Per migliorare la fase del matching è possibile definire un rapporto il cui valore determina la soglia di tolleranza per affermare che il punto estratto nella seconda immagine sia effettivamente il corrispondente del punto individuato nell'immagine di riferimento (Lowe, 2004). Sulla base di queste considerazioni, una coppia viene individuata come omologa se la distanza risulta inferiore a 0,7 volte la distanza dal secondo più vicino, incrementando in tal modo la robustezza del sistema.

### 5.11.2 Bundle adjustment

Per migliorare la precisione nel calcolo degli orientamenti e per minimizzare l'errore di retro-proiezione, molti software utilizzano una procedura iterativa nota come metodo dei fasci proiettivi o bundle adjustment. Il bundle block adjustment, formulato come un problema non lineare ai minimi quadrati, permette la definizione completa dei parametri di orientamento interno ed esterno di ciascun fotogramma.

In particolare, il bundle block adjustment, la cui unità elementare è costituita dal singolo fotogramma (Kraus, 1998), è un metodo di compensazione che permette di calcolare direttamente le relazioni fra coordinate “immagine” e coordinate “terreno”, senza introdurre le coordinate “modello” come passaggio intermedio e fonda la sua elaborazione sul fatto che il centro di presa e i punti immagine di ciascun fotogramma definiscono una stella di raggi nello spazio. Per stella di raggi si intende l'insieme dei raggi luminosi che, passando attraverso la lente, e quindi attraverso il centro di presa, intercettano i punti oggetto sul terreno ed i punti immagine su ciascun fotogramma (Figura 81).



**Figura 81.** Stella di raggi

Il nome bundle adjustment si riferisce ai bundles (fasci o raggi) luminosi che convergono al centro della fotocamera, la quale è Adjusted (registrata) perché il modello geometrico della camera e la sua posizione tridimensionale sono tali per cui i bundle passano per il centro del sistema ottico della fotocamera.

Il bundle adjustment, basandosi sulle equazioni di collinearità, consente di orientare, in modo analitico, due stelle di raggi di una coppia stereoscopica di fotogrammi e questo processo prende il nome di compensazione di un blocco fotogrammetrico con il metodo

delle stelle proiettive (Kraus, 1998). Il metodo è basato sul principio per il quale la stella proiettiva, processata in un' unica soluzione attraverso una tecnica ai minimi quadrati di minimizzazione e redistribuzione dell'errore, è traslata e ruotata in modo che i raggi omologhi si intersechino al meglio in corrispondenza dei punti di legame e passino il più possibile per i punti di appoggio. Le relazioni matematiche che si generano tra le coordinate immagine e le coordinate oggetto si basano sulle equazioni di collinearità descritte nel capitolo precedente.

Note le coordinate di alcuni punti oggetto (punti di appoggio), la compensazione di un blocco fotogrammetrico con il metodo delle stelle proiettive, basandosi su relazioni dirette fra coordinate immagine e coordinate oggetto consente di calcolare contemporaneamente sia le coordinate dei punti incogniti osservati nel modello che i parametri di orientamento esterno di due fotogrammi.

Poiché, i parametri di orientamento esterno di tutti i fotogrammi del blocco vengono calcolati simultaneamente a partire dalle coordinate immagine dei punti di legame e dalle coordinate immagine e terreno dei punti di appoggio, questo metodo viene utilizzato dai software per evitare l'accumulo di errori durante il calcolo degli orientamenti. E' possibile in tal modo ottenere sia le posizioni dei punti di legame collimati per ogni immagine, sia i parametri di orientamento esterno, riducendo al minimo le operazioni topografiche.

### 5.11.3 Dense Image Matching

In fotogrammetria digitale, quando si utilizzano procedure di orientamento e restituzione automatiche è fondamentale la ricerca dei punti corrispondenti sulle diverse immagini che riprendono la stessa porzione dell'oggetto.

Poiché, nella fase di restituzione la densità spaziale dei punti assume un carattere più importante rispetto alla sua molteplicità, la Computer Vision affianca agli algoritmi di SfM gli algoritmi di Dense Image Matching. Gli algoritmi di Structure from Motion consentono di ricostruire una scena 3D attraverso il calcolo di una nuvola sparsa di punti; gli algoritmi di Dense Image Matching, invece, consentono di calcolare una nuvola di punti

più densa e più completa al fine di poter estrarre dalle immagini le informazioni necessarie per ricostruire tridimensionalmente una scena o un oggetto.

Nello specifico, all'interno del processo di Dense Image Matching è possibile individuare quattro diverse fasi:

- selezione di una porzione di una delle due immagini da correlare;
- ricerca delle corrispondenze tra le immagini;
- calcolo della posizione 3D nello spazio oggetto della entità in esame;
- valutazione della qualità della procedura di matching (corrispondenza).

Poiché gli algoritmi di matching si basano sul riconoscimento sulle immagini di entità differenti, come elementi geometrici e valori radiometrici, in campo fotogrammetrico, in funzione delle primitive considerate per il matching, è possibile distinguere tre differenti algoritmi di Image Matching:

- Area Based Matching (ABM)
- Feature Based Matching (FBM)
- Matching Relazionale

Gli algoritmi di Area Based Matching (ABM) si basano sul confronto dell'intensità di grigio tra i pixel delle immagini e, poiché trattano direttamente i valori di intensità dei pixel che compongono la coppia di immagini e le corrispondenze vengono cercate confrontando due piccole porzioni di immagini (image patches), non prevedono una fase di estrazione delle feature. Inoltre, gli ABM, sono gli algoritmi più semplici perché si basano sulla ricerca al massimo di una misura di somiglianza dei toni di grigio tra due fotogrammi, spostando con passi regolari sull'immagine di lavoro (slave) una finestra di dimensioni prefissate (Figura 82).

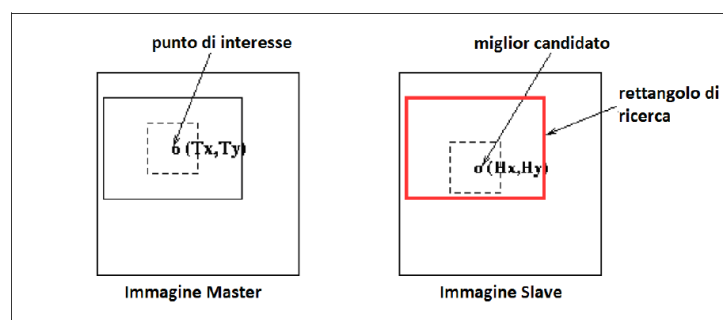


Figura 82. Immagine master e slave

Diversi autori (Martin 1995) suggeriscono differenti tecniche al fine di ottenere l'invarianza, anche parziale, rispetto a trasformazioni geometriche quali rotazioni o variazioni di scala, tuttavia per variazioni geometriche di una certa entità i valori di similitudine misurati dalla correlazione semplice sono bassi, anche quando il punto omologo sull'immagine slave viene individuato correttamente.

In fotogrammetria, i metodi di Area Based Matching più utilizzati sono il *Cross-Correlation* e il *Least-Squares Matching (LSM)*. Il primo metodo si basa sul principio statistico della massima correlazione tra i livelli di grigio della matrice sagoma rispetto alla matrice di ricerca; il secondo, invece, considera anche le distorsioni radiometriche e le deformazioni geometriche esistenti fra la matrice sagoma e la matrice di ricerca.

In particolare, il metodo *Least-Squares Matching*, consente di misurare la qualità della similarità risultante tra pixel non per semplice correlazione ma tramite un metodo ai minimi quadrati, che consente di introdurre ulteriori vincoli nella ricerca (Grun, 1985, Baltsavias, 1991) e presenta una procedura iterativa in cui i parametri calcolati durante le prime iterazioni sono utilizzati nel calcolo delle iterazioni successive. Il LSM offre la possibilità di ricercare le corrispondenze al livello del sub-pixel che lo rende un algoritmo di stereo-matching molto accurato e particolarmente diffuso in campo fotogrammetrico.

Gli algoritmi di Feature Based Matching, invece, al contrario degli algoritmi di Area Based Matching, ricercano dapprima le features (angoli, spigoli, bordi etc...) in entrambe le immagini e solo successivamente ne analizzano la corrispondenza.

Infine, il metodo di Matching Relazionale, scarsamente utilizzato in fotogrammetria digitale perché, anche se molto robusto, non è molto preciso, per il matching si basa sul riconoscimento sulle immagini di più tipi di entità connesse tra loro per ricercarne i corrispondenti in immagini diverse (Lemmens, 1988; Baltsavias 1991).

Alla luce di quanto detto, risulta evidente la necessità di utilizzare insieme gli algoritmi di ABM che permettono di effettuare una prima ricostruzione di una superficie in modo approssimato e gli algoritmi di FBM che consentono, invece, di ottimizzare il risultato finale. Anche la eventuali problematiche dovute alla presenza di oclusioni o di ripetitività della texture, spesso presenti con l'impiego dell'algoritmo ABM (Remondino



et al., 2013), vengono spesso risolte combinando le due tipologie di algoritmo (Remondino, 2006).

Questi algoritmi, nonostante presentano una precisione limitata, rimangono attuali perché il numero delle operazioni richieste per il calcolo dei descrittori statistici è molto minore rispetto ad altre tecniche di matching e perché risultano estremamente veloci nel determinare le corrispondenze tra due immagini. Questo aspetto giustifica il loro utilizzo nel caso di aree di ricerca particolarmente estese e nelle applicazioni in real-time. Inoltre, spesso questa tipologia di algoritmo è utilizzato anche in via preliminare per fornire posizioni iniziali sufficientemente accurate prima di inizializzare altri metodi di matching più raffinati.

Gli algoritmi di Image Matching possono essere classificati, oltre che in funzione delle primitive considerate per il matching (ABM e FBM), anche in funzione del numero di immagini utilizzate per trovare le corrispondenze: se gli algoritmi usano una stereo coppia per trovare le corrispondenze prendono il nome di Stereo-Matching; invece, se per trovare le corrispondenze usano immagini multiple prendono il nome di *Multi-View Matching*.

Esistono innumerevoli algoritmi di stereo-matching classificati in metodi di tipo denso-locale e metodi di tipo denso-globale (Szeliski, 2011). I primi, tanto veloci da poter essere utilizzati per elaborare immagini stereo in tempo reale, non consentono di determinare informazioni di disparità in regioni che presentano intensità costanti o comunque con pochi elementi distintivi, a causa dell'elevata ambiguità nella soluzione del problema delle corrispondenze, e non consentono di risolvere il problema delle corrispondenze nel caso di occlusioni. I secondi, invece, sfruttando procedure addizionali che consentono di gestire aree difficilmente trattabili con i metodi locali, e coinvolgendo nella ricerca un numero di pixel più elevato, offrono migliori risultati in termini di accuratezza della mappa di disparità.

Attualmente, tra gli algoritmi di Image Matching più utilizzati vi sono il *Geometrically Constrained Cross-Correlation* (GC3) e il *Multiphoto Geometrically Constrained Matching* (MGCM) (Gruen, 2012).

Il primo, sviluppato da Zhang (2006), sfrutta immagini multiple per realizzare il matching ed è un algoritmo molto flessibile e robusto. In particolare, questo algoritmo sfrutta tutte le immagini disponibili superando la necessità di effettuare matching individuali per singole coppie d'immagini da unire successivamente. Inoltre, grazie al fatto che una finestra di correlazione quadrata nell'immagine di riferimento può essere correlata con una finestra di diverse dimensioni, forma e orientamento nelle immagini di ricerca, l'algoritmo consente di correlare più immagini con diversa scala e orientamento compensando anche le distorsioni causate dal rilievo del suolo.

Il secondo algoritmo, invece, sviluppato da Grun (1985) e successivamente modificato dallo stesso Grun (1988) e da Baltsavias (1991), sfrutta immagini multiple per realizzare il matching e si basa sulla combinazione tra il confronto dei toni di grigio delle immagini, tipico di LSM, con il vincolo geometrico della collinearità. Questa procedura, che riduce le soluzioni multiple in caso di texture ripetitive e, visualizzando l'oggetto da più stazioni, consente di superare le oclusioni, aumenta l'affidabilità della soluzione e rende l'algoritmo il metodo più preciso per misurare le coordinate immagine e quindi il più appropriato ai fini metrici.

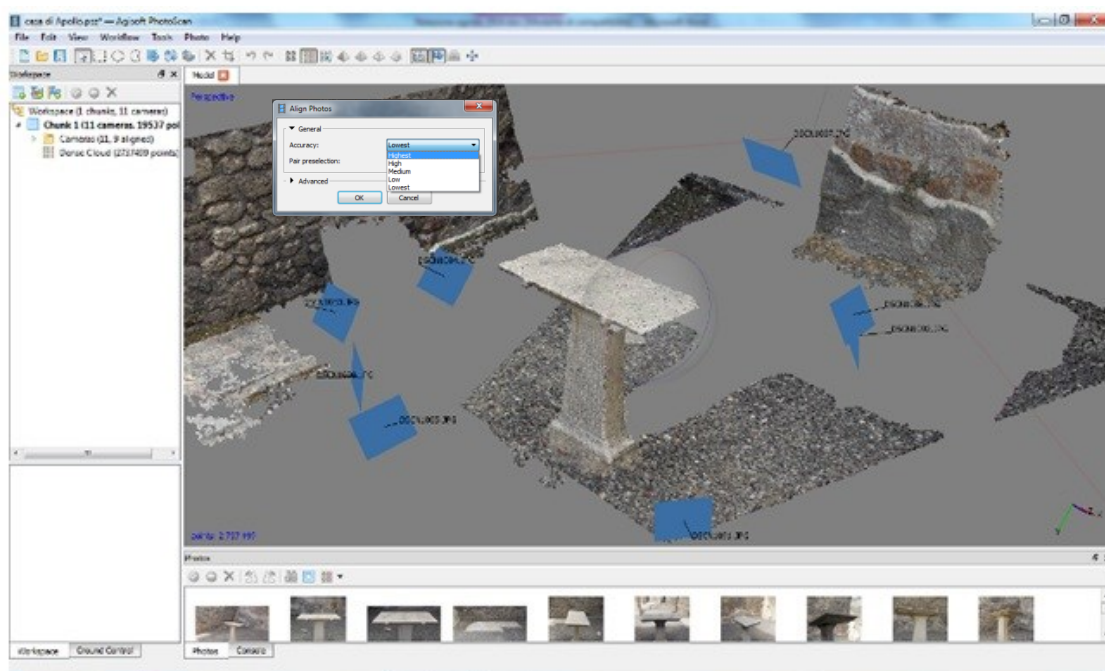
## 5.12 Agisoft PhotoScan

Uno dei programmi utilizzati per l'elaborazione delle immagini è il software Photoscan, sviluppato dalla Agisoft, che consente di eseguire tutti i passi di un processo fotogrammetrico, sfruttando l'approccio SfM. Il software è principalmente finalizzato alla ricostruzione 3D tramite multi-view in cui sia l'orientamento dell'immagine, definito "allineamento", che la ricostruzione del modello 3D sono completamente automatizzati.

In particolare, Agisoft Photoscan prevede differenti step; nel primo sfrutta l'individuazione di punti omologhi per allineare le immagini ed eseguire un primo calcolo dei parametri di calibrazione della camera. Per l'individuazione dei punti omologhi, Photoscan utilizza un algoritmo simile allo SIFT.

Il processo di allineamento può essere realizzato con vari livelli di precisione (low, medium o high) che sono principalmente funzione risoluzione delle immagini utilizzate. In particolare, l'opzione high prevede che il processo viene effettuato sfruttando la

massima risoluzione dell'immagine; l'opzione medium, invece, utilizzando l'immagine a risoluzione dimezzata; infine, l'opzione low sfruttando una immagine con una risoluzione pari a un quarto dell'immagine originale. Al termine della fase, vengono calcolati i parametri di orientamento esterno delle immagini e viene prodotta una nuvola di punti sparsi (Figura 83).



**Figura 83.** Prodotto finale della fase di allineamento in Agisoft PhotoScan

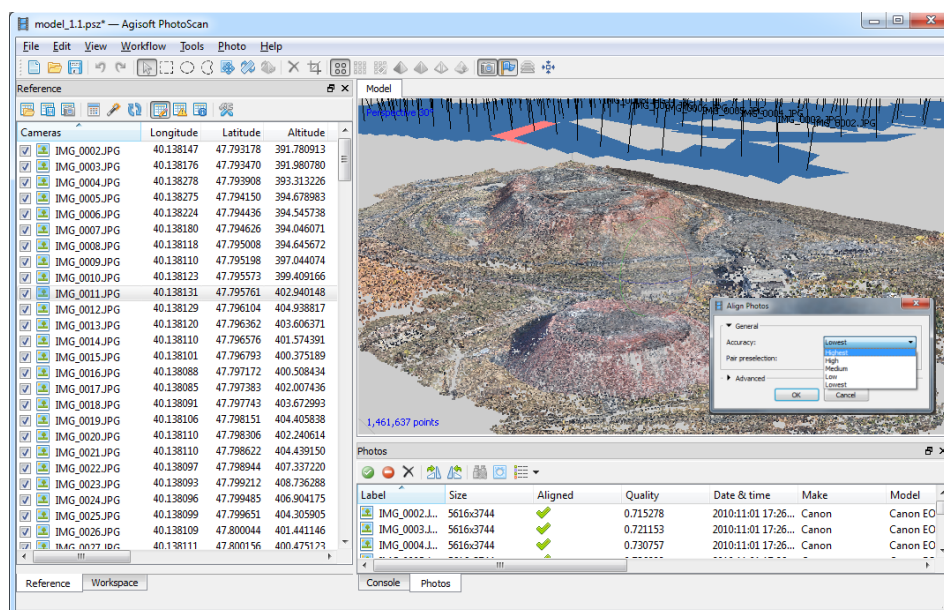
L'orientamento delle immagini può essere ulteriormente ricalcolato, attraverso procedure di bundle block adjustment. Questo processo in PhotoScan è definito "ottimizzazione" e consente anche di ricalcolare i parametri di calibrazione della camera.

Il software impiega un programma di calibrazione derivato dal modello di Brown rispetto al quale introduce il coefficiente  $k_4$  per la distorsione radiale e i coefficienti  $p_3$  e  $p_4$  per le distorsioni tangenziali.

Ultimata la fase di orientamento è possibile calcolare una nuvola di punti densi. Anche in questa fase è possibile settare livelli di dettaglio via via sempre più elevati della ricostruzione (low, medium, high, ultra high). In generale, livelli di dettaglio superiore

consentono di ottenere una ricostruzione più accurata ma il processo di elaborazione delle immagini richiede molto più tempo per l'elaborazione.

Per la ricostruzione della nuvola densa di punti, Photoscan prevede anche un filtraggio dei dati che può essere impostato su tre livelli (*mild*, *aggressive*, *moderate*, *disable*) (Figura 84).



**Figura 84.** Settaggio dei parametri di costruzione della nuvola densa di punti in Agisoft PhotoScan

Settando il livello *mild* il filtraggio viene eseguito in maniera poco aggressiva infatti, questo livello è raccomandato quando sulla scena sono presenti piccoli dettagli particolarmente importanti o quando, nel caso di immagini aeree, sulla foto vi sono pochi tetti. Con il livello *aggressive*, il filtraggio avviene in maniera più aggressiva e infatti viene utilizzato quando la scena da ricostruire non contiene particolare dettagli di piccole dimensioni e quando si lavora con immagini aeree in cui la maggior parte della foto è occupata dai tetti degli edifici. Infine, il livello *moderate* comporta che il filtraggio avvenga in una modalità intermedia tra i livelli *aggressive* e *mild*. Photoscan consente anche di disabilitare la modalità di filtraggio settando il livello *disable*; quando nessun fattore di regolarizzazione è attivo, la nuvola densa di punti generata potrebbe rivelarsi però estremamente rumorosa.

Sulla base della nuvola di punti densi è possibile quindi ricostruire una mesh poligonale 3D che rappresenta la superficie dell'oggetto. In funzione della tipologia di oggetto, il

software utilizza due algoritmi per la costruzione della mesh: *high field*, per prese aeree, e *arbitrary*, per prese principalmente terrestri di oggetti a tutto tondo. Durante questa fase, è possibile intervenire sulla costruzione della mesh settando il numero massimo dei poligoni, chiudendo eventuali buchi ed eliminando il rumore dalla nuvola. Quando si settano i parametri, è bene considerare che un numero troppo basso di poligoni può determinare una mesh poco definita mentre, al contrario, un numero troppo alto di poligoni può causare problemi di visualizzazione della mesh all'interno di altri software a causa dell'eccessiva dimensione del file generato.

Il modello 3D può essere texturizzato per la successiva creazione di DEM e ortofoto (Figura 85 e Figura 86). Anche durante la fase di costruzione della texture Photoscan offre la possibilità di settare alcuni parametri che intervenendo su differenti aspetti della generazione della texture consentono di migliorare la qualità del prodotto generato. In particolare, il software consente di settare la dimensione e il numero dei pixels, di abilitare o disabilitare la correzione del colore, di scegliere la modalità di costruzione della texture, ovvero il modo in cui il valore dei pixel, calcolati a partire da differenti immagini, sono combinati tra loro nella texture finale.

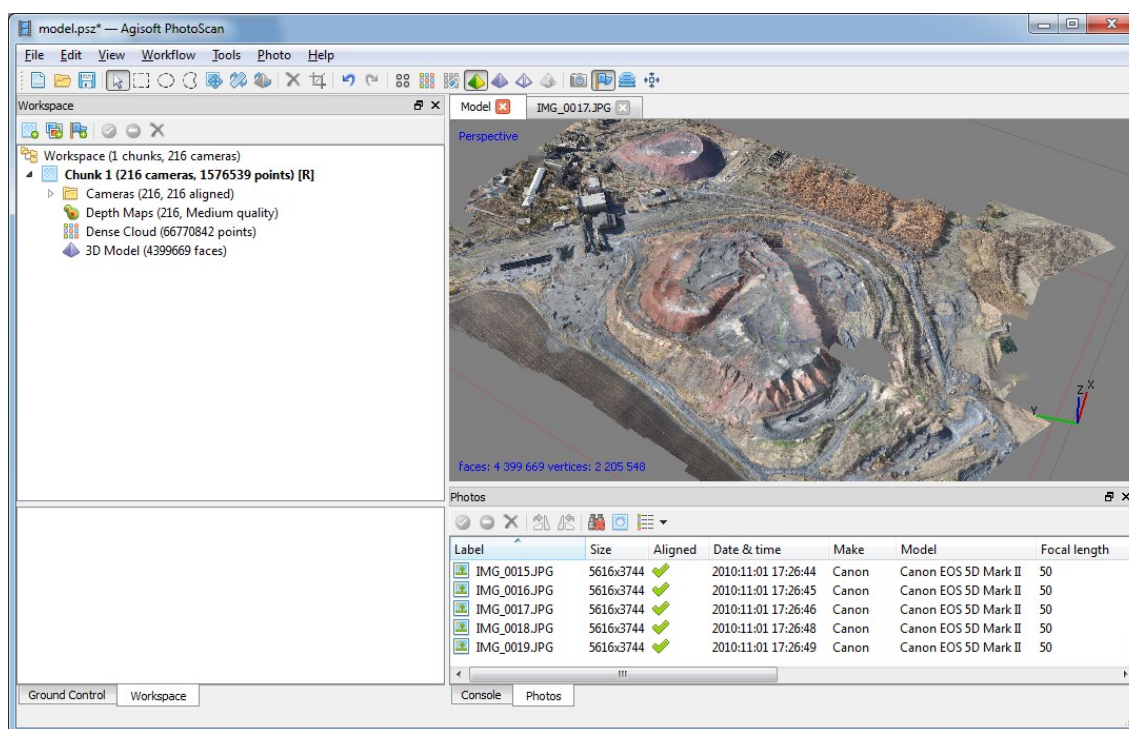
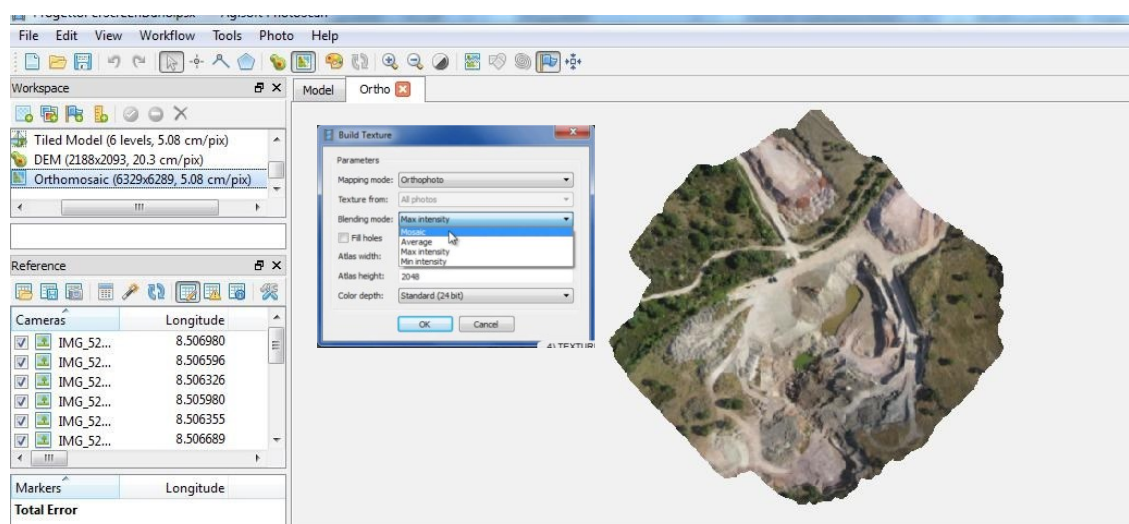


Figura 85. DEM generato da PhotoScan



**Figura 86.** Ortofoto prodotta da PhotoScan

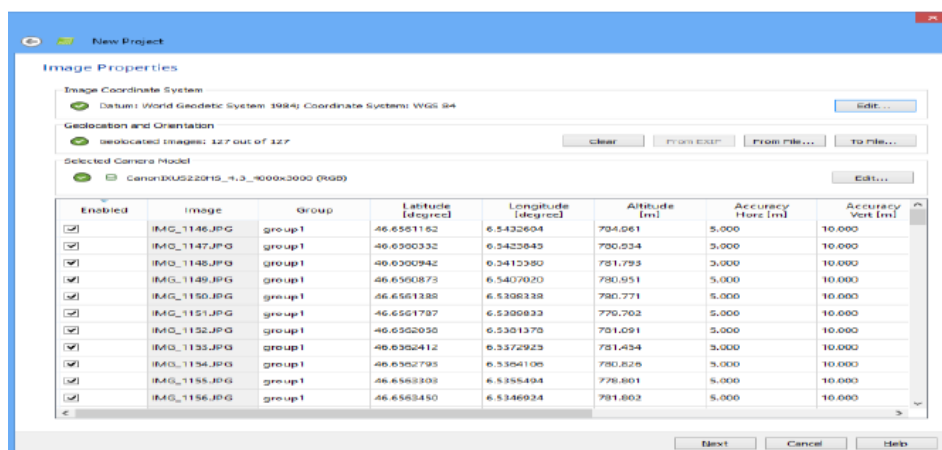
### 5.13 Pix4D

Pix4D, introdotto nel mercato nel 2011 da un'azienda svizzera, permette di estrarre informazioni metriche da migliaia di immagini aeree, acquisite da SAPR, al fine di creare ortofoto, modelli 3D e nuvole di punti.

Prima di avviare l'elaborazione delle immagini, il software prevede che sia impostata la tipologia di immagini: aerial nadiral se le immagini aeree sono nadirali e aerial oblique or terrestrial se le immagini sono oblique o terrestri. Solo dopo aver effettuato questa scelta è possibile aggiungere le immagini che saranno processate (Figura 87).

Il processo di elaborazione dei dataset, costa di tre fasi e per ognuna di esse è possibile selezionare le operazioni dal menù Opzioni. Le fasi previste da software sono:

- 1. Initial Processing.
- 2. Point Cloud Densification.
- 3. DSM and Orthomosaic.

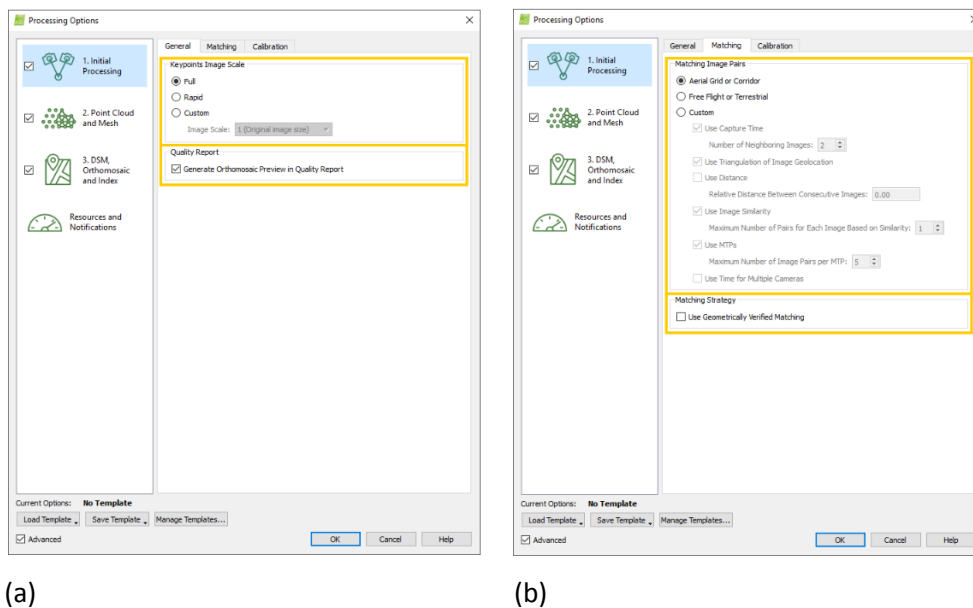


**Figura 87.** Inserimento delle immagini con Pix4D

La prima fase, quella di Initial Processing, prevede l'allineamento delle immagini. Durante questa fase di Feature Extraction, settando la modalità “keypoint Image Scale”, l'elaborazione può avvenire su porzioni di immagini o sull'immagine intera. In ordine crescente di accuratezza nell'elaborazione, la dimensione dell'immagine utilizzata per l'estrazione dei punti di legame può essere:  $\frac{1}{4}$  dell'immagine, per progetti molto grandi e con un elevato livello di sovrapposizione tra le immagini o nel caso di immagini che presentano una scarsa risoluzione;  $\frac{1}{2}$  dell'immagine, per grandi progetti e con un elevato livello di sovrapposizione o per l'allineamento di immagini che presentano un ridotto livello di risoluzione; pari alla dimensione dell'immagine; due volte la dimensione dell'immagine originale, per immagini di piccole dimensioni (Figura 88a).

Per la fase di allineamento, Pix4D consente anche di settare ulteriori parametri relativi al processo di keypoint matching. In particolare, il software permette di selezionare quale (Aerial Grid or Corridor, Free flight or Terrestrial, Custom) e come (Matching Strategy) le coppie di immagini vengono abbinare.

L'opzione “Aerial Grid or Corridor” è utilizzata per l'allineamento delle immagini aeree mentre l'opzione “Free flight or Terrestrial” è utilizzata per le immagini terrestri o per le immagini libere come per esempio le immagini acquisite ruotando attorno ad una statua, infine, “Custom” è utilizzato per specificare ulteriori parametri come la distanza tra le relative immagini o il tempo in cui sono state acquisite (Figura 88b).



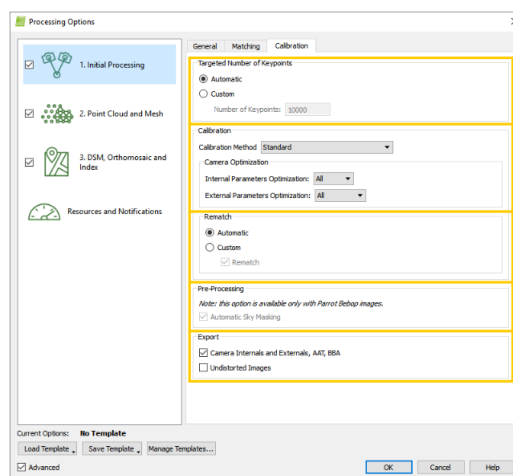
(a)

(b)

**Figura 88.** Parametri per la fase di orientamento

Riguardo la modalità di accoppiamento tra le immagini, il software consente di attivare l'opzione "Use Geometrically Verified Matching", del Matching Strategy, per abbinare le immagini utilizzando soltanto il contenuto delle immagini stesse, o di disattivarlo per abbinare le immagini considerando, oltre al contenuto delle immagini stesse, anche le posizioni delle camere.

All'interno della fase di allineamento delle immagini è possibile settare il metodo di calibrazione e scegliere la tipologia di parametri, esterni e/o interni, da utilizzare per l'ottimizzazione della camera (Figura 89).



**Figura 89.** Parametri settati in fase di ottimizzazione



La seconda fase è ulteriormente suddivisibile in due fasi di seguito elencate:

- Point Cloud Densification
- 3D Textured Mesh Generation

La fase di Point Cloud Densification prevede la generazione della nuvola densa di punti. Durante questa fase è possibile settare differenti parametri che influiscono sull'accuratezza del prodotto finale. In particolare, come per la fase di allineamento, è possibile settare, in ordine crescente di accuratezza nell'elaborazione, la dimensione dell'immagine utilizzata per l'estrazione dei punti 3D (1, 1/2, 1/4, 1/8). Il processo sarà slow se la scala dell'immagine ha le dimensioni dell'immagine originale, tolerant se l'elaborazione si svolge su 1/8 della dimensione dell'immagine originale. Inoltre, il software consente di settare la densità della nuvola di punti (Optimal, High, Low) e il numero minimo di immagini su cui il punto 3D deve essere visibile (2, 3, 4, 5, 6). Optimal consente di computare un punto 3D ogni quattro volte la dimensione dell'immagine originaria. Ciò significa che se l'immagine originaria ha dimensione 1/4 allora per la generazione della nuvola densa di punti sarà calcolato un punto 3D ogni 16 pixel. L'opzione high comporta che ad ogni pixel dell'immagine originaria coincida un punto 3D della nuvola densa di punti. Infine, l'opzione low consente di computare un punto 3D ogni sedici volte la dimensione dell'immagine originaria (Figura 90a).

Anche la procedura di costruzione della mesh offre la possibilità di settare alcuni parametri che consentono di migliorare la qualità del prodotto finale. In particolare, è possibile impostare un'alta, media e minima risoluzione della Mesh in funzione del dettaglio che si intende ottenere, la dimensione in pixel della texture, il numero di triangoli, i filtri di colore (Figura 90b).

La mesh ottenuta durante la seconda fase del processo, viene utilizzata, durante la terza fase, come punto di partenza per il calcolo del modello texturizzato che a sua volta è utilizzato per la generazione di DSM e ortofoto. Anche in questa fase, come nelle precedenti, è possibile settare alcuni parametri che consentono di ottenere un prodotto qualitativamente migliore. In particolare, è possibile settare il numero minimo di triangoli per la ricostruzione poligonale, la risoluzione, che è funzione del GSD e l'uso di filtri che consentono di ridurre il rumore e di smussare la superficie (Figura 91a). Gli output ottenuti dall'elaborazione vengono infine salvati in vari formati (Figura 91b). Una volta

terminato l'intero processo, è possibile visualizzare da mosaic editor il DSM (Figura 92) e l'ortofoto prodotti (Figura 93).

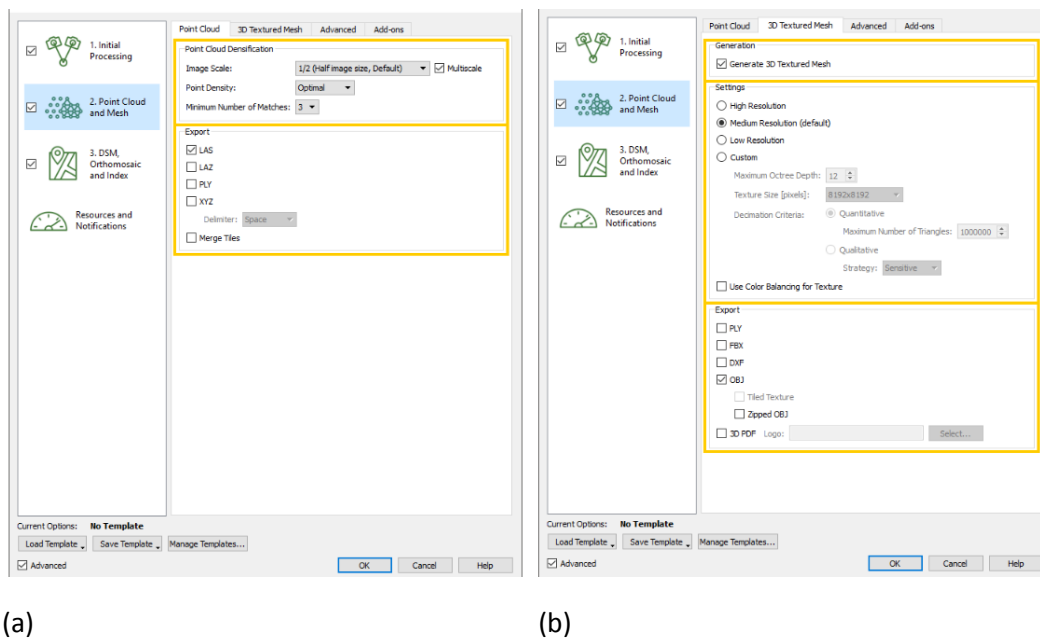


Figura 90. Parametri in fase di creazione della dense point

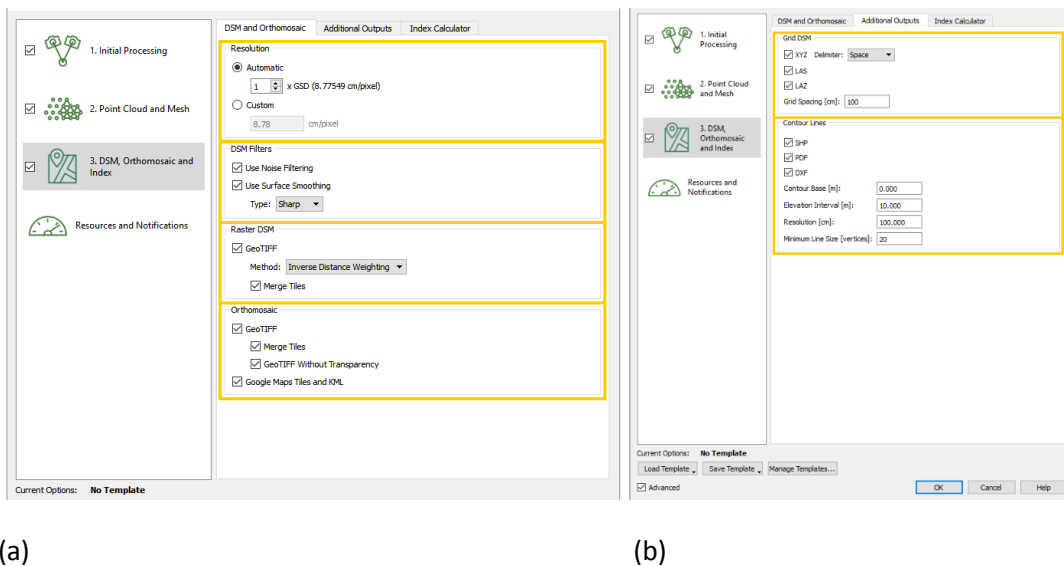
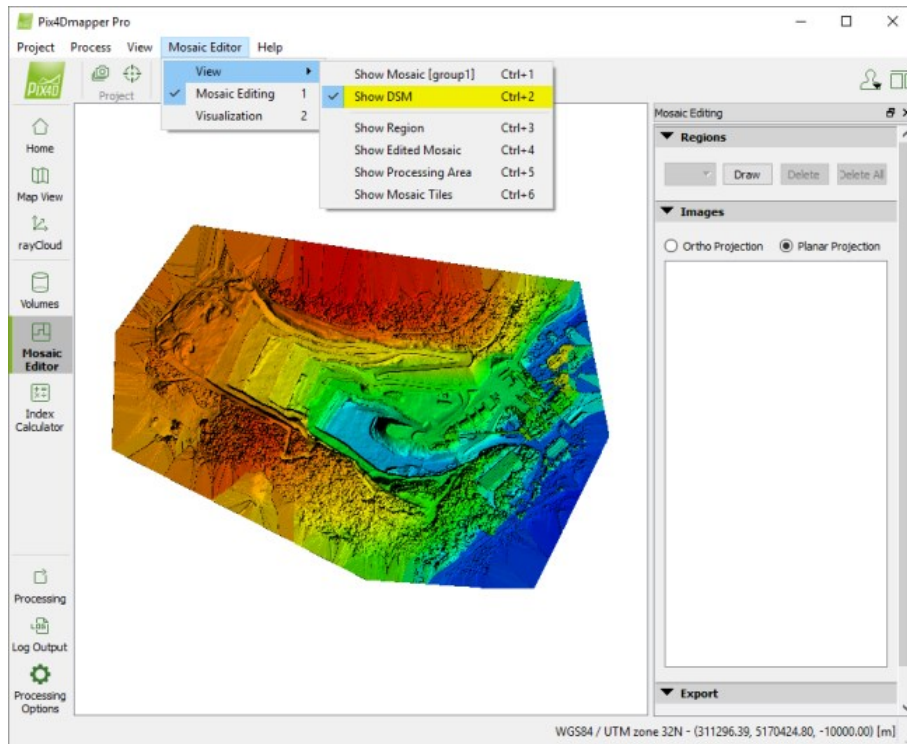
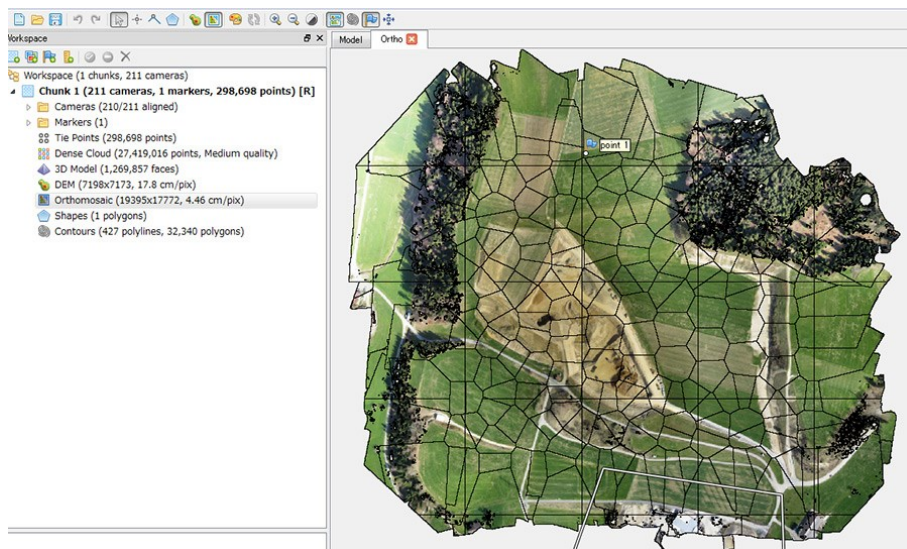


Figura 91. Parametri in fase di creazione della mesh



**Figura 92.** Prodotti finali Pix4D: DSM.



**Figura 93.** Prodotti finali Pix4D: Ortofoto



## PARTE SPERIMENTALE

La realizzazione di un rilievo fotogrammetrico aereo di prossimità mediante SAPR, finalizzato alla produzione di prodotti metrici, richiede l'analisi di numerosi parametri che influiscono sulla fattibilità, sulla tempistica, sulle problematiche, sui costi delle operazioni di rilievo e sulla qualità del prodotto finale.

Il lavoro condotto durante il dottorato mira a analizzare le problematiche connesse con le fasi di acquisizione e elaborazione dei dati. In particolare, sono stati effettuati differenti test con lo scopo di definire delle procedure standard di rilievo da SAPR e di valutare l'impiego di software fotogrammetrici/computer vision per l'orientamento delle immagini, la modellazione tridimensionale e la produzione di ortofoto.

I test sono stati condotti sui dataset di tre diverse aree, differenti per dimensioni e tipologia, acquisiti utilizzando SAPR multirotori: il Foro Romano del sito archeologico di Sepino (Campobasso), Villa Lampedusa ai Colli (Palermo) e il sito archeologico di Eraclea Minoa (Agrigento).

Il dataset del Foro Romano del sito archeologico di Sepino ha permesso di valutare all'influenza del posizionamento e del numero dei punti di appoggio utilizzati per l'orientamento. Inoltre, sono stati considerati anche gli effetti dell'accuratezza assegnata ai punti di appoggio e della scelta di differenti parametri per la calibrazione della camera. Il dataset di Villa Lampedusa ai Colli ha permesso di analizzare le problematiche per la progettazione di un rilievo finalizzato alla modellazione tridimensionale e differenti approcci per la calibrazione della camera. Infine, il dataset del sito archeologico di Eraclea Minoa ha permesso di analizzare sia la fase di pianificazione del volo, in un rilievo finalizzato alla produzione di ortofoto, che la fase di orientamento delle immagini in relazione alla variazione dei parametri di volo. Inoltre, è stato verificato l'influenza della metodologia di rilievo dei punti di appoggio sull'accuratezza degli orientamenti.

Tutti i dataset sono stati processati utilizzando software che si basano sull'approccio fotogrammetrico/computer vision. In particolare, per il primo e il terzo dataset sono stati utilizzati i software Photoscan e Pix4D; per il dataset relativo alla Villa Lampedusa, invece, è stato utilizzato esclusivamente il software Photoscan.

I dataset del Foro Romano e di Villa Lampedusa sono stati ulteriormente processati per estrarre modelli tridimensionali, come nuvole dense di punti e mesh, che sono stati confrontati con i rispettivi modelli ottenuti da procedure di rilievo laser scanner.

## Capitolo 6. *Caso studio 1: il Foro Romano* dell'area archeologica di Saepinum

L'elaborazione del dataset del Foro Romano dell'area archeologica di Saepinum ha permesso di eseguire due differenti tipologie di analisi relativamente alle procedure di orientamento e di calcolo del modello 3D. In particolare, i test svolti sono stati realizzati al fine di valutare l'uso dei GCP (numero, distribuzione spaziale, accuratezza associata alle coordinate) e le qualità delle nuvole di punti in relazione al software utilizzato tramite confronto con i risultati di un rilevamento con laser a scanner terrestre.

Il dataset utilizzato è stato fornito in occasione del Convegno SIFET, tenutosi a Lecce a Giugno 2016, con lo scopo di condividere un'esperienza di elaborazione di immagini acquisite da SAPR da parte di utenti interessati all'utilizzo di questa metodologia per scopi topografici e di rappresentazione 3D. L'acquisizione del dataset del Foro è stato realizzato dal gruppo di ricerca del Laboratorio di Fotogrammetria del Circe (Centro Interdipartimentale di Rilievo, Cartografia ed Elaborazione) dell'Università IUAV di Venezia, di cui il prof. Francesco Guerra è responsabile scientifico (Balletti et al, 2006).

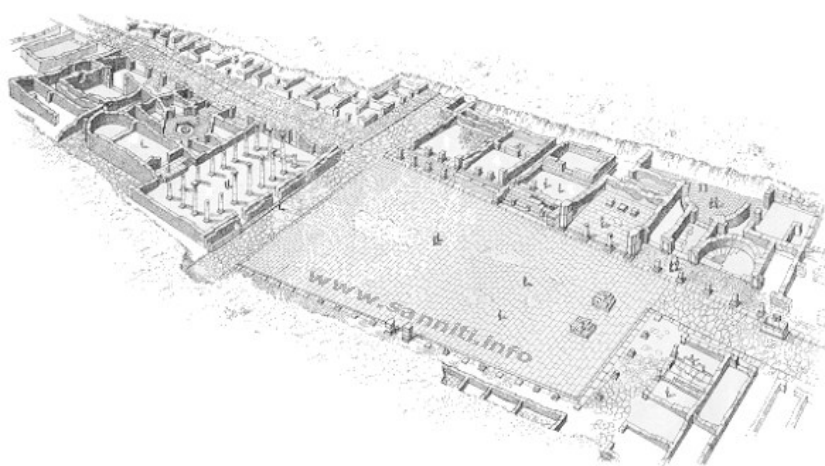
Il sito archeologico di Saepinum è situato al centro di una pianura, ai piedi del Matese e aperto sulla valle del Tammaro. All'interno dell'insediamento urbano Romano si riconosce ancora il tessuto viario, con il cardo ed il decumano ancora pavimentati con gli antichi basolari (Figura 94).



**Figura 94.** Area Archeologica di Seapinum - città romana

L'area test comprende la parte di sito interessata dal Foro Romano, di età augustea (Figura 95). Lo spazio, che simbolicamente richiama l'antica destinazione d'uso a "mercato" del sito sannita, è circondato da una canalizzazione perimetrale destinata a raccogliere l'acqua piovana che incornicia l'intero spazio trapezoidale del foro il quale, nell'angolo sud-orientale, presenta basamenti per monumenti onorari che abbellivano il grande spazio pubblico. Il lato sud-occidentale era occupato dalla struttura di un imponente palazzo, sopraelevato rispetto al piano della piazza per la presenza di una scalinata d'accesso. Davanti a questo imponente edificio si ergeva un arco onorario sul cui attico era riportata l'iscrizione che ricordava il finanziatore dell'intero complesso Lucius Neratius Priscus, conosciuto e stimato giureconsulto presso la cancelleria imperiale ai tempi dell'imperatore Traiano (98 - 117 d.C.). Della struttura restano visibili gli elementi di base dei piedritti.





**Figura 95.** L'area del Foro Romano

Al centro della piazza sono ancora ben visibili le sagome (Figura 96) che gli antichi scalpellini ricavarono sul lastricato per posizionare le lettere in bronzo (ormai non più presenti) di un'iscrizione che ricordava i magistrati che sostennero le spese per la pavimentazione del foro. Oggi, poiché in alcuni punti le basole originali sono state, col tempo, sostituite, l'iscrizione appare discontinua.

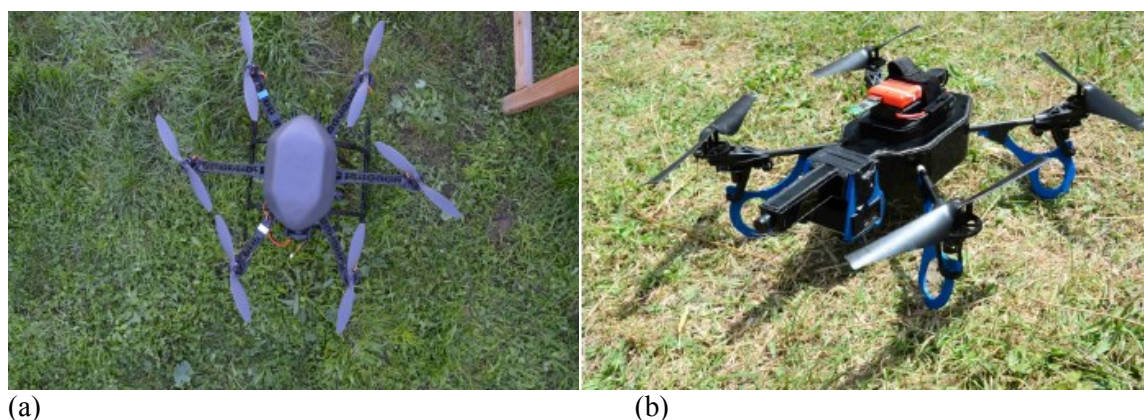


**Figura 96.** Sagome che gli antichi scalpellini ricavarono sul lastricato per posizionare le lettere in bronzo

## 6.1 Il rilievo del sito

Il Foro Romano presenta una pianta trapezoidale e pavimentazione in basolato che si sviluppa per una lunghezza di circa 18 metri e presenta una superficie pianeggiante e priva di strutture aggettanti.

I voli sono stati eseguiti con un esacottero MicroUAV e con un quadricottero Parrot Ar.Drone 2.0 GNSS Edition (Figura 97).



**Figura 97.** SAPR utilizzati: (a) esacottero MicroUAV; (b) quadricottero Parrot Ar.Drone 2.0 GNSS Edition

L'esacottero MicroUAV presenta una struttura interamente in carbonio ed è dotato di una centralina di controllo Dji Wookong, 3 giroscopi, 3 accelerometri, 1 barometro altimetrico e GNSS ed è equipaggiato con camera Canon PowerShot S10. Il quadricottero Parrot Ar.Drone 2.0 GNSS Edition ha struttura in carbonio (dal peso 420 g), giroscopio, accelerometro, magnetometro a 3 assi e sensore di pressione, ricevitore a ultrasuoni per la misurazione dell'altitudine dal suolo e telecamera verticale a 60 fps; il sistema è equipaggiato con camera GoPro Hero 3 Black Edition e obiettivo fisheye. La tabella 3 riassume le caratteristiche principali delle camere utilizzate per il rilievo.

	<b>Fotocamera compatta Canon Powershot S100</b>	<b>GoPro Hero 3 Black Edition</b>
<b>Peso</b>	198 g	76g (camera con batteria)
<b>Lunghezza focale</b>	24-120mm, F2.0-5.9	16 mm
<b>Sensore</b>	Canon CMOS 12.1 MP 1/1.7" (4000x3000)	CMOS 12 Mp (4000x3000)
<b>Dimensione sensore</b>	7.44x5.58 mm	6.20x4.65 mm (1/2.3")
<b>Dimensione pixel</b>	1.86 micron	1.55 micron
<b>ISO</b>	80-6400	-
<b>Acquisizione video</b>	Full HD (1080p24)	-

**Tabella 3.** Caratteristiche delle camere utilizzate

I voli eseguiti con l'elicottero MicroUAV e la camera Canon Powershot S100, realizzati in modalità manuale, presentano andamento parallelo al lato di lunghezza maggiore del Foro, una quota di volo di 15 m, ricoprimento longitudinale ed un ricoprimento trasversale rispettivamente pari al 70% e al 60% e un GSD pari a 0,005 m.

I voli eseguiti con il quadricottero Parrot Ar.Drone 2.0 GNSS Edition equipaggiato con camera GoPro Hero 3 Black Edition, invece, sono stati realizzati in modalità automatica ad una quota di volo di 10 m e assicurano un GSD pari a 0,005 m e un ricoprimento longitudinale e trasversale pari al 90%.

Nell'area interessata dal rilievo, sfruttando la tecnica GNSS RTK sono state acquisite anche le coordinate di dieci punti di appoggio GCP; questi punti sono stati scelti in corrispondenza di spigoli ed elementi caratteristici del basolato, facilmente individuabili sulle immagini acquisite e forniti in un sistema di riferimento locale, con le relative monografie (Figura 98).



**Figura 98.** Punti di appoggio

Contestualmente al rilievo da SAPR, nell'area è stato condotto anche un rilievo con laser scanner terrestre con strumentazione Faro Focus 3D (Figura 99). In totale sono state eseguite 9 scansioni, con una risoluzione di 6 mm a 10 m, impostando lo scanner ad  $\frac{1}{4}$

della risoluzione effettiva, per un totale di 130 milioni di punti acquisiti (Figura 100). Le scansioni sono state fornite già unite in un'unica nuvola di punti.



**Figura 99.** Faro Focus 3D utilizzato per il rilievo del sito



**Figura 100.** Nuvola di punti acquisita tramite laser scanner

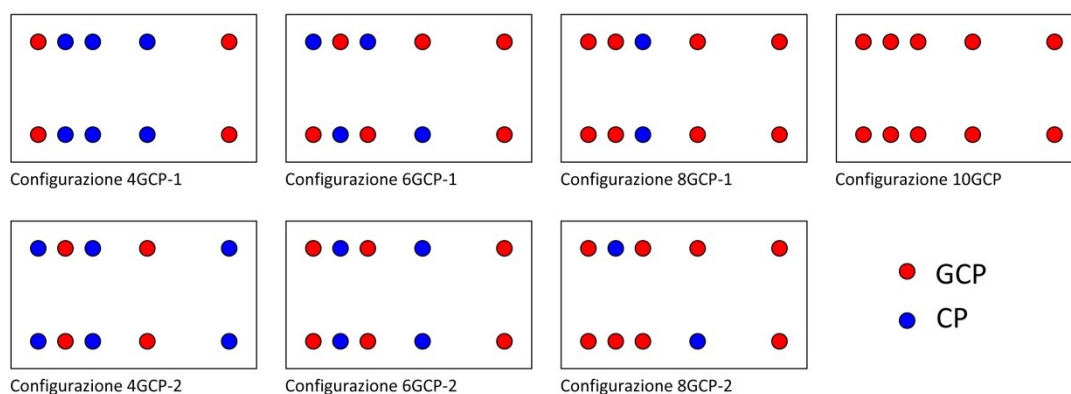
## 6.2 Elaborazione dei dataset

Per il lavoro di tesi è stato utilizzato soltanto il dataset acquisito con l'esacottero MicroUAV equipaggiato con camera Canon PowerShot S100. In particolare, poiché la corretta distribuzione e il numero dei punti di appoggio sono determinanti per l'orientamento delle immagini, sulla base di quanto fatto in altre sperimentazioni con

dataset simili, i test sono stati condotti variando il numero e la distribuzione dei GCP (Ground Control Point); a tale scopo, sono stati realizzati:

- test con differente numero di GCP;
- test con differente configurazione dei GCP a parità di numero di GCP.

Complessivamente sono state definite sette configurazioni, differenti per numero e disposizione dei GCP. Relativamente alle diverse configurazioni impostate in funzione del numero dei GCP sono stati definiti i seguenti test: con 10 GCP, con 8 GCP, con 6 GCP e con 4GCP. Tutte queste configurazioni, tranne quella con 10 GCP (Configurazione 10GCP), hanno dato luogo a due diversi progetti ottenuti variando la disposizione dei punti scelti per l'orientamento: Configurazione 8GCP-1 e Configurazione 8GCP-2, Configurazione 6GCP-1 e Configurazione 6GCP-2, Configurazione 4GCP-1 e Configurazione 4GCP-2 (Figura 101).



**Figura 101.** Configurazioni utilizzate per la distribuzione dei GCP e dei CP

In tutti i test, i GCP non utilizzati per l'orientamento sono stati usati come Check Point (CP) ben sapendo che, per alcuni progetti, i loro risultati non sono particolarmente significativi a causa del ridotto numero.

Ulteriori test hanno permesso di stimare l'accuratezza nell'orientamento dei prodotti 3D in relazione all'accuratezza associata alle coordinate dei punti di appoggio e in relazione ai parametri utilizzati in fase di calibrazione della camera. Pertanto, sono stati eseguiti anche test:

- associando una differente accuratezza al rilievo dei GCP;
- utilizzando differenti parametri in fase di calibrazione della camera.

Per stimare l'accuratezza nell'orientamento dei prodotti 3D in relazione all'accuratezza associata alle coordinate dei punti di appoggio, i test sono stati ripetuti settando due differenti valori del rilievo dei GCP:

- $\pm 2$  cm valore che teoricamente esprime la reale precisione del rilievo GNSS RTK;
- $\pm 0,5$  cm valore che sovra-stima la precisione del rilievo GNSS RTK.

Poiché le immagini del Foro Romano sono state acquisite utilizzando una camera non metrica, ulteriori test sono stati condotti per valutare come l'accuratezza dell'orientamento dei fotogrammi è influenzata dalla scelta dei parametri da calcolare per la calibrazione della camera. In particolare, i test sono stati condotti considerando nel calcolo:

- tutti i parametri di calibrazione ( $c, x_p, y_p, k_1, k_2, k_3, k_4, p_1, p_2, p_3, p_4, b_1, b_2$ );
- solo i parametri relativi alla distorsione radiale ( $c, \Delta x_p, \Delta y_p, k_1, k_2, k_3, k_4$ ).

La scelta di non considerare nel calcolo di calibrazione i parametri relativi alle deformazioni tangenziali e affini, è dovuta alla considerazione che tali parametri potrebbero essere poco influenti sul risultato finale ed in certi casi potrebbe addirittura portare ad una sovra-parametrizzazione con conseguente diminuzione dell'accuratezza (Remondino et al., 2006).

In definitiva, ogni singola configurazione è stata processata considerando quattro differenti scenari operativi:

- accuratezza metrica dei GCP pari a 0.5 cm considerando nel calcolo tutti i parametri di calibrazione della camera;
- accuratezza metrica dei GCP pari a 0.5 cm senza considerare nel calcolo della calibrazione della camera i parametri relativi alla distorsione affine e alla distorsione tangenziale;
- a metrica dei GCP pari a 2 cm considerando nel calcolo tutti i parametri di calibrazione della camera;
- accuratezza metrica dei GCP pari a 2 cm senza considerare nel calcolo della calibrazione della camera i parametri relativi alla distorsione affine e alla distorsione tangenziale;

Complessivamente sono stati ottenuti ben 56 differenti progetti.

Per realizzare la fase di orientamento delle immagini, tutti i test sono stati condotti settando in Photoscan il parametro relativo “all’accuratezza” del processo pari a “high” e il numero massimo di punti di legame su ogni fotogramma di “default” pari a 4000 punti; in Pix4D, invece, il parametro relativo a “Keypoints Image Scale” è stato settato “full”. Inoltre, utilizzando i punti di controllo nella procedura di bundle block adjustment, per tutti i test è stato possibile ricalcolare i parametri di orientamento interno ed esterno.

### 6.3 Valutazioni metriche

Le valutazioni metriche sui test condotti sono state effettuate sulla base del parametro statistico dello scarto quadratico medio (SQM), calcolato utilizzando la formula

$$SQM = \pm \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n-1}} \quad (11)$$

dove:

$x$  è lo scarto ottenuto dalla differenza tra le coordinate misurate topograficamente e le corrispondenti coordinate calcolate fotogrammetricamente

$n$  è il numero degli punti

Le tabelle 4, 5, 6 e 7 mostrano i residui ottenuti nella fase di orientamento delle immagini sui GCP e sui CP per ogni configurazione considerata. In generale, si vede come, in funzione dei differenti scenari operativi considerati, i residui, per ogni configurazione analizzata assumono valori tra loro molto diversi: per i GCP il valore dei residui presenta una grande variabilità da configurazione a configurazione, passando da 0.5 centimetri per la configurazione 4GCP-2 elaborata con PhotoScan considerando la precisione associata ai GCP pari a 0.5 cm sino a 10.7 cm per la configurazione 4GCP-1 elaborata con Pix4D considerando la precisione associata ai GCP pari a 2 cm; per i CP, invece, il valore dei residui varia da 2.4 cm, per la configurazione 8GCP-1 elaborata con PhotoScan considerando la precisione associata ai GCP pari a 0.5 cm e a 2 cm, a 16.1 cm, per la configurazione 4GCP-2 elaborata con Pix4D considerando la precisione associata ai GCP

pari a 0.5 cm. In particolare, la configurazione 4GCP-2 e la configurazione 4GCP-1, con il minor numero di GCP presentano valori degli scarti in quota superiori ai 10 cm.

Dal punto di vista della distribuzione e del numero dei GCP, come lecito attendersi, le tabelle mostrano come i modelli con residui maggiori sono quelli relativi alle configurazioni in cui è ridotto il numero di GCP utilizzati (4 in tutto). Più in generale, anche se il numero di CP utilizzato non è statisticamente significativo, i blocchi con un maggior numero di GCP mostrano valori di residui ridotti rispetto alle configurazioni con un minor numero di GCP sia in corrispondenza dei GCP sia dei CP.

Le tabelle mettono anche in luce come l'accuratezza assegnata ai GCP influenza i residui in maniera differente in relazione al software utilizzato: in Photoscan si registrano dei residui maggiori nei progetti effettuati con una accuratezza pari a 2 cm mentre, al contrario, in Pix4D si ottengono degli scarti superiori con una accuratezza fissata a 0,5 cm.

Le tabelle mostrano, inoltre, come influiscono i parametri di calibrazione della camera sulla precisione dell'orientamento. Tutte le configurazioni presentano lo stesso comportamento ed in particolare: i progetti processati considerando nel calcolo dell'orientamento interno la totalità dei parametri di calibrazione della camera, mostrano degli scarti sempre inferiori rispetto ai progetti in cui i parametri relativi alla correzione delle deformazioni affini e tangenziali sono esclusi dal calcolo.



		PHOTOSCAN							
		marker accuracy = 0.005 m							
		GCP				CP			
		SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)	SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)
CONFIGURAZIONE	4GCP-1	0,009	0,007	0,007	0,014	0,030	0,034	0,030	0,054
	4GCP-2	0,003	0,004	0,001	0,005	0,074	0,072	0,027	0,107
	6GCP-1	0,011	0,025	0,008	0,029	0,030	0,017	0,014	0,037
	6GCP-2	0,009	0,014	0,009	0,019	0,028	0,032	0,013	0,044
	8GCP-1	0,015	0,024	0,009	0,029	0,009	0,011	0,015	0,024
	8GCP-2	0,011	0,021	0,010	0,026	0,029	0,025	0,008	0,039
	10GCP	0,015	0,015	0,010	0,028	-	-	-	-

		PIX 4D							
		marker accuracy = 0.005 m							
		GCP				CP			
		SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)	SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)
CONFIGURAZIONE	4GCP-1	0,003	0,004	0,005	0,006	0,027	0,026	0,122	0,128
	4GCP-2	0,010	0,010	0,015	0,021	0,095	0,052	0,066	0,126
	6GCP-1	0,012	0,022	0,015	0,029	0,021	0,014	0,025	0,036
	6GCP-2	0,011	0,006	0,008	0,015	0,027	0,030	0,029	0,050
	8GCP-1	0,014	0,021	0,014	0,028	0,018	0,012	0,021	0,030
	8GCP-2	0,013	0,018	0,013	0,026	0,026	0,024	0,004	0,036
	10GCP	0,015	0,019	0,013	0,027	-	-	-	-

Tabella 4. Scarti in x, y, e z senza considerare nel processo di autocalibrazione della camera tutti i parametri e con marker accuracy pari a 0.005m

		PHOTOSCAN							
		marker accuracy = 0.02 m							
		GCP				CP			
		SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)	SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)
CONFIGURAZIONE	4GCP-1	0,027	0,032	0,012	0,044	0,047	0,026	0,014	0,055
	4GCP-2	0,008	0,018	0,001	0,020	0,001	0,088	0,021	0,130
	6GCP-1	0,023	0,032	0,012	0,041	0,050	0,024	0,014	0,057
	6GCP-2	0,027	0,028	0,012	0,040	0,041	0,023	0,012	0,048
	8GCP-1	0,015	0,024	0,009	0,029	0,015	0,012	0,015	0,024
	8GCP-2	0,011	0,021	0,010	0,026	0,029	0,024	0,008	0,039
	10GCP	0,012	0,020	0,007	0,024	-	-	-	-

		PIX 4D							
		marker accuracy = 0.02 m							
		GCP				CP			
		SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)	SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)
CONFIGURAZIONE	4GCP-1	0,003	0,003	0,011	0,012	0,026	0,026	0,109	0,115
	4GCP-2	0,018	0,018	0,031	0,040	0,017	0,033	0,056	0,067
	6GCP-1	0,015	0,023	0,034	0,043	0,019	0,014	0,057	0,062
	6GCP-2	0,011	0,007	0,018	0,022	0,024	0,031	0,043	0,058
	8GCP-1	0,015	0,022	0,025	0,037	0,016	0,015	0,022	0,031
	8GCP-2	0,021	0,010	0,026	0,035	0,024	0,008	0,039	0,046
	10GCP	0,015	0,020	0,021	0,033	-	-	-	-

Tabella 5. Scarti in x, y, e z senza considerare nel processo di autocalibrazione della camera tutti i parametri e con marker accuracy pari a 0.02m

		PHOTOSCAN							
		marker accuracy = 0.005 m							
		GCP				CP			
		SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)	SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)
CONFIGURAZIONE	4GCP-1	0,024	0,024	0,001	0,034	0,046	0,037	0,141	0,153
	4GCP-2	0,018	0,003	0,007	0,02	0,07	0,055	0,116	0,146
	6GCP-1	0,034	0,025	0,009	0,043	0,028	0,032	0,016	0,046
	6GCP-2	0,027	0,023	0,009	0,037	0,039	0,032	0,015	0,052
	8GCP-1	0,033	0,025	0,010	0,042	0,004	0,025	0,013	0,029
	8GCP-2	0,028	0,026	0,026	0,039	0,026	0,019	0,007	0,048
	10GCP	0,029	0,024	0,010	0,039	-	-	-	-

		PIX 4D							
		marker accuracy = 0.005 m							
		GCP				CP			
		SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)	SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)
CONFIGURAZIONE	4GCP-1	0,041	0,042	0,054	0,080	0,073	0,055	0,106	0,140
	4GCP-2	0,022	0,014	0,017	0,031	0,093	0,065	0,114	0,161
	6GCP-1	0,046	0,035	0,022	0,061	0,033	0,047	0,028	0,064
	6GCP-2	0,033	0,043	0,027	0,061	0,060	0,038	0,028	0,076
	8GCP-1	0,042	0,039	0,021	0,061	0,021	0,029	0,019	0,041
	8GCP-2	0,036	0,040	0,023	0,059	0,054	0,014	0,007	0,056
	10GCP	0,038	0,036	0,019	0,055	-	-	-	-

Tabella 6. Scarti in x, y e z considerando nel processo di autocalibrazione solo i parametri relativi alla distorsione radiale con marker accuracy pari a 0.005m

		PHOTOSCAN							
		marker accuracy = 0.02 m							
		GCP				CP			
		SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)	SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)
CONFIGURAZIONE	4GCP-1	0,053	0,034	0,005	0,063	0,044	0,048	0,099	0,110
	4GCP-2	0,022	0,003	0,005	0,023	0,066	0,056	0,076	0,110
	6GCP-1	0,021	0,032	0,016	0,061	0,032	0,036	0,021	0,052
	6GCP-2	0,048	0,036	0,015	0,062	0,039	0,033	0,017	0,054
	8GCP-1	0,015	0,024	0,009	0,036	0,015	0,012	0,015	0,047
	8GCP-2	0,028	0,026	0,010	0,039	0,044	0,019	0,007	0,048
	10GCP	0,043	0,033	0,013	0,055	-	-	-	-

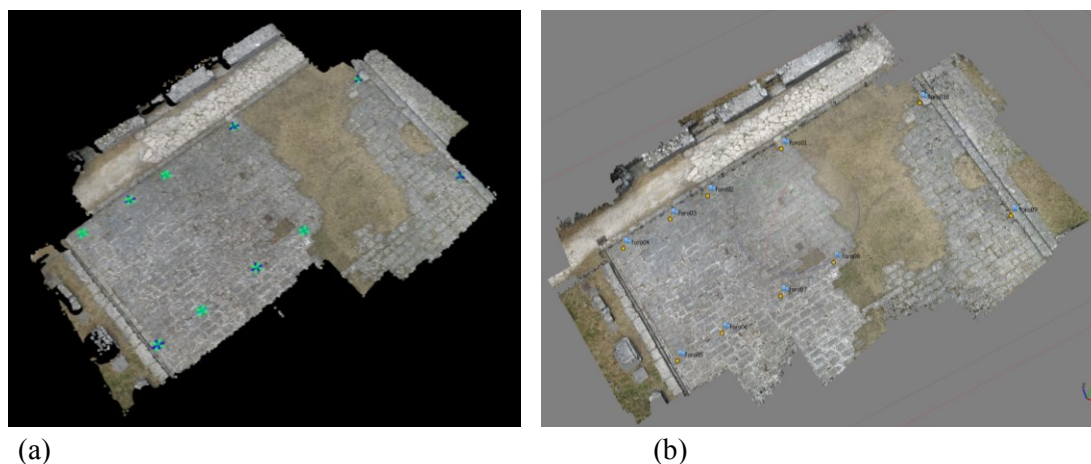
		PIX 4D							
		marker accuracy = 0.02 m							
		GCP				CP			
		SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)	SQM X (m)	SQM Y (m)	SQM Z (m)	SQM XYZ (m)
CONFIGURAZIONE	4GCP-1	0,042	0,040	0,090	0,107	0,078	0,057	0,111	0,147
	4GCP-2	0,022	0,013	0,026	0,036	0,095	0,064	0,114	0,162
	6GCP-1	0,039	0,030	0,041	0,064	0,029	0,040	0,052	0,072
	6GCP-2	0,028	0,037	0,043	0,063	0,056	0,036	0,050	0,083
	8GCP-1	0,034	0,031	0,036	0,059	0,016	0,025	0,025	0,039
	8GCP-2	0,029	0,033	0,039	0,059	0,047	0,016	0,008	0,050
	10GCP	0,031	0,028	0,030	0,051	-	-	-	-

Tabella 7. Scarti in x, y e z senza considerando nel processo di autocalibrazione solo i parametri relativi alla distorsione radiale con marker accuracy pari a 0.02m

## 6.4 Confronto con il modello 3D di riferimento

Per verificare l'accuratezza dei prodotti finali, le nuvole di punti fotogrammetriche, ottenute da immagini acquisite da SAPR, sono state confrontate con la nuvola di riferimento acquisita con rilievo Laser. Le nuvole di punti densi da confrontare sono state calcolate delle configurazioni che hanno restituito valori dei residui minori. In particolare, le configurazioni utilizzate per l'estrazione delle nuvole dense di punti sono state la configurazione 6GCP-1, 8GCP-1, nelle quali a parità di numero di GCP si registrano i residui minori, e 10GCP. Dal confronto sono state escluse le configurazioni 1 e 2 perché, a causa del ridotto numero di GCP (4 in tutto) mostrano dei valori molto alti dei residui (15 cm) sui CP.

Per ognuna delle configurazioni è stata calcolata la nuvola densa di punti sia con PhotoScan che con Pix4D (Figura 102). In PhotoScan il processo di estrazione delle nuvole di punti è stato eseguito settando la qualità/accuratezza pari a "high" e il parametro depth filtering pari a "Moderate"; in Pix4D, invece, il processo è stato condotto settando il parametro image scale pari a "multiscale" (che consente di sfruttare nel calcolo l'intera dimensione dell'immagine) e la densità dei punti pari ad "Optimal".

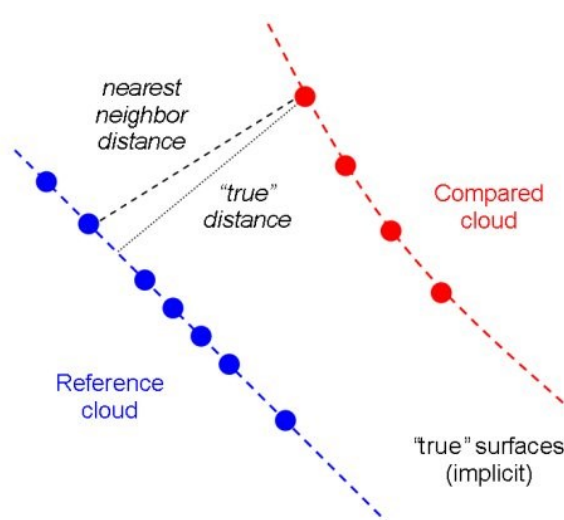


**Figura 102.** Modello 3D ottenuto a partire dalla configurazione 3: (a) Pix 4D; (b) PhotoScan

Per valutare l'accuratezza le nuvole di punti generate fotogrammetricamente sono state confrontate con la nuvola di punti laser fornita utilizzando il software Open Source Cloud Compare.

CloudCompare, inizialmente progettato per eseguire confronti diretti tra le nuvole dense di punti 3D, contiene numerosi algoritmi che sulla base della distanza tra punti di nuvole differenti o tra punti e mesh consentono di calcolare una serie di parametri statistici come la media e l'Errore Quadratico Medio utili per l'analisi delle nuvole di punti.

In particolare, l'algoritmo utilizzato in questo caso per computare la distanza tra le due nuvole oggetto dell'analisi è l'algoritmo di Hausdorff che consente di calcolare la distanza euclidea tra ogni singolo punto della nuvola di riferimento e della nuvola confrontata (Figura 103).



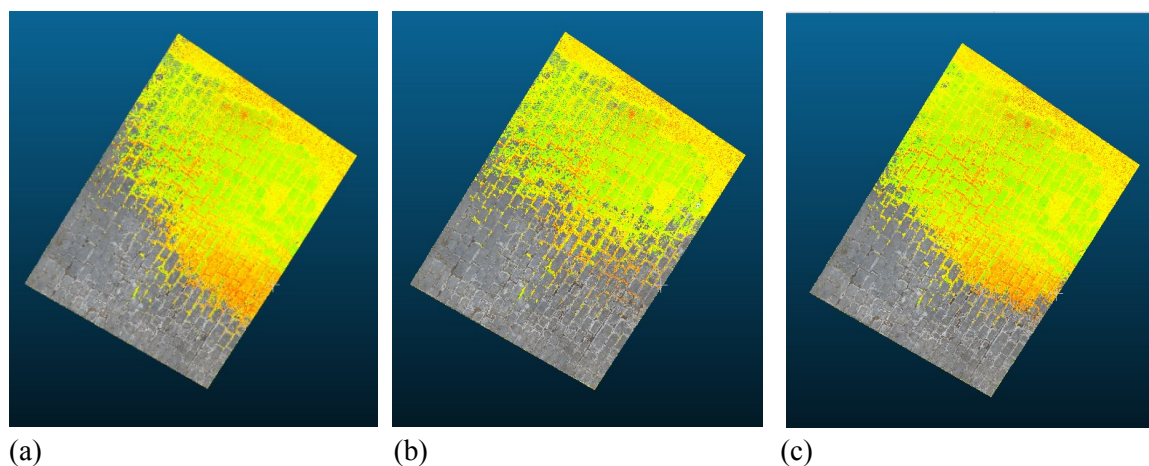
**Figura 103.** Distanza euclidea tra ogni singolo punto della nuvola di riferimento e della nuvola confrontata.

La tabella 8 mostra dei valori della media variabili tra 0.8 cm e 0.9 cm e dello Scarto Quadratico Medio variabili tra 0.5 cm e 0.6 cm per le nuvole calcolate utilizzando il software Photoscan mostrano. Valori leggermente più alti si hanno invece nelle nuvole calcolate con il software Pix4D ma comunque comprese tra 1.1 cm e 1.7 cm per la media e compresi tra 0.9 cm e 1.2 cm per la deviazione standard. In tutte le configurazioni, sia per le nuvole calcolate con PhotoScan che per quelle calcolate con Pix4D, è possibile notare valori della media sempre maggiori rispetto ai valori ottenuti per lo Scarto Quadratico Medio; l'analisi delle nuvole mette quindi in luce l'esistenza di un errore sistematico tra le nuvole dense di punti ottenute da laser scanner e le nuvole ottenute a partire dalle immagini acquisite da SAPR.

Configurazione	PHOTOSCAN			PIX 4D		
	Num. punti	Media (m)	SQM (m)	Num. punti	Media (m)	SQM (m)
6GCP-1	2824341	0.009	0.005	644710	0.013	0.010
8GCP-	2837363	0.008	0.006	645731	0.011	0.009
10GCP	2853989	0.009	0.006	646436	0.017	0.012

**Tabella 8.** Valori dei parametri statistici del confronto tra nuvole di punti ottenuti con il software Cloud Compare

La rappresentazione grafica della distribuzione degli scarti (Figura 104) mostra come in una zona la nuvola fotogrammetrica si trova tutta al di sotto della nuvola laser mentre nell'altra zona avviene esattamente il contrario, ovvero che la nuvola laser si trova tutta al di sotto della nuvola fotogrammetrica.



(a) (b) (c)  
**Figura 104.** Intersezione tra le nuvole di punti calcolate e la nuvola di punti da laser scanner: (a) Configurazione 3; (b) Configurazione 5; (c) Configurazione 7



## Capitolo 7. *Caso studio 2: Villa Lampedusa ai Colli*

I test condotti per il dataset di Villa Lampedusa ai Colli hanno permesso di valutare l'influenza che la metodologia di calibrazione della camera determina sull'accuratezza degli orientamenti.

L'edificio selezionato per effettuare i test è "Villa Lampedusa ai Colli" (Figura 105). Questa antica residenza estiva della nobiltà palermitana è collocata nella Piana dei Colli nella ovest della città di Palermo; questa zona è stata fino ai primi anni del 1900 caratterizzata dalla presenza di numerose ville nobiliari, utilizzate per la villeggiatura. Attualmente Villa Lampedusa e le altre ville nobiliari sono state inglobate nel tessuto urbanistico della città di Palermo.

Edificata nel 1721, l'edificio è noto come la villa del Gattopardo in quanto appartenne al principe Giulio Tomasi di Lampedusa, la cui vita ispirò il pronipote Giuseppe Tomasi di Lampedusa per la sua opera. L'edificio è formato da un corpo unico di modeste dimensioni, a due elevazioni sul lato sud-est ed a tre elevazioni lungo il lato nord-ovest, a cui è addossato un corpo sporgente. Il piano terra della residenza ospita gli ambienti di servizio; il piano nobile ospita invece i saloni di rappresentanza che presentano decorazioni ed affreschi con motivi floreali sulle pareti e sulle finte volte. Il prospetto principale è caratterizzato da uno scalone d'accesso al piano nobile e da decorazioni

policrome. Lo scalone che possiede una impostazione a tenaglia a rampe simmetriche si inserisce all'interno del cortile creato dal susseguirsi a circolo dei volumi (la residenza, le casene, il muro con il portale).



**Figura 105.** Villa Lampedusa ai Colli

L'attuale stato della villa, frutto anche di diversi passaggi di proprietà e di numerose modifiche apportate a partire dalla fine del '700 alternate da lunghi periodi di totale abbandono, presenta una condizione di elevato degrado, infiltrazioni, lesioni nei prospetti, distacchi dell'intonaco, tetti e solai precari o addirittura crollati.

## 7.1 Il rilievo del sito

L'edificio presenta una pianta assimilabile ad un rettangolo delle dimensioni di 35 m x 12 m. La costruzione, il cui punto più alto misura 13 m, è circondata per tre lati (prospetto Nord-Est, prospetto Nord-Ovest e prospetto Sud-Ovest) dall'ampia area del giardino ricco di vegetazione (Figura 106). Grazie alla presenza dell'ampio giardino (molto più piccolo del vasto fondo che un tempo la circondava ma comunque abbastanza esteso) e all'assenza di ostacoli, è stato possibile eseguire le operazioni di rilievo da SAPR senza particolari problemi.





**Figura 106.** Villa Lampedusa ai Colli

La ripresa aerea è stata eseguita con un quadricottero ad otto eliche NT4-Contras, di produzione AIRVISION dalla società E.Lab di Palermo, spin-off dell'Università degli Studi di Palermo. Il velivolo ha una struttura interamente in fibra di carbonio; il peso totale (batterie comprese) è di 2.8 kg e il diametro pari a 45 cm (Figura 107). Il SAPR è dotato di schede di controllo ed è equipaggiato con differenti sensori di navigazione (accelerometri, barometro, GNSS, giroscopio) che consentono di eseguire i voli in automatico ed ottenere una maggiore stabilità. Il velivolo è dotato di otto eliche da 10 pollici messe in moto da otto motori elettrici brushless che permettono di sollevare un carico massimo (payload) di 600 grammi e garantiscono un'autonomia di volo di 15 minuti ed un raggio di azione di circa 500 metri. Il mezzo è gestito dal software proprietario che fornisce informazioni riguardo lo stato del velivolo, il livello della batteria, la posizione, l'altitudine, la velocità, il tempo di volo ed il numero di satelliti disponibili per il posizionamento GNSS. La tabella 9 mostra le caratteristiche del SAPR utilizzato.



**Figura 107.** SAPR NT4-Contras

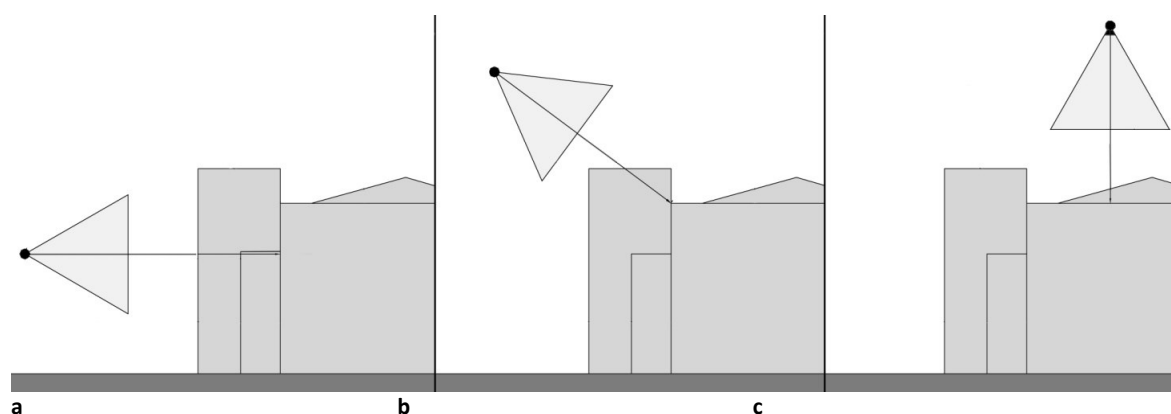
Caratteristiche	Drone NT4-Contras
<b>Peso(gr)</b>	2800
<b>Diametro (cm)</b>	45
<b>Struttura</b>	Interamente in carbonio
<b>Eliche</b>	10"
<b>Elettronica</b>	Dji
<b>Capacità di carico (gr)</b>	600
<b>Tempo di volo (min.)</b>	15
<b>Propulsione</b>	8 elettrici brushless
<b>Camera</b>	Nikon Colpix S3330
<b>Stabilizzazione camera</b>	2 assi
<b>GNSS</b>	SI
<b>pilota automatico</b>	SI

**Tabella 9.** Caratteristiche principali del SAPR utilizzato per il rilievo

Per l'acquisizione delle immagini il SAPR è stato equipaggiato con una camera digitale compatta della Nikon, modello Coolpix S3330. La camera è dotata di sensore CCD di 1/2.3 pollici, di dimensioni 4,4 mm per 6,16 mm, ed ha una dimensione del pixel pari a 1,34 micron per un totale di 16 Megapixel ed un obiettivo con focale variabile da 3,5 a 6,5 millimetri. La camera è fissata su una struttura servo-assistita (gimbal) in fibra di carbonio che consente, mediante radiocomando, di effettuare rotazioni di 90° rispetto l'orizzontale; ciò permette di acquisire immagini sia nadirali che inclinate.

Le prese effettuate mediante l'impiego del SAPR sono state progettate secondo tre schemi differenti (Figura 108):

- prese parallele ai prospetti
- prese inclinate
- prese nadirali



**Figura 108.** Schemi di presa da SAPR: (a) prese parallele ai prospetti; (b) prese inclinate; (c) prese nadirali.

Le prese parallele hanno permesso di acquisire le immagini relative ai prospetti dell'edificio, le prese nadirali hanno permesso di acquisire le immagini relative alla copertura dell'edificio e, infine, le prese inclinate hanno permesso di collegare le due precedenti tipologie di prese in quanto contenenti sia parte dei prospetti che parte della copertura.

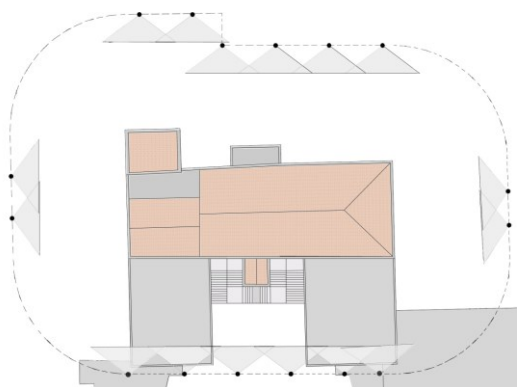
I voli sono stati effettuati in parte in modalità automatica, imponendo un piano di volo precedentemente pianificato, e in parte in modalità manuale. Il volo in modalità manuale ha permesso di acquisire prese di dettaglio e prese difficilmente realizzabili con un volo programmato.

Le prese parallele ai prospetti sono state acquisite ad una distanza di 15 metri dal prospetto, ad una quota di 7 m dal terreno e con un ricoprimento longitudinale pari al 70%; ciò ha permesso di ottenere delle immagini complete della facciata (dalla linea di terra alla linea di gronda) con soli 6 centri di presa per i prospetti di 35 metri e 2 centri di presa per i prospetti di 12 metri (in tutto 16 immagini per la totalità dei prospetti) (Figura 109).

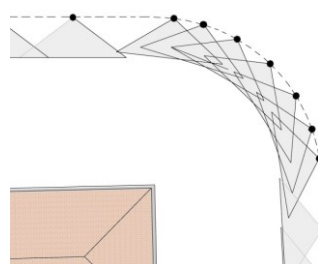
Le prese inclinate, da collegamento tra le prese parallele alla facciata e le prese nadirali, sono state realizzate con i centri di presa posti ad una distanza di 15 metri dalla facciata e ad una quota di 20 metri dal terreno; in tal modo è stato possibile ottenere delle immagini su cui è visibile sia parte del prospetto sia parte della copertura (Figura 110).

Il rilievo degli spigoli dell'edificio, aspetto più problematico della campagna di rilievo, è stato superato effettuando, sia per le prese frontali sia per quelle inclinate, 5 prese per spigolo.

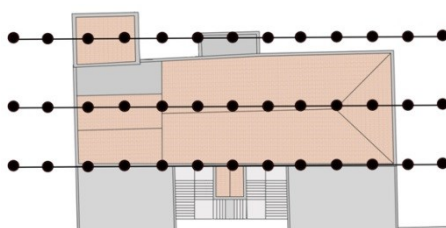
Il rilievo della copertura, infine, è stato ottenuto con tre voli orientati parallelamente alla dimensione maggiore con uno schema di prese nadirali. I voli, realizzati ad una quota costante pari a 25 m, presentano un ricoprimento longitudinale pari al 80% e un ricoprimento trasversale pari al 70% (Figura 111).



**Figura 109.** Voli paralleli ai prospetti

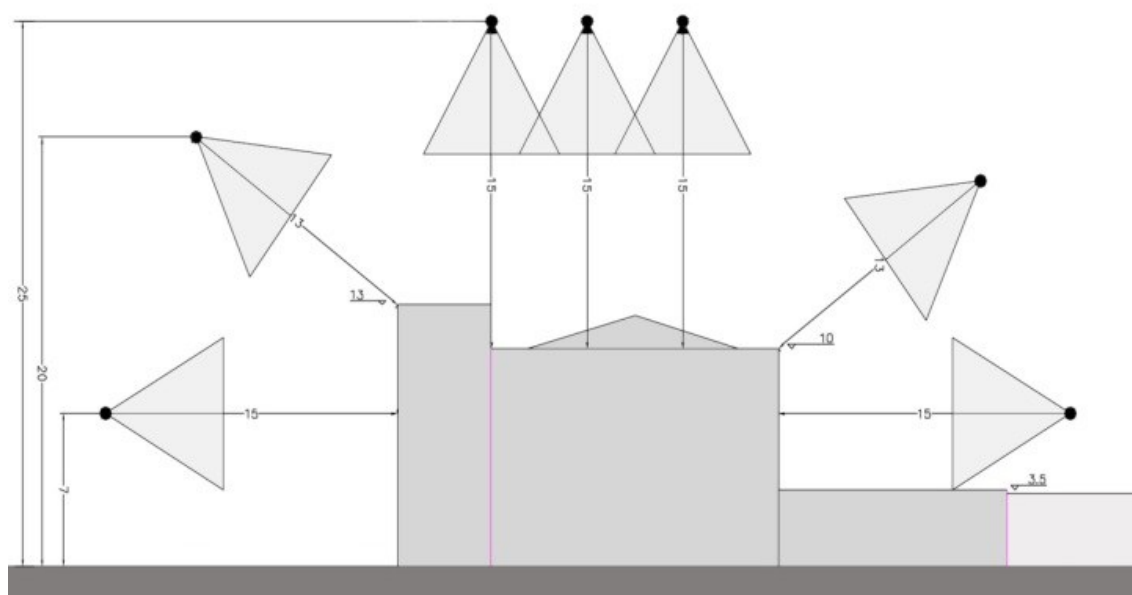


**Figura 110** Voli in corrispondenza degli spigoli



**Figura 111.** Voli nadirali

La Figura 112 riassume i voli eseguiti mediante SAPR per l'acquisizione dell'intero edificio.



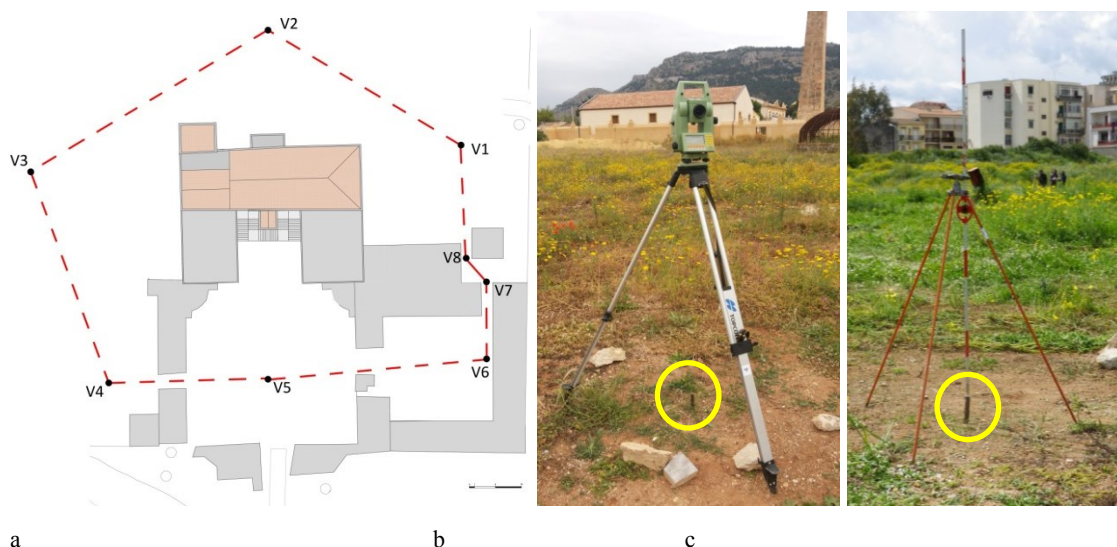
**Figura 112.** Schematizzazione riassuntiva dei voli eseguiti mediante SAPR

A causa della ridotta autonomia del SAPR in alcuni casi è stato necessario suddividere le prese progettate in più voli.

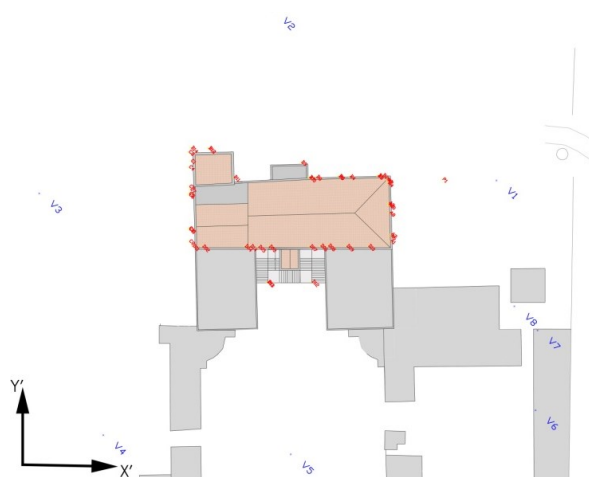
Per acquisire nel dettaglio tutti i prospetti dell'edificio, il rilievo aereo è stato integrato con un rilievo fotogrammetrico terrestre realizzato con una camera digitale di tipo reflex della Nikon modello D5000; la camera è dotata di un sensore CCD di dimensioni 23.6 mm x 15.8 mm ed ha una dimensione del pixel pari a 5.5 micron ed un obiettivo con focale variabile da 18 a 55 millimetri. Lo schema di presa utilizzato ha previsto prese convergenti eseguite impostando sulla camera una focale fissa: il prospetto posteriore e i prospetti laterali dell'edificio sono stati rilevati con prese effettuate ad altezza uomo; il prospetto principale, invece, a causa della presenza dei corpi più bassi addossati allo stesso prospetto, è stato rilevato eseguendo sia prese ad altezza uomo che prese dal piano delle coperture di quest'ultimi.

Durante la fase di rilievo dell'area test si è proceduto anche al calcolo di una poligonale chiusa, composta da otto vertici necessaria sia per l'inquadratura topografica della villa sia per il rilievo dei punti di appoggio sulle facciate (Figura 113a). La poligonale è stata rilevata utilizzando una stazione totale Leica TPS1105 (Figura 113b - 113c). Il rilievo è stato inquadrato in un sistema di riferimento locale individuato in modo che gli assi fossero paralleli alle facciate dell'edificio; nello specifico, l'asse x si è posto parallelo al

lato più lungo del prospetto mentre l'asse y è stato imposto parallelo al prospetto più corto e l'asse z perpendicolare al piano xy (Figura 114).



**Figura 113.** Poligonale chiusa: (a) schematizzazione della rete; (b- c) materializzazione dei vertici e strumenti utilizzati.



**Figura 114.** Sistema di riferimento per il calcolo delle coordinate dei punti di appoggio.

Alcuni dei vertici della poligonale, in particolare quelli frontali rispetto ai prospetti dell'edificio da rilevare (V1, V2, V3, V5), sono stati utilizzati come punti di stazione per l'acquisizione dei punti di appoggio.

Date le grandi dimensioni dell'edificio si è scelto di misurare in tutto 48 punti di appoggio, equamente distribuiti sui quattro prospetti (Figura 115). I punti di appoggio individuati coincidono con punti caratteristici facilmente individuabili sui prospetti

dell'edificio come spigoli, angoli, chiavi di archi. Tali punti sono stati utilizzati in parte come GCP ed in parte come CP per la verifica dell'operazione di orientamento.



**Figura 115.** Punti di appoggio: esempio sul prospetto principale

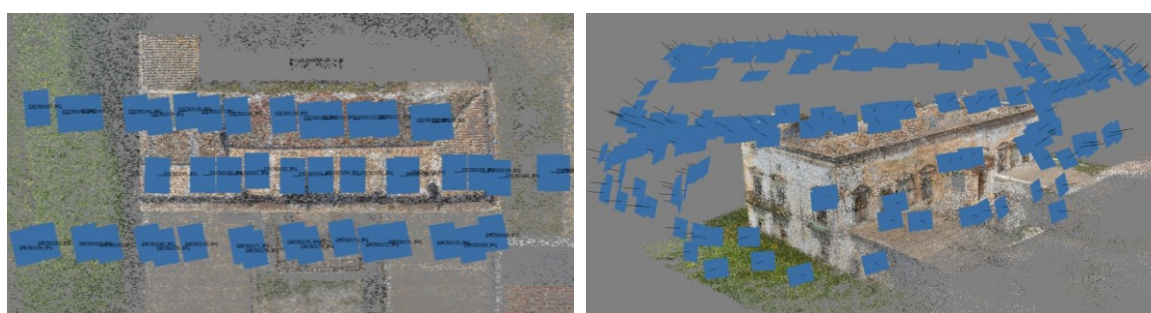
Durante il rilievo del sito, è stato realizzato anche un rilievo laser del prospetto principale e dei due laterali; il rilievo del prospetto posteriore è stato evitato perché in parte coperto dalla vegetazione e in parte coperto da un ponteggio. Il rilievo laser scanner è stato eseguito con strumentazione Faro Focus 3D; in totale sono state eseguite 12 scansioni, con una risoluzione di 6 mm a 10 m, impostando lo scanner ad  $\frac{1}{4}$  della risoluzione effettiva, per un totale di 37 milioni di punti acquisiti.

## 7.2 Elaborazione dei dataset

I test condotti hanno permesso di analizzare le problematiche relative alla progettazione delle prese e alle procedure di calibrazione delle camere fotografiche.

Nonostante tutte le prese sono state effettuate utilizzando la stessa camera, a causa delle differenti condizioni di presa e dell'utilizzo di una camera compatta in cui non è possibile disabilitare la funzione autofocus i parametri di calibrazione della camera potrebbero non mantenersi costanti variano. Pertanto sono stati condotti due differenti test.

In un primo test, il processo di orientamento è stato condotto realizzando un progetto contenente tutte le immagini (prese nadirali + prese oblique + prese parallele) e utilizzando per ogni singolo schema di presa i parametri di calibrazione della camera calcolati separatamente. Per il calcolo dei parametri di calibrazione della camera relativi ai differenti schemi di presa utilizzati (test 1), sono stati predisposti due differenti progetti, sulla base dello schema di acquisizione delle immagini (Figura 116). Un progetto è stato realizzato esclusivamente con le immagini acquisite con le prese nadirali, un altro progetto è stato realizzato con le immagini acquisite con le prese oblique e parallele.



a

b

**Figura 116.** Progetti per la calibrazione della camera con PhotoScan: (a) prese nadirali; (b) prese oblique e parallele.

Un secondo test (test 2), invece, è stato condotto realizzando un progetto contenente tutte le immagini dei tre differenti dataset (prese nadirali + prese oblique + prese parallele) e calcolando i parametri di calibrazione della camera contestualmente alla fase di orientamento delle immagini.

Durante la fase di orientamento dei fotogrammi, i punti rilevati topograficamente sono stati utilizzati in parte come punti di appoggio (GCP) ed in parte come check point (CP). In particolare, sono stati utilizzati 22 GCP e 24 CP. In tutti i test condotti, in relazione alla qualità dei GCP, l'accuratezza del rilievo dei punti di appoggio è stata imposta pari ad 1 cm.

Il software utilizzato per calcolare i parametri di calibrazione della camere utilizzate per l'acquisizione delle immagini di ogni dataset, sia aereo che terrestre, è stato Agisoft PhotoScan. Tutti i processi di orientamento delle immagini sono stati eseguiti settando la qualità dell'allineamento "high" per sfruttare la massima risoluzione dell'immagine e il



numero massimo di punti di legame su ogni fotogramma da “default” pari quindi a 4000 punti.

### 7.3 Valutazione metrica

Per valutare l’accuratezza metrica degli orientamenti sono stati calcolati i parametri statistici della media e dello scarto quadratico medio (SQM). In particolare, lo SQM è stato calcolato utilizzando la formula (11) precedentemente riportata nel paragrafo 6.3.

I valori minimi e massimi, la media e lo SQM dei residui ottenuti nei due differenti test sono riportati nella tabella 10. In particolare la tabella mostrano i residui ottenuti nella fase di orientamento delle immagini sui GCP e sui CP per ogni configurazione considerata.

		GCP				CP			
		MIN	MAX	MEDIA	SQM	MIN	MAX	MEDIA	SQM
TEST 1	X	-0,032	0,026	0,000	0,015	-0,027	0,040	0,000	0,013
	Y	-0,029	0,024	0,000	0,015	-0,029	0,028	0,002	0,016
	Z	-0,022	0,011	0,000	0,008	-0,017	0,025	0,002	0,010
TEST 2	X	-0,025	0,016	0,000	0,011	-0,011	0,028	0,001	0,009
	Y	-0,020	0,014	0,000	0,008	-0,024	0,022	-0,003	0,012
	Z	-0,014	0,028	0,000	0,012	-0,016	0,029	0,006	0,013

**Tabella 10.** Valori statistici sui punti di appoggio

Questi risultati hanno permesso di verificare se con due calibrazioni differenti, una per ogni tipologia di dataset (Test 1), è possibile ottenere un orientamento più corretto rispetto a quello ottenibile realizzando un progetto con una calibrazione unica per tutte le tipologie di dataset (Test 2).

Nonostante il modo di procedere nella realizzazione del test 1 è quello più corretto perché i parametri della camera vengono calcolati precedentemente alla fase di orientamento dei fotogrammi, con il test 2, quello in cui i parametri di calibrazione sono stati calcolati automaticamente, contestualmente al processo di orientamento, si ottengono valori degli scarti comparabili con quelli ottenuti nel test 1. In tutti e due i test, infatti, si hanno scarti

quadratici medi lungo la componente tridimensionale pari a 1 cm per i GCP e 2,1 cm per i CP.

#### 7.4 Calcolo dei modelli digitali tridimensionali e valutazioni metriche

Il modello 3D da confrontare con il modelli ottenuti da rilievo laser scanner è stato calcolato a partire dagli allineamenti condotti per il test 2.

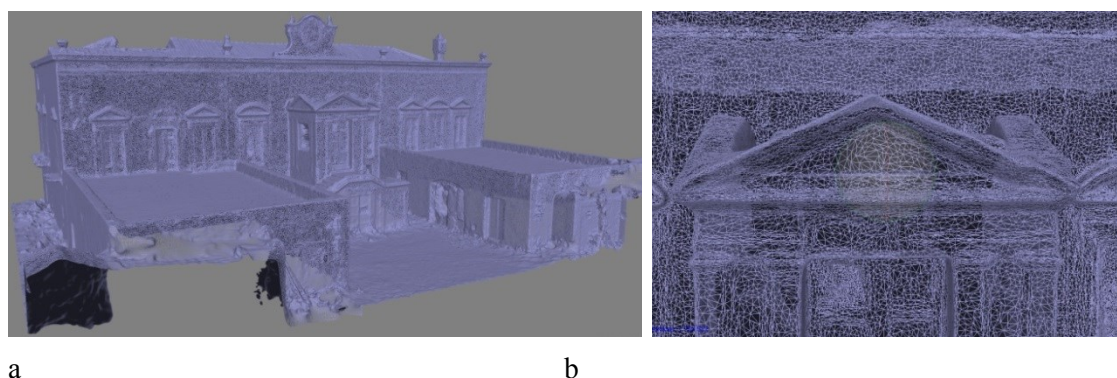
Per il calcolo della nuvola densa di punti il livello di dettaglio del processo è stato settato pari ad “Ultra-High” mentre l’algoritmo che consente di rimuovere l’eventuale rumore presente è stato settato pari a “Moderate”. La nuvola densa di punti generata (Figura 117) è formata da 70.901.999 punti mentre, la mesh calcolata (Figura 118) è composta da 14.0552.128 facce e 7.033.947 vertici (Figura 119a-b).



**Figura 117.** Modello 3D della Villa Lampedusa: nuvola densa di punti

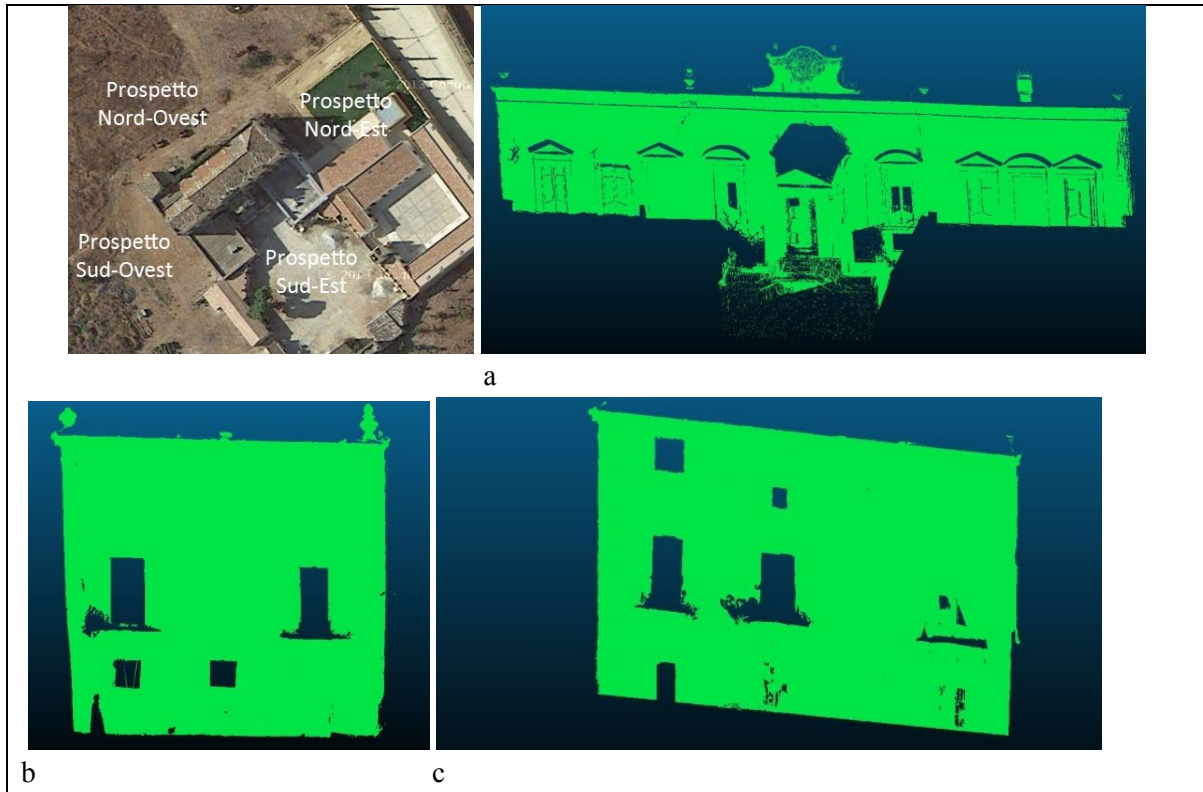


**Figura 118.** Modello 3D della Villa Lampedusa: mesh

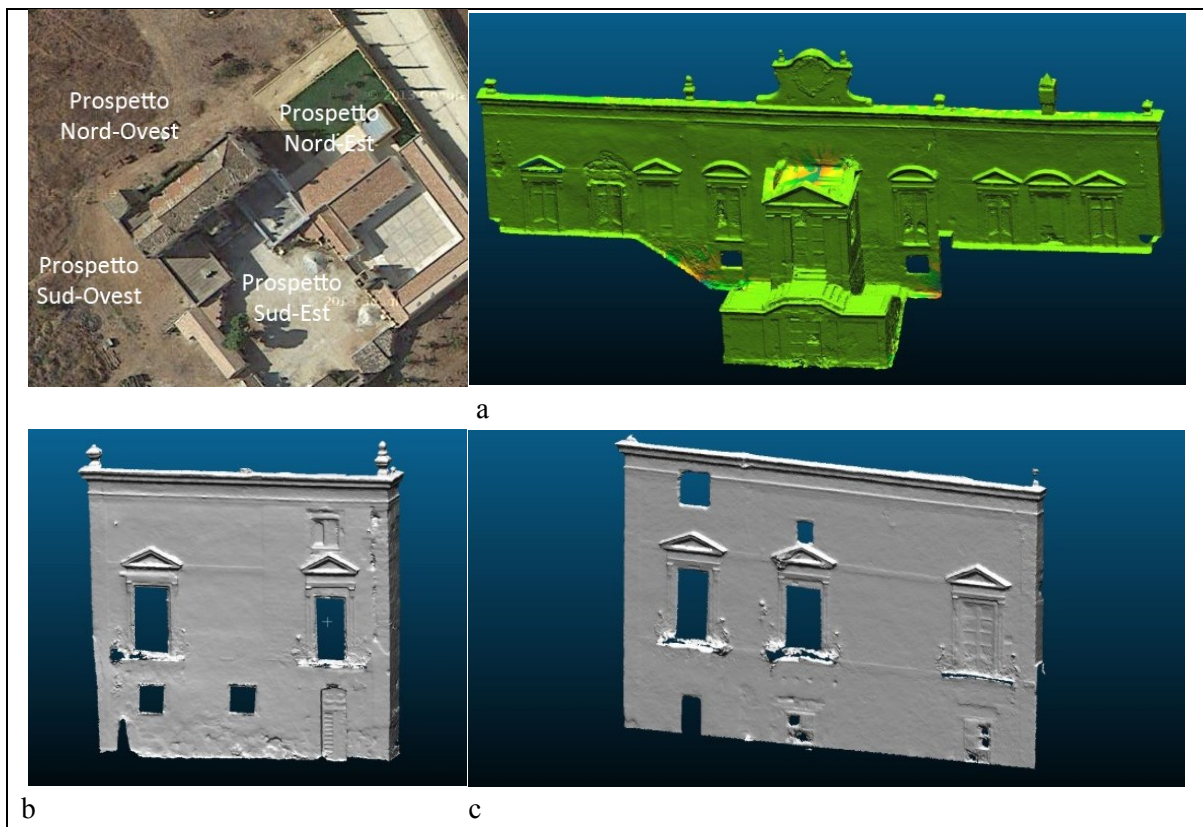


**Figura 119.** Particolari della mesh della Villa Lampedusa: (a) facce; (b) vertici.

Il modello 3D generato è stato confrontato con il modello ottenuto dalle scansioni laser assunto come modello di riferimento per valutare dal punto di vista metrico e qualitativo i prodotti fotogrammetrici ottenuti. A tale scopo, per facilitare il confronto e diminuire il rumore presente nella nuvola densa di punti, sono state generate le mesh dei singoli prospetti sia dalla nuvola laser (Figura 120), che dalla nuvola fotogrammetrica (Figura 121).



**Figura 120.** Mesh laser: (a) Prospetto Sud-Est; (b) prospetto Nord-Est; (c) prospetto Sud-Ovest.



**Figura 121.** Mesh fotogrammetrica: (a) Prospetto Sud-Est; (b) prospetto Nord-Est; (c) prospetto Sud-Ovest.

Già in fase di creazione delle mesh è risultata subito evidente la differenza di qualità tra la mesh prodotta dalle scansioni laser e la mesh prodotta fotogrammetricamente: la prima più pulita e meno rumorosa; la seconda, invece, meno pulita e più rumorosa ma più completa. Il modello laser mostra numerosi buchi causati dalle zone d'ombra generate dagli oggetti presenti sui prospetti poiché le acquisizioni sono state esclusivamente eseguite da terra; il modello fotogrammetrico, invece, risulta più completo, comprendendo oltre ai prospetti anche la copertura dell'edificio dato che l'acquisizione delle immagini è stata realizzata da tre punti di vista differenti, a differenti quote.

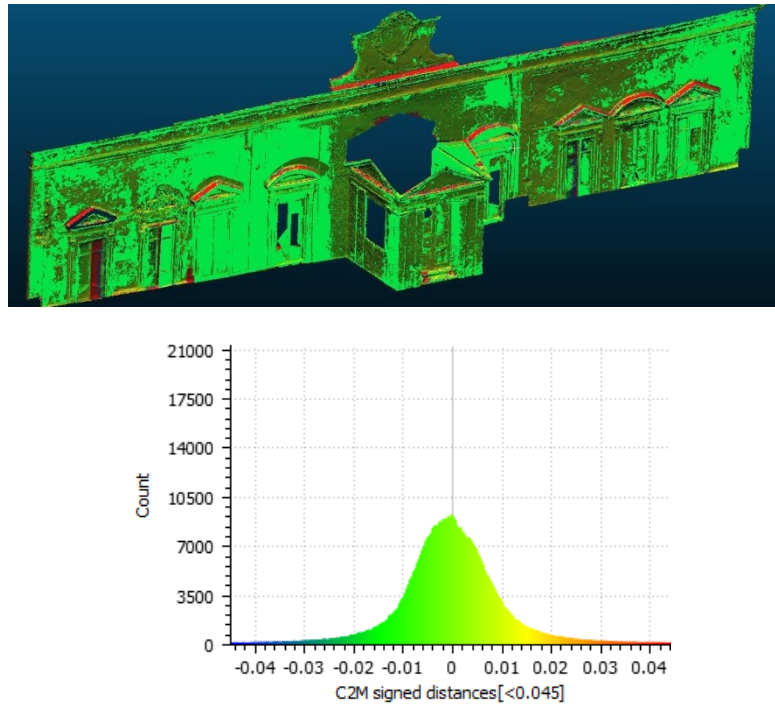
Il confronto tra la mesh di ogni singolo prospetto calcolata a partire dalle immagini fotogrammetriche, e la corrispondente mesh ottenuta dalle scansioni laser, è stato effettuato sulla base della distanza orizzontale tra i due modelli. Il software utilizzato per il confronto è stato realizzato Cloud Compare.

La tabella 11 riporta i valori della media variabili tra 0,1 cm e 0,2 cm e i valori della deviazione standard variabili tra 0,8 cm e 1,5 cm.

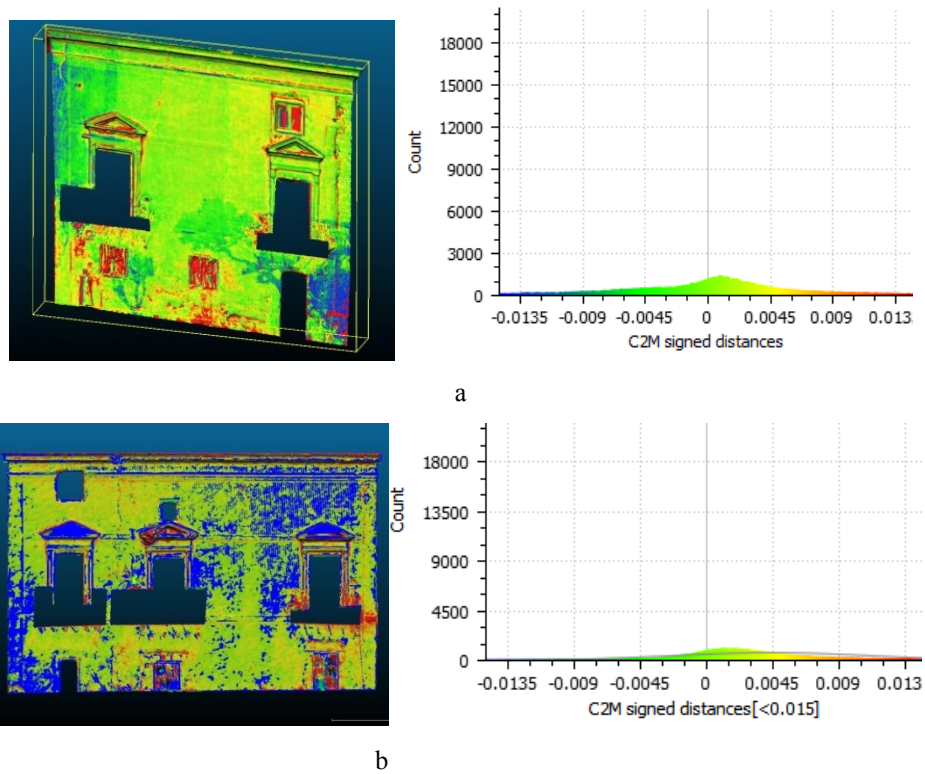
	Parametri statistici		
	Num. punti	Media (m)	Dev. Standard (m)
Prospetto Sud-Est	525827	0.001	0.014
Prospetto Nord-Est	161325	0.002	0.008
Prospetto Sud-Ovest	135025	0.001	0.015

**Tabella 11.** Valori dei parametri statistici del confronto tra nuvole di punti ottenuti con il software Cloud Compare

Il risultato è stato una mappatura completa dello scostamento tra le due differenti geometrie (Figura 122 e Figura 123): in verde tutti i punti con un errore inferiore a 5 mm, invece, dal blu al rosso tutti gli errori progressivamente maggiori. Ad una prima analisi qualitativa dell'immagine, si è notato come gli errori maggiori tra i due modelli siano concentrati in corrispondenza degli sguinci delle finestre, dell'attacco con le pareti contigue e in tutti i punti irraggiungibili con il laser scanner come la parte superiore del cornicione e delle mensole sopra le finestre.



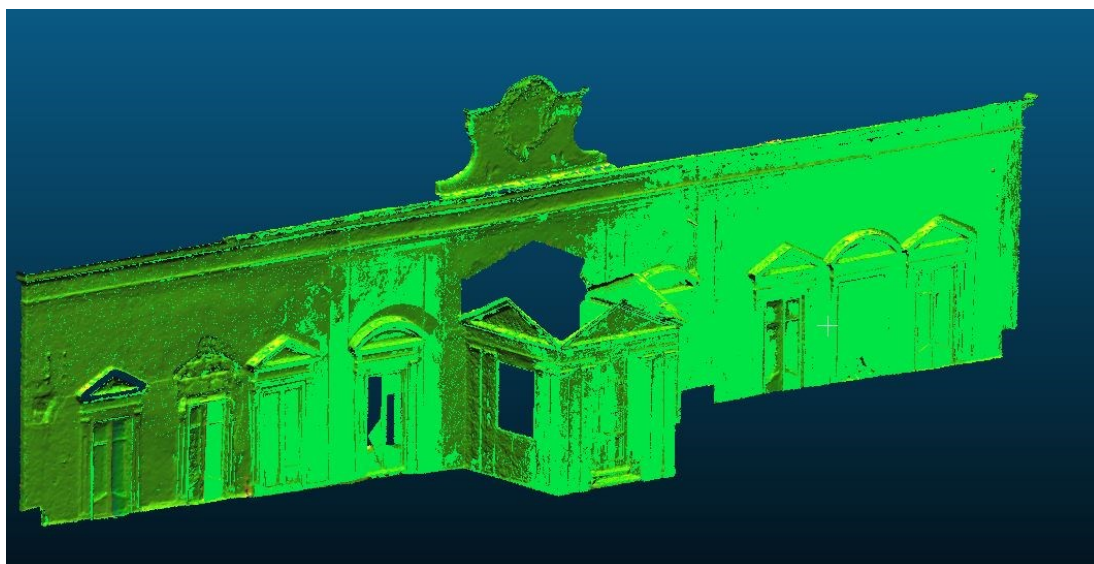
**Figura 122.** Scostamento tra modello fotogrammetrico e modello laser del prospetto Sud-Est e diagramma delle distanze



**Figura 123.** Scostamento tra modello fotogrammetrico e modello laser del prospetto Nord-Est e diagramma delle distanze (a); scostamento tra modello fotogrammetrico e modello laser del prospetto Sud-Ovest e diagramma delle distanze (b).

Gli istogrammi mostrano l'andamento della distanza tra il modello fotogrammetrico e il modello laser al variare della configurazione considerata. Dall'analisi degli istogrammi si è potuto notare come in corrispondenza della maggior parte dei punti analizzati, per tutte e tre le mesh confrontate, le distanze ricadono nell'intervallo di errore compreso tra 0 e 4.5 cm per il prospetto Sud-Est e tra 0 e 1,5 cm per il prospetto Nord-Est e il Prospetto Sud-Ovest.

Inoltre, la Figura 124 mostra la presenza di un errore in corrispondenza del prospetto Sud-Est che determina l'intersezione tra la mesh fotogrammetrica e la mesh da laser scanner. In corrispondenza di una porzione di modello la mesh fotogrammetrica si trova al di sotto della mesh laser, invece, nella porzione restante avviene esattamente il contrario.



**Figura 124.** Prospetto Sud–Est: intersezione tra il modello fotogrammetrico e il modello laser

I dati ottenuti evidenziano, in generale, una notevole accuratezza nell'elaborazione della geometria: l'80% dei dati presenta infatti uno scostamento inferiore ai 15 mm, percentuale alla quale appartiene la quasi totalità dei punti relativi alla superficie dei prospetti.

## 7.5 Generazione dell'ortofoto

A partire dalla nuvola densa di punti è stata calcolata l'ortofoto dei prospetti e della copertura della villa (dalla Figura 125 alla Figura 128).



Figura 125. Ortofoto del prospetto Sud-Est



Figura 126. Ortofoto del prospetto Nord-Ovest.





**Figura 127.** Ortofoto: (a) prospetto Nord-Est (b) prospetto Sud-Ovest; (c) copertura.



**Figura 128.** Ortofoto della copertura.

Per risolvere le problematiche legate alla presenza di ostacoli e di errori di proiezione, l'ortofoto è stata calcolata utilizzando la modalità di calcolo "Average" con cui viene calcolata l'intensità cromatica di ogni singolo triangolo della mesh come media di tutte le intensità cromatiche di uno stesso punto ricavata dalle immagini utilizzate per il calcolo del processo. In tal modo è stato possibile ridurre la differenza tra una foto e la successiva (Figura 129a) ma non le ombre determinate dalla presenza di ostacoli sulle immagini che influiscono sull'intensità radiometrica dei punti calcolati (Figura 129b-c).

Inoltre, tutti i processi di estrazione dell'ortofoto sono stati eseguiti settando la dimensione del pixel nell'immagine pari a 5 mm.



**Figura 129.** Particolare dell'unione tra due immagini successive (a); influenza degli ostacoli sull'intensità radiometrica (b); proiezione degli ostacoli sull'ortofoto (c).

## Capitolo 8. *Caso studio 3: l'abitato del sito archeologico di Eraclea Minoa*

L'analisi delle problematiche connesse con le fasi di pianificazione del volo (quota, velocità, ricoprimenti, sovrapposizioni, modalità di acquisizione delle immagini) e con la fase di elaborazione dei dataset è stata affrontata attraverso l'elaborazione dei dataset del sito archeologico di Eraclea Minoa (AG). Variando la quota di volo del mezzo e la modalità di acquisizione dei fotogrammi (scatto sui waypoint, scatto continuo ad intervallo di tempo), sono stati realizzati in tutto 13 voli utilizzando l'esacottero Aibot x6-v2 della Aibotix. Inoltre, l'analisi delle procedure di elaborazione, ha permesso di valutare l'influenza che il rilievo dei punti di appoggio ha sulle accuratezze degli orientamenti.

Il sito dell'antica Eraclea Minoa è localizzato all'estremità sud-occidentale di un altopiano costiero di calcare marnoso denominato Capobianco, sulla sinistra del fiume Halycos, l'odierno Platani, a metà strada tra Agrigento e Selinunte (Figura 130). L'antico insediamento di Eraclea Minoa si affacciava sul mare in posizione strategica, controllando il fiume, antica via naturale di penetrazione verso l'interno dell'isola ed il golfo di Capobianco. Il limite nord del sito è configurato da un sistema di piccole alture marnoso - argillose, nella più orientale delle quali fu sistemato dai coloni greci il teatro di Eraclea. La città di Minoa, la cui fondazione viene fatta risalire al VI sec. a.C., indicata da Erodoto come colonia dei Selinuntini, venne coinvolta in una serie di guerre e poi abbandonata.



**Figura 130.** Sito archeologico di Eraclea Minoa

Il sito archeologico di Eraclea Minoa è stato oggetto di un cinquantennio di scavi, ricerche e studi da parte della soprintendenza di Agrigento, che hanno portato alla luce le mura di cinta per l'intero sviluppo di circa 6 km. All'interno di questa estesa cinta si sviluppa la città di cui sono stati messi in luce il teatro e l'abitato di età ellenistica (IV-I secolo a. C.). Il teatro, sistemato nella cavità di una collinetta, ha la gradinata aperta a sud, verso il mare, costruita in conci di marna la cui friabilità estrema non consente di resistere agli agenti atmosferici; tale condizione risulta critica per la conservazione del sito (Figura 131)

A sud del teatro, sul pianoro che si estende sino al limite meridionale dello strapiombo sul mare e ad occidente sino al fiume, si sviluppa l'abitato con case ben conservate, sovrapposte in due stratificazioni: quella relativa al IV-III secolo a.C. che segnò il

momento di maggiore sviluppo della città e quella della fase finale della città, relative alla rifondazione dei coloni intorno al II-I secolo a.C..



**Figura 131.** Vista di una porzione di abitato del Sito Archeologico di Eraclea Minoa

## 8.1 Rilievo del sito

Per il rilievo del sito archeologico di Eraclea Minoa è stato realizzato progettando una serie di voli con caratteristiche differenti esclusivamente sulla zona del centro abitato.

L'acquisizione dei dataset aerei è stata realizzata mediante l'impiego di un esacottero di ultima generazione Aibot x6 v2 prodotto dalla Aibotix (Germania) in dotazione al Laboratorio di Geomatica del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali dell'Università di Palermo (Figura 132). Il velivolo, il cui peso massimo al decollo è 5,5 Kg presenta un diametro di circa 1m e un'altezza di 39cm (Figura 133). Il telaio del sistema è costituito da un unico blocco (monoscocca) interamente in fibra di carbonio sul quale vengono installati i motori, le eliche e l'elettronica necessaria al funzionamento (Figura 134a). Il telaio cavo al suo interno

permette il passaggio dei cavi elettrici e di segnale; l'assenza di collegamenti e connessioni esterne al telaio garantisce un'operatività in sicurezza e una semplice trasportabilità del sistema (134b). Il carrello di atterraggio e il sistema di alloggiamento dei sensori, anch'essi in fibra di carbonio, sono montati sul telaio attraverso viti anche ammortizzate.



Figura 132. SAPR utilizzato per il rilievo aereo

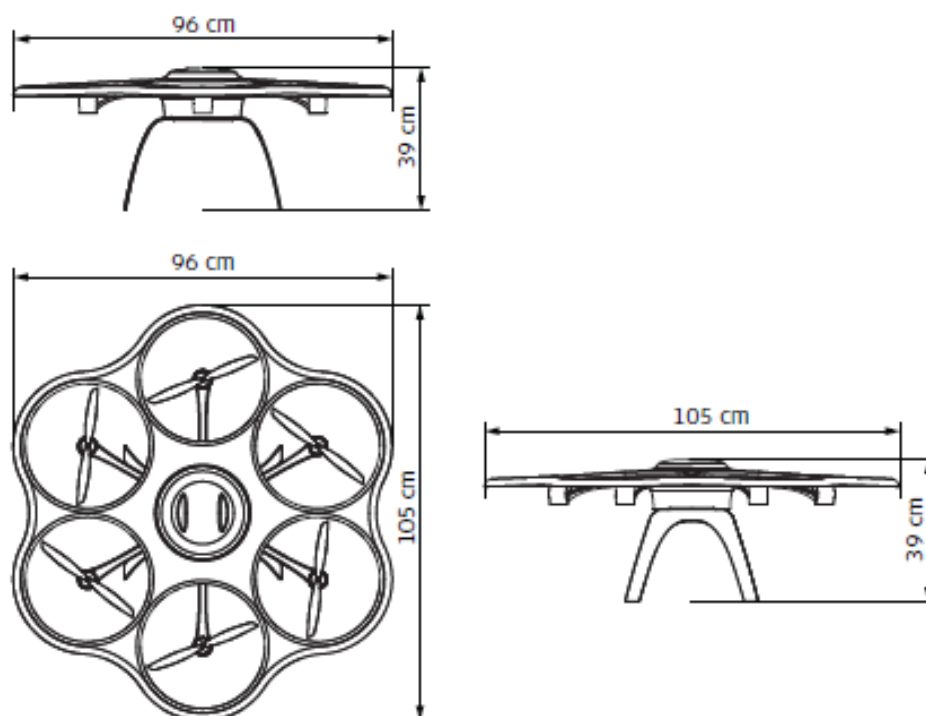


Figura 133. Dimensioni del SAPR utilizzato per l'acquisizione delle immagini aeree.



**Figura 134.** Scocca sul quale vengono installati i motori, le eliche e l'elettronica (a); particolare del telaio cavo all'interno del quale passano i cavi elettrici e di segnale (b)

La propulsione è generata da sei motori elettrici brushless indipendenti alimentati da due batterie Lipo da 5000 mAh che permettono al mezzo di raggiungere una velocità massima di crociera di 5m/sec e una massima velocità di salita di 5 m/sec. Il velivolo è dotato di diversi sensori (accelerometro, giroscopio, bussola, barometro, GNSS) che lo rendono molto sicuro, stabile e facile da gestire. La tabella 12 riporta le principali caratteristiche del mezzo.

CARATTERISTICHE AIBOT X6-V2	
Dimensioni	103cmx100cmx40cm
Peso struttura	2000g
Peso netto payload	2000g
Peso batterie	800g
Peso totale (struttura + batterie + payload)	4800g
Velocità Max	80km/h
Velocità crociera	da 3 a 5 m/s
Altezza massima assoluta di volo	3000mt s.l.m.
Altezza massima dal punto di decollo	500mt
Tempo di volo	8 - 12 minuti (in funzione del payload)
Batterie	LiPo 5000 mAh
Copertura radiocomando	max 500mt

**Tabella 12.** Caratteristiche del velivolo Aibot x6-v2

Per la gestione del SAPR viene utilizzato un radiocomando Graupner MC 32 a 32 canali (Figura 135) che consente una comunicazione bidirezionale tra trasmettitore e ricevitore ed assicura una distanza massima di controllo remoto pari a 500 m.



**Figura 135.** Radiocomando MC32 in modalità 2

Il radiocomando fornisce in tempo reale le informazioni di stato (diagnostica e sistema) del trasmettitore e ricevitore a bordo del velivolo scrivendole sul display in una schermata principale che è riassuntiva dello stato del sistema ed evidenzia le informazioni vitali come i livelli di carica delle batterie, lo stato del link tra trasmettitore e ricevitore, l'indicazione visiva della potenza del segnale ricevuto a bordo del velivolo ecc. Inoltre esistono numerose schermate ausiliarie in cui tutti i dati vitali del sistema sono visualizzati in tempo reale ed ad essi sono associati tutti gli allarmi di sicurezza opportuni.

Anche i dati relativi alla ricezione dei segnali GNSS sono monitorati in tempo reale in una delle schermate del display del radiocomando: in particolare, nel caso di mancanza di ricezione dei satelliti GNSS da parte del ricevitore di bordo, il sistema avvisa con segnali acustici e visivi sul display la mancanza del posizionamento GNSS e l'impossibilità di eseguire voli pianificati.



Per il rilievo del sito archeologico di Eraclea Minoa il velivolo è stato equipaggiato con una camera digitale mirrorless Olympus PEN E PL5 con un obiettivo a focale fissa da 17 mm (Tabella 13); la camera, del peso è di 410g, è stata fissata sul gimbal che ne consente la rotazione orizzontale e verticale per acquisire immagini sia oblique che nadirali (Figura 136).

CARATTERISTICHE CAMERA	
Tipologia	Olympus PEN- EPL5
Peso camera	410g
Risoluzione orizzontale	4608.00
Dimensione sensore	17,30x13,00mm
Lunghezza focale	17mm

**Tabella 13.** Caratteristiche della camera utilizzata per l'acquisizione delle immagini



**Figura 136.** Installazione della camera sul gimbal

Il rilievo aereo della parte dell'abitato del sito archeologico di Eraclea Minoa è stato preceduto da una fase di progettazione che ha permesso di stabilire l'orientamento dei voli, quali parametri utilizzare per la corretta pianificazione di ciascun volo e il numero

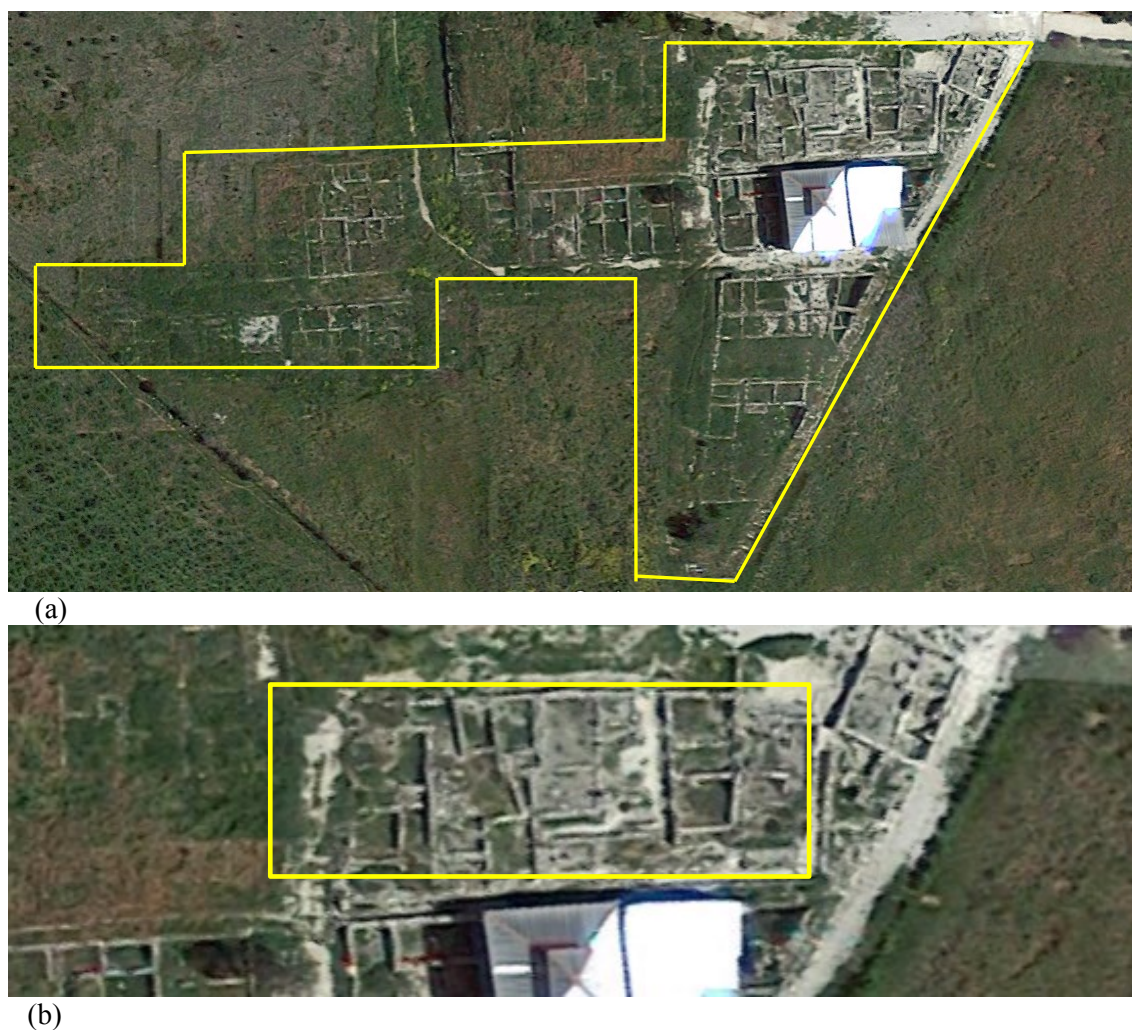
dei voli da realizzare. L'area interessata dai voli è stata esclusivamente quella dell'abitato che presenta una superficie di circa 1,5 ettari (circa 150 m x 100 m).

Si è scelto di progettare i voli con differenti quote di acquisizione, pari a 15 m, 25 m e 40 m, e con modalità di acquisizione diverse (con scatto su singoli waypoint e con scatti continui ad intervallo di tempo fissato). Nei voli in cui la modalità di scatto prevede lo stazionamento sul waypoint, il velivolo si arresta in corrispondenza di punti di coordinate note (detti appunto waypoint) per qualche secondo (1 sec nei test condotti) per stabilizzare la sua posizione durante lo scatto. Nei voli progettati per essere eseguiti con modalità di scatto ad intervallo di tempo, invece, il velivolo, seguendo la rotta stabilita in fase di pianificazione del volo acquisendo immagini ad intervalli di scatto regolari.

I voli a 25m e a 40m sono stati realizzati con una velocità costante pari a 1,5 m/sec mentre, invece, i voli alla quota di 15m sono stati realizzati con una velocità di 1m/sec.

Inoltre, a causa della grande dimensione del sito, è stato necessario diversificare le aree da rilevare in funzione della quota di volo: i voli realizzati alla quota di 40 m sorvolano l'intera area occupata dell'abitato (Figura 137a); per i voli realizzati ad una quota più bassa, 15 m e 25 m, si è deciso, invece, di limitare l'area di volo ad un solo isolato dell'abitato (Figura 137b).

Per la particolare conformazione del sito, determinata dal fatto che l'abitato si estende su un promontorio e la superficie da sorvolare presenta una lieve pendenza (Figura 138a), i piani di volo sono stati progettati tutti con andamento ortogonale alla linea di massima pendenza corrispondente approssimativamente ad una direzione Est-Ovest (Figura 138b-c).



**Figura 137.** Identificazione dell'area da rilevare:(a) voli eseguiti alla quota di 40m; (b) voli eseguiti alla quota di 25m e 15m.

I voli realizzati per acquisire le immagini con scatto sui waypoint (indicati con la sigla WP), sono stati progettati fissando la quota di volo e il ricoprimento longitudinale e trasversale pari al 70%; in tal modo è stato possibile stabilire la posizione e il numero dei waypoint per ogni singolo volo pianificato.

I voli realizzati per acquisire le immagini con scatti continui ad intervallo di tempo (indicati con la sigla TS), invece, sono stati progettati sulla base delle caratteristiche dei voli con scatto sui waypoint. Stimata la base di presa necessaria per avere un ricoprimento del 70% e fissata la velocità di spostamento orizzontale del mezzo è stato calcolato l'intervallo di scatto di un primo volo in maniera tale da riprodurre esattamente le stesse impostazioni del volo eseguito con scatto sui waypoint (Figura 139a-b). E' stato inoltre progettato un secondo volo con scatto in continuo è dimezzando l'intervallo di

scatto precedentemente stimato (indicati con la sigla TS/2). Ciò ha determinato la variazione del ricoprimento longitudinale che dal 70% è diventato pari a circa 90% e a ottenere il doppio delle immagini inizialmente progettate (Figura 139c).



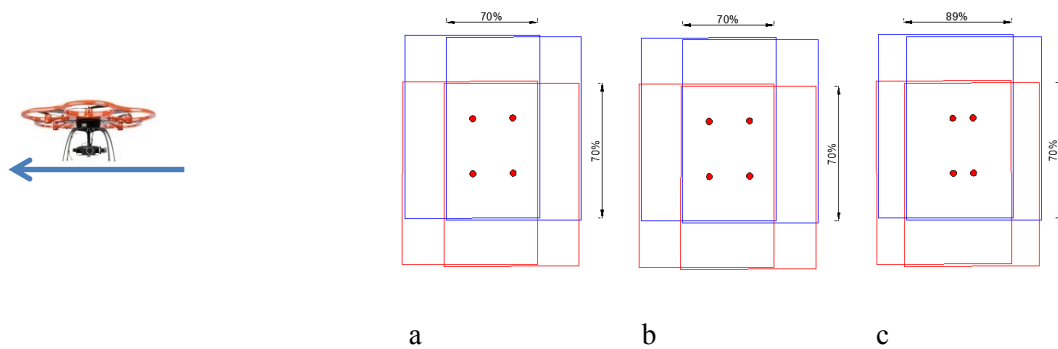
(a)



(c)

(d)

**Figura 138.** Vista di una porzione di area da rilevare (a); andamento dei voli (b) e (c)



**Figura 139.** Ricoprimento tra fotogrammi successivi: (a) scatto sui waypoint; (b) scatto ad intervallo di tempo; (c) scatto ad intervallo di tempo dimezzato.

A causa della ridotta autonomia del SAPR (pari a circa 12 min) e alle elevate dimensioni dell'area da sorvolare, il volo realizzato alla quota di 40 m, che sorvola l'intera area occupata dell'abitato, è stato suddiviso in tre voli differenti, ognuno dei quali permette di acquisire una porzione dell'intera aria (Figura 140).

In tutto i voli totali realizzati sono tredici: 3 voli alla quota di 15 m (Figura 141), 3 voli alla quota di 25 m (Figura 142) e 7 voli alla quota di 40 m (Figura 143).

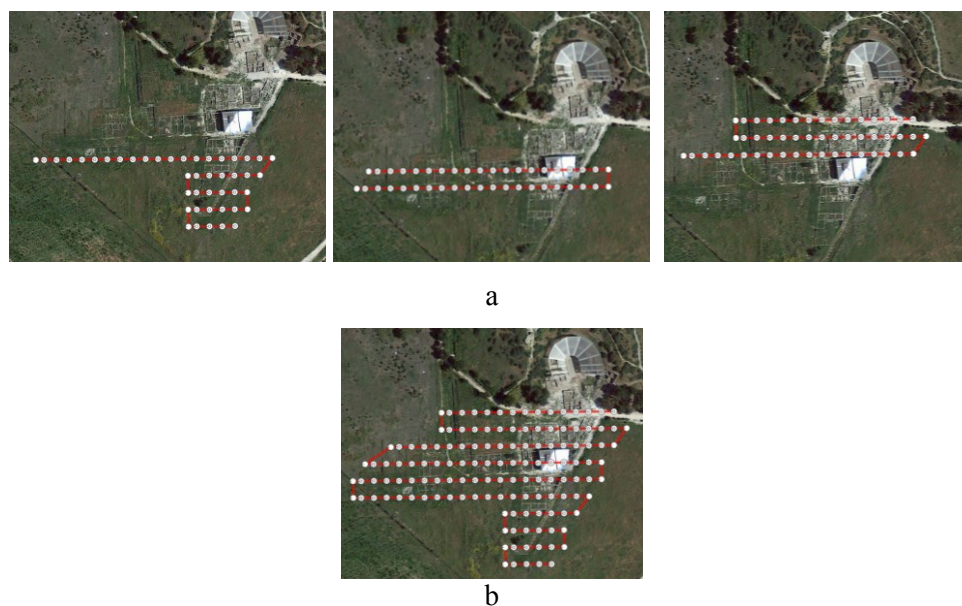


Figura 140. Volo alla quota di 40m: (a) divisione in sezioni; (b) volo totale.

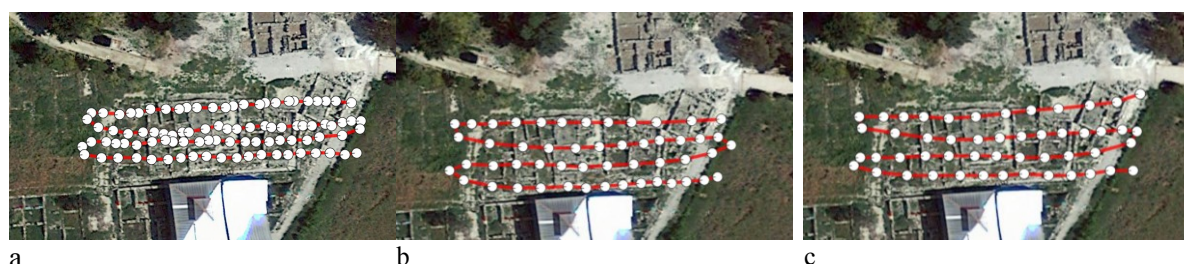
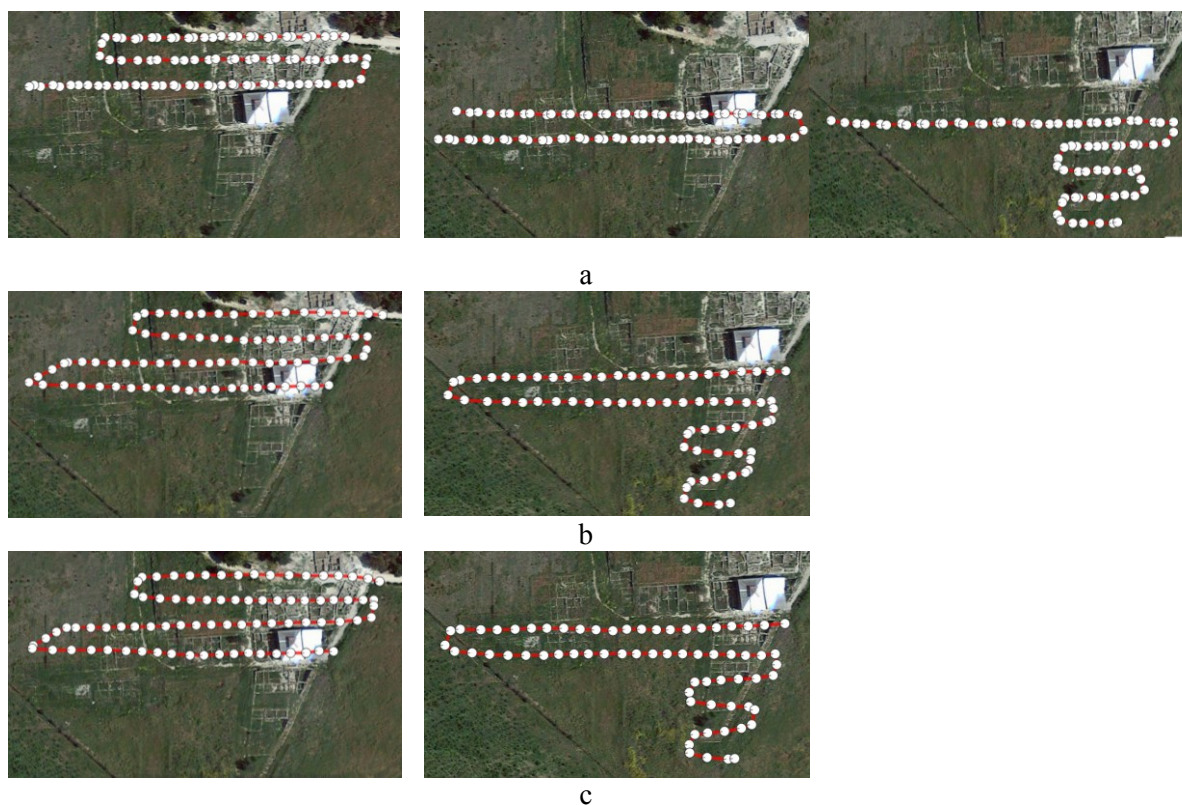


Figura 141. Voli a 15 m: (a) scatto sui Waypoint; (b) scatto ad intervallo di tempo; (c) scatto ad intervallo di tempo dimezzato



Figura 142. Voli a 25 m: (a) scatto sui Waypoint; (b) scatto ad intervallo di tempo; (c) scatto ad intervallo di tempo dimezzato



**Figura 143.** Voli a 40 m: (a) scatto sui Waypoint; (b) scatto ad intervallo di tempo; (c) scatto ad intervallo di tempo dimezzato

La tabella 14 riassume le caratteristiche di ciascun volo.

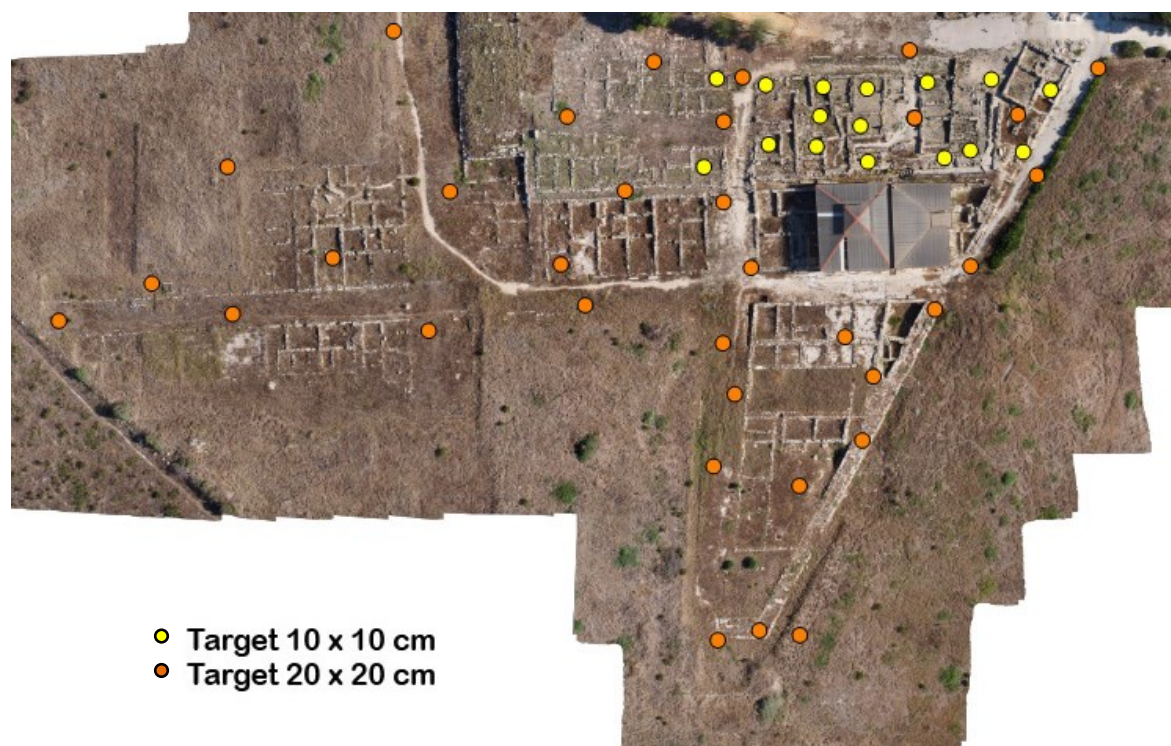
Quota (m)	voli	Velocità (m/sec)	Intervallo di scatto (sec)	Tempo di stazionamento sul punto (sec)	Base di presa (m)	GSD (mm)
40	40WP-sez1	1,5	-	1	9,20	8,83
	40WP-sez2	1,5	-	1	9,20	8,83
	40WP-sez3	1,5	-	1	9,20	8,83
	40TS6-sez1	1,5	6	-	9	8,83
	40TS6-sez2	1,5	6	-	9	8,83
	40TS3-sez1	1,5	3	-	4,5	8,83
	40TS3-sez2	1,5	3	-	4,5	8,83
25	25WP	1,5	-	1	5,75	5,52
	25TS4	1,5	4	-	6	5,52
	25TS2	1,5	2	-	3	5,52
15	15WP	1	-	1	3,45	3,31
	15TS3	1	3	-	3	3,31
	15TS1	1	1	-	1	3,31

**Tabella 14.** Tabella riassuntiva dei voli effettuati.

Per garantire la corretta individuazione dei punti di appoggio su tutte le immagini si è scelto di realizzare target di due dimensioni differenti: con un lato 20 cm x 20 cm per i voli realizzati alla quota di 40 m e da 10 cm x 10 cm per i voli realizzati alla quota di 25 m e di 15 m (Figura 144). I target più grandi sono stati distribuiti sull'intera area dell'abitato, i target più piccoli, invece, sono stati distribuiti esclusivamente in corrispondenza della porzione di isolato sorvolato con i voli realizzati a quote inferiori. In tutto sono stati materializzati 34 target grandi e 16 target piccoli (Figura 145).



**Figura 144.** Punti di appoggio: materializzazione dei target sul terreno



**Figura 145.** Distribuzione dei target sull'area da rilevare

Le coordinate dei target sono state misurate con tecnica GNSS in modalità NRTK utilizzando un ricevitore Topcon Hiper V inoltre, i target più piccoli sono stati rilevati anche tramite un rilievo topografico effettuato con una stazione totale Leica TPS 1105 (Figura 146). Per il rilievo con la stazione totale è stata materializzata e rilevata una poligonale chiusa con quattro vertici (Figura 147). Il rilievo dei target è stato effettuato da una unica stazione.

Le misure effettuate con il GNSS sono state riferite al sistema di riferimento di riferimento UTM -ETRF2000; le misure con la stazione totale sono state invece inquadrare in un sistema di riferimento locale.



**Figura 146.** Rilievo GNSS RTK dei target più grandi





Figura 147. Schematizzazione della poligonale

## 8.2 Elaborazione dei dataset

Per analizzare le procedure di volo e le procedure di orientamento in relazione anche alle metodologie di rilievo dei punti di appoggio, sono stati realizzati diversi test.

Una prima serie di test è stata condotta in funzione delle tre differenti quote di volo. Poiché per ogni singola quota di volo (15 m, 25 m, e 40 m) il volo è stato ripetuto tre volte in funzione della metodologia di acquisizione delle immagini (WP, TS, TS/2), sono stati realizzati tre progetti differenti per ogni quota di volo (15WP, 15TS, 15 TS/2, 25WP, 25TS, 25 TS/2, 40WP, 40TS, 40 TS/2).

Per valutare la metodologia più corretta per l'acquisizione dei punti di appoggio, l'elaborazione delle immagini è stata condotta una volta utilizzando i punti di appoggio rilevati con stazione totale ed una volta utilizzando i punti di appoggio rilevati con il GNSS. In particolare, per tenere conto della differente precisione ottenibile con le due diverse metodologie di rilievo, i test sono stati compiuti considerando una accuratezza dei punti di appoggio pari a 0,5 cm per i punti rilevati con la stazione totale e a 2 cm per quelli misurati con il GNSS.

A tale scopo, poiché i punti di appoggio rilevati con la stazione totale sono stati disposti esclusivamente in corrispondenza di una porzione ridotta del sito, coincidente con l'area sorvolata con i voli realizzati alle quote di 15 m e di 25 m, la realizzazione dei test con le immagini acquisite con i voli realizzati alla quota di 40 m e con i punti di appoggio topografici ha richiesto la definizione di un sotto-blocco, contenente esclusivamente le immagini relative alla porzione di sito sorvolata anche con i voli a quote inferiori.

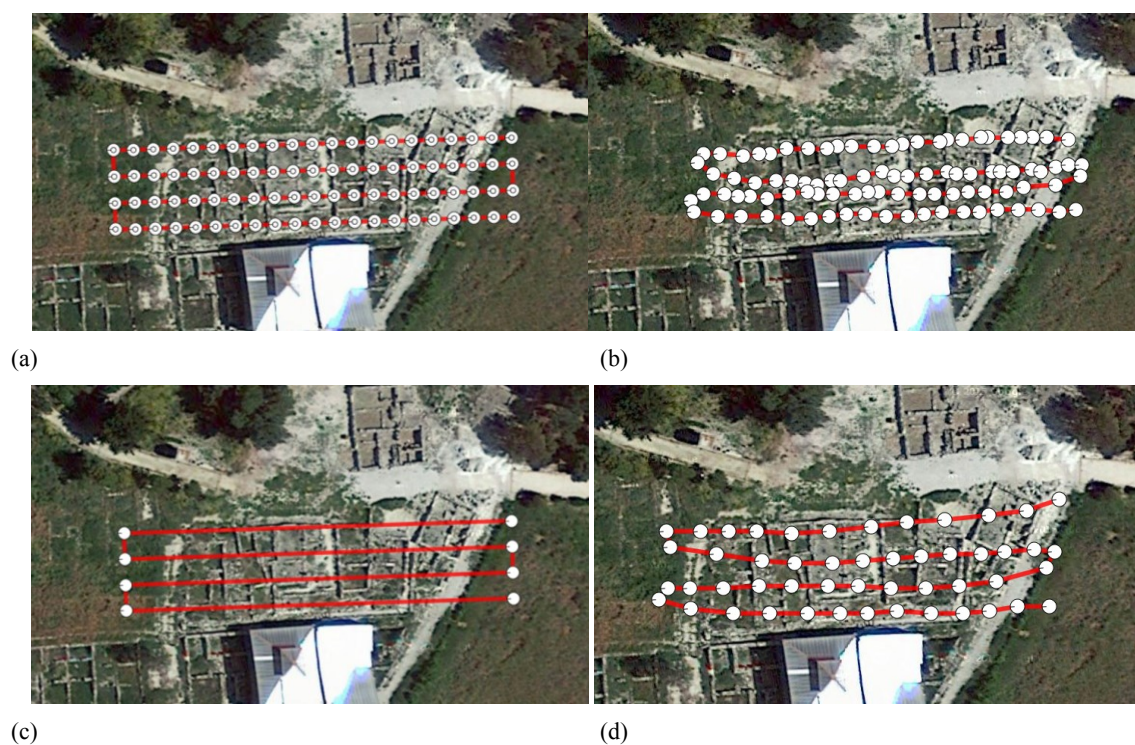
In questo modo sono stati predisposti 18 progetti diversi

- test con punti di appoggio topografici
  - 15WP, 15TS, 15TS/2
  - 25WP, 25TS, 25TS/2
  - 40WP, 40TS, 40TS/2
- test con punti di appoggio GNSS
  - 15WP, 15TS, 15TS/2
  - 25WP, 25TS, 25TS/2
  - 40WP, 40TS, 40TS/2

calcolati sia con il software PhotoScan che con Pix4D.

La fase di elaborazione delle immagini ha mostrato la differenza tra i piani di volo effettivamente realizzati e i piani di volo progettati. Le figure 148 a-b mostrano la differenza tra la traiettoria progettata e la traiettoria effettiva relativamente ad un piano di volo con acquisizione delle immagini in corrispondenza dei waypoint; mentre, le figure 148 c-d sono relative ad un piano di volo con acquisizione delle immagini con scatti continui.

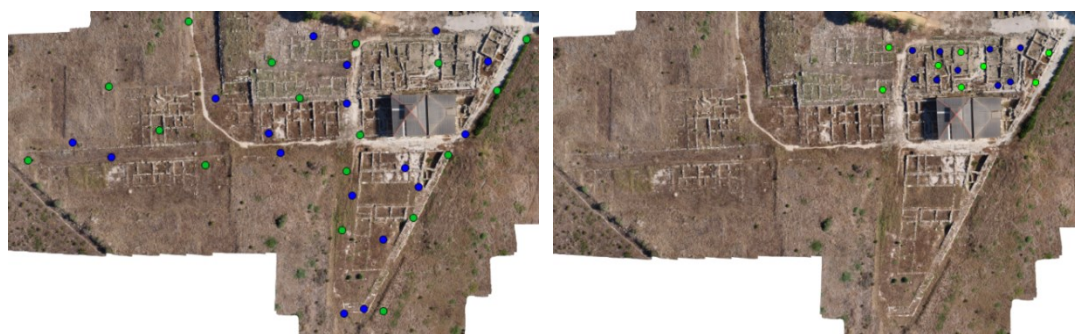
La differenza tra le due traiettorie è giustificata dalla presenza del vento che, agendo sul velivolo in moto lo accelera, se la direzione del vento e quella del velivolo sono concordi, o lo rallenta, se le direzioni sono discordi. In queste condizioni, per assicurare la corretta realizzazione del piano di volo, il SAPR è quindi costretto ad effettuare brusche accelerate o brusche frenate che determinano oltre che la variazione di traiettoria, anche la variazione dei parametri di volo.



**Figura 148.** Differenza tra piano di volo progettato e piano di volo effettivo: (a) volo progettato con scatto sui waypoint; (b) volo effettivo con scatto sui waypoint; (c) volo progettato con scatto ad intervallo di tempo (d) volo effettivo con scatto ad intervallo di tempo.

Dal punto di vista operativo, sia in PhotoScan che in Pix4D i processi di orientamento delle immagini sono stati eseguiti settando la qualità dell'allineamento "high" e il numero massimo di punti di legame su ogni fotogramma da "default" pari a 4000 punti; in Pix4D il parametro relativo a "Keypoints Image Scale" è stato settato "full".

Per la fase di orientamento, i target precedentemente rilevati sono stati utilizzati in parte come GCP e in parte come CP: 18 GCP e 18 CP sono stati utilizzati per i voli realizzati alla quota di 40 m con i punti di appoggio rilevati con GNSS; 9 GCP e 9 CP sono invece stati utilizzati per l'orientamento delle immagini acquisite con i voli a 15m e 25m e per il sotto-blocco relativo al volo a 40 metri per i progetti realizzati sia con i punti di appoggio rilevati sia con la stazione totale sia con il GNSS (Figura 149).



a b  
**Figura 149.** Distribuzione dei GCP (in verde) e dei CP (in blu) sull'area test: (a) volo realizzato alla quota di 40m; (b) volo realizzato alle quote di 25m e 15m e il sotto-blocco del volo a 40 m.

### 8.3 Valutazione dei risultati

L'elaborazione dei dataset del sito archeologico di Eraclea Minoa è stato finalizzato all'analisi, in dettaglio, delle procedure di pianificazione del volo, per rilievi finalizzati alla produzione di ortofoto, e delle procedure di orientamento in relazione anche alle metodologie di rilievo dei punti di appoggio. A tale scopo, una prima valutazione sulle potenzialità dell'elaborazione di immagini acquisite da SAPR ed in particolare dell'influenza dei parametri di volo sui valori delle accuratezze e della metodologie di rilievo dei punti di appoggio sulle procedure di orientamento è stata condotta esaminando le procedure di orientamento delle immagini, realizzate con PhotoScan e con Pix4d. Poiché per la realizzazione dei processi di orientamento i parametri di orientamento interno vengono introdotti come incognite, preliminarmente alla realizzazione delle valutazioni metriche, si è proceduto analizzando l'influenza che i parametri di calibrazione della camera hanno sulle accuratezze dei differenti processi di orientamento. In particolare, l'analisi è stata condotta sulla base dei test realizzati con lo stesso software utilizzando, a parità di quota di volo e a parità di modalità di acquisizione delle immagini, punti di appoggio differenti (Topografici e GNSS).

Per verificare che i risultati ottenuti fossero funzione della precisione dei punti di appoggio utilizzati (che a sua volta è funzione del metodo di rilievo topografico usato stazione totale vs GNSS), sono stati confrontati i parametri di orientamento interno e di distorsione della camera calcolati per i vari progetti. In particolare, il confronto è stato fatto considerando i voli eseguiti alla stessa quota e con la stessa modalità di acquisizione.

Il confronto è stato fatto considerando separatamente i progetti realizzati con PhotoScan e quelli realizzati con Pix4D; i progetti sono stati confrontati a coppie considerando prima quelli realizzati utilizzando le coordinate dei punti d'appoggio acquisite con rilievo topografico con stazione totale e dopo quelli realizzati utilizzando le coordinate dei punti d'appoggio acquisite con rilievo GNSS.

Nelle tabelle 15 e 16 sono riportati, a titolo di esempio, i risultati ottenuti sia con il software PhotoScan e con il Software Pix4D sulla base dei test condotti con il volo realizzato dalla quota di 15 m e dalla quota di 25 m.

	15 WP			25 WP		
	topografico	GNSS	Differenze	topografico	GNSS	Differenze
<b>Focale (pixel)</b>	4536,334	4536,193	<b>0,140</b>	4585,690	1700,023	<b>-20,620</b>
<b>Cx (pixel)</b>	2340,065	2336,155	<b>3,910</b>	2352,094	2389,549	<b>-37,450</b>
<b>Cy (pixel)</b>	1678,440	1669,404	<b>9,040</b>	1700,023	1716,327	<b>-16,300</b>
<b>K1</b>	-0,049	-0,050	<b>0,001</b>	-0,052	-0,053	<b>0,001</b>
<b>K2</b>	0,052	0,051	<b>0,001</b>	0,070	0,070	<b>0,000</b>
<b>K3</b>	-0,034	-0,032	<b>-0,002</b>	-0,060	-0,060	<b>0,000</b>
<b>K4</b>	-	-	-	-	-	-
<b>B1</b>	-	-	-	-	-	-
<b>B2</b>	-	-	-	-	-	-
<b>P1</b>	-0,001	-0,001	<b>0,000</b>	-0,001	-0,001	<b>0,000</b>
<b>P2</b>	0,001	0,002	<b>-0,002</b>	0,002	0,002	<b>0,000</b>
<b>P3</b>	-	-	-	-	-	-
<b>P4</b>	-	-	-	-	-	-

**Tabella 15.** Differenze tra i parametri di calibrazione calcolati per la camera fotografica, con Pix4D, a parità di quota di volo con i punti di appoggio topografici e con i punti di appoggio GNSS

	15 WP			25 WP		
	topografico	GNSS	Differenze	topografico	GNSS	Differenze
<b>Focale (pixel)</b>	4572,4400	4569,4300	<b>3,01</b>	4601,2800	4717,6400	<b>-116,36</b>
<b>Cx (pixel)</b>	2319,3094	2318,9776	<b>0,33</b>	2360,6376	2398,4187	<b>-37,78</b>
<b>Cy (pixel)</b>	1688,7211	1691,3078	<b>-2,59</b>	1687,5923	1725,2646	<b>-37,67</b>
<b>K1</b>	-0,053774	-0,053278	<b>0,0004953</b>	-0,056975	-0,057604	<b>-0,0006299</b>
<b>K2</b>	0,082559	0,081752	<b>-0,0008064</b>	0,103197	0,106880	<b>0,0036830</b>
<b>K3</b>	-0,121402	-0,118556	<b>0,0028460</b>	-0,167950	-0,156269	<b>0,0116810</b>
<b>K4</b>	0,082069	0,078739	<b>-0,0033304</b>	0,116472	0,032659	<b>-0,0838130</b>
<b>B1</b>	-0,690486	0,844349	<b>1,5348350</b>	-3,353980	-4,179230	<b>-0,8252500</b>
<b>B2</b>	2,290520	2,280760	<b>-0,0097600</b>	-5,782220	9,173910	<b>14,9561300</b>
<b>P1</b>	0,002346	0,002382	<b>0,0000366</b>	0,001418	0,001854	<b>0,0004361</b>
<b>P2</b>	-0,001453	-0,001215	<b>0,0002382</b>	-0,001674	-0,001301	<b>0,0003724</b>
<b>P3</b>	-0,597979	-0,669928	<b>-0,071949</b>	-0,858245	-0,805673	<b>0,0525720</b>
<b>P4</b>	0,125998	0,237753	<b>0,1117550</b>	0,899346	0,462329	<b>-0,4370170</b>

**Tabella 16.** Differenze tra i parametri di calibrazione calcolati per la camera fotografica, con PhotoScan, a parità di quota di volo con i punti di appoggio topografici e con i punti di appoggio GNSS

Considerato che i parametri di calibrazione della camera non mostrano differenze significative, per ogni singolo volo processato con punti di appoggio differenti, è possibile ipotizzare che i residui ottenuti, nei differenti progetti elaborati, sono determinati esclusivamente dalla precisione del rilievo dei punti di appoggio e quindi dalla modalità di acquisizione utilizzata.

La valutazione metrica dei test è stata svolta sulla base degli scarti ottenuti sui GCP e sui CP. In tal modo gli errori sulle componenti planimetriche e sulle componenti altimetriche su ogni GCP e su ogni CP registrati in ogni singolo test, ovvero la differenza tra le coordinate calcolate e le coordinate stimate, sono utilizzati per calcolare i parametri statistici della media e dello scarto quadratico medio (SQM) come precedentemente descritto nel paragrafo 6.3.

In generale, i test condotti sono stati valutati sulla base dell'accuratezza ottenuta in corrispondenza dei CP. Pertanto verranno analizzati nel dettaglio i risultati ottenuti solo sui CP anche se nelle tabelle sono mostrati i risultati ottenuti sia sui GCP che sui CP. In particolare, le tabelle 17 e 18 mostrano i valori minimi, massimi, medi degli scarti e gli SQM ottenuti sui GCP e sui CP a parità di quota di volo, nei differenti processi di orientamento ottenuti con PhotoScan e con Pix4D con i punti di appoggio topografici.

Una prima valutazione è stata fatta considerando i progetti realizzati utilizzando come punti di appoggio i punti topografici acquisiti con la stazione totale.

La tabella 17 mostra i valori massimi e minimi degli scarti sulle componenti planimetriche e sulla componente altimetrica per i voli realizzati utilizzando i punti di appoggio topografici ed elaborati con il software PhotoScan. In particolare, nel caso dei voli alla quota di 15 m la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a  $-0,034$  m e scarti massimi che arrivano a  $0,027$  per il volo eseguito con TS1, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a  $-0,013$  m per il volo con i TS1 e scarti massimi che arrivano a  $0,011$  per il volo eseguito con TS3. Nel caso, invece, dei voli alla quota di 25 m, la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a  $-0,056$  m e scarti massimi che arrivano a  $0,063$  per il volo eseguito con TS2, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a  $-0,028$  m e scarti massimi che arrivano a  $0,013$  per il volo eseguito con TS2. Infine, nel caso dei voli alla quota di 40 m la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a  $-0,015$  m per il volo con TS3 e scarti massimi che arrivano a  $0,015$  per il volo eseguito con WP, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a  $-0,013$  m e scarti massimi che arrivano a  $0,019$  per il volo eseguito con WP.

La tabella 17, inoltre, mostra gli SQM ottenuti sui CP ottenuti nei test condotti con PhotoScan utilizzando i punti di appoggio topografici. In particolare, per i voli realizzati alla quota di 15 m gli SQM variano tra  $0,004$  m e  $0,007$  m lungo la componente x, tra  $0,004$  m e  $0,021$  m lungo la componente y e tra  $0,004$  m e  $0,006$  m lungo la componente z. Analogamente, i test condotti con per i voli realizzati alla quota di 25 m restituiscono scarti variabili tra  $0,003$  m e  $0,034$  m lungo la componente x, tra  $0,007$  cm e  $0,03$  m lungo la componente y e tra  $0,005$  m e  $0,013$  m lungo la componente z. Infine, i test condotti con per i voli realizzati alla quota di 40 m restituiscono scarti che variano tra  $0,003$  m e

0,008 m lungo la componente x, tra 0,002 m e 0,01 m lungo la componente y e tra 0,004 m e 0,009 m lungo la componente z.

Dalla tabella è possibile notare come la media degli scarti è quasi sempre nulla in tutti i casi considerati sia rispetto alle componenti planimetriche che alla componente altimetrica. L'unico volo che presenta un comportamento un pò anomalo è il volo realizzato alla quota di 15 m con TS3 che riporta un valore medio di 0,005 m per la componente x e un valore di -0.004 m per la componente y.

Quota	Modalità acq.	Num. imm.	Componente	PHOTOSCAN - PUNTI DI APPOGGIO TOPOGRAFICO							
				GCP				CP			
				MIN	MAX	MEDIA	SQM	MIN	MAX	MEDIA	SQM
15 m	WP	72	X	-0,008	0,006	0,000	0,004	-0,006	0,005	0,000	0,004
			Y	-0,011	0,007	0,000	0,006	-0,003	0,007	0,002	0,004
			Z	-0,005	0,002	-0,001	0,003	-0,005	0,007	0,000	0,004
	TS1	158	X	-0,017	0,011	0,001	0,009	-0,008	0,007	0,003	0,005
			Y	-0,026	0,026	0,000	0,023	-0,034	0,027	-0,003	0,021
			Z	-0,005	0,010	0,000	0,005	-0,013	0,006	-0,001	0,006
	TS3	85	X	-0,019	0,017	0,001	0,012	-0,005	0,015	0,005	0,007
			Y	-0,031	0,028	-0,001	0,024	-0,030	0,025	-0,004	0,021
			Z	-0,003	0,003	0,000	0,003	-0,010	0,011	0,001	0,006
25 m	WP	34	X	-0,011	0,007	0,000	0,006	-0,006	0,008	0,001	0,005
			Y	-0,009	0,010	0,001	0,007	-0,015	0,007	-0,001	0,007
			Z	-0,006	0,005	-0,002	0,004	-0,003	0,010	0,002	0,005
	TS2	57	X	-0,021	0,030	0,012	0,017	-0,056	0,029	0,002	0,034
			Y	-0,037	0,023	0,014	0,018	-0,020	0,063	0,003	0,030
			Z	-0,005	0,012	0,005	0,006	-0,028	0,013	-0,001	0,013
	TS4	30	X	-0,008	0,006	0,000	0,005	-0,003	0,007	0,001	0,003
			Y	-0,011	0,014	0,005	0,008	-0,014	0,010	-0,004	0,009
			Z	-0,009	0,010	-0,001	0,006	-0,010	0,009	0,002	0,007
40 m	WP	116	X	-0,020	0,011	0,000	0,010	-0,011	0,011	0,000	0,008
			Y	-0,022	0,018	0,000	0,012	-0,009	0,015	0,003	0,009
			Z	-0,009	0,005	0,000	0,005	-0,013	0,019	0,002	0,009
	TS3	242	X	-0,005	0,004	0,000	0,003	-0,004	0,004	0,000	0,003
			Y	-0,014	0,013	0,000	0,011	-0,015	0,012	-0,002	0,010
			Z	-0,004	0,009	0,001	0,004	-0,009	0,009	0,001	0,005
	TS6	124	X	-0,004	0,006	0,001	0,003	-0,007	0,002	-0,001	0,003
			Y	-0,004	0,004	0,000	0,003	-0,004	0,003	-0,001	0,002
			Z	-0,007	0,007	-0,001	0,004	-0,009	0,004	-0,001	0,004

**Tabella 17.** Valori minimi, massimi, medi degli scarti e SQM ottenuti sui GCP e sui CP a parità di quota di volo, nei differenti processi di orientamento ottenuti con PhotoScan con i punti di appoggio topografici.



La tabella 18 mostra i valori massimi e minimi degli scarti sulle componenti planimetriche e sulla componente altimetrica per i voli realizzati utilizzando i punti di appoggio topografici ed elaborati con il software Pix4D. In particolare, nel caso dei voli alla quota di 15 m la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a -0,006 m per i voli realizzati con i WP e con TS1 e scarti massimi che arrivano a 0,012 per il volo eseguito con WP, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a -0,015 m per il volo con i TS1 e scarti massimi che arrivano a 0,014 per il volo eseguito con TS3. Nel caso, invece, dei voli alla quota di 25 m, la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a -0,025 m e scarti massimi che arrivano a 0,037 per il volo eseguito con TS2, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a -0,015 m per il volo eseguito con TS4 e scarti massimi che arrivano a 0,077 per il volo eseguito con TS2. Infine, nel caso dei voli alla quota di 40 m la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a -0,009 m e scarti massimi che arrivano a 0,011 per il volo eseguito con WP, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a -0,019 m e scarti massimi che arrivano a 0,021 per il volo eseguito con TS3.

La tabella 18, inoltre, mostra gli SQM ottenuti sui CP ottenuti nei test condotti con Pix4D utilizzando i punti di appoggio topografici. In particolare, per i voli realizzati alla quota di 15 m gli SQM variano tra 0,004 m e 0,006 m lungo la componente x, tra 0,002 m e 0,005 m lungo la componente y e tra 0,005 m e 0,01 m lungo la componente z. Per i voli realizzati alla quota di 25 m gli SQM variano tra 0,003 m e 0,009 m lungo la componente x, tra 0,003 m e 0,012 m lungo la componente y e tra 0,007 m e 0,026 m lungo la componente z. Infine, per i voli condotti alla quota di 40 m gli SQM variano tra 0,005 m e 0,006 m lungo la componente x, tra 0,002 m e 0,006 m lungo la componente y e tra 0,009 m e 0,014 m lungo la componente z per i test condotti con Pix4D.

Anche in questo caso, la tabella mostra come la media degli scarti è quasi sempre nulla in tutti i casi considerati sia rispetto alle componenti planimetriche che alla componente altimetrica e come, anche in questo caso, l'unico volo che presenta un comportamento un po' anomalo è il volo realizzato alla quota di 15 m con TS3 che riporta un valore medio di 0,005 m per la componente x e un valore di -0,004 m per la componente y.

				PIX 4D - PUNTI DI APPOGGIO TOPOGRAFICO							
Quota	Modalità acq.	Num. imm.	Componente	GCP				CP			
				MIN	MAX	MEDIA	SQM	MIN	MAX	MEDIA	SQM
15 m	WP	72	X	-0,008	0,005	-0,001	0,004	-0,006	0,012	0,000	0,006
			Y	-0,003	0,003	-0,001	0,002	-0,005	0,006	0,000	0,004
			Z	-0,018	0,004	-0,005	0,007	-0,012	0,004	-0,004	0,005
	TS1	158	X	-0,003	0,004	0,000	0,002	-0,003	0,004	0,000	0,002
			Y	-0,003	0,004	0,000	0,002	-0,006	0,003	0,000	0,005
			Z	-0,012	0,003	-0,002	0,005	-0,015	0,013	-0,003	0,010
	TS3	85	X	-0,003	0,002	0,000	0,002	-0,003	0,006	0,002	0,004
			Y	-0,003	0,005	0,000	0,002	-0,002	0,003	0,000	0,002
			Z	-0,007	0,005	-0,001	0,004	-0,011	0,014	0,000	0,008
25 m	WP	34	X	-0,005	0,003	0,000	0,003	-0,006	0,008	0,000	0,005
			Y	-0,002	0,003	0,000	0,002	-0,002	0,006	0,001	0,003
			Z	-0,011	0,003	-0,003	0,005	-0,008	0,011	0,001	0,007
	TS2	57	X	-0,006	0,003	-0,001	0,003	-0,025	0,007	-0,002	0,009
			Y	-0,004	0,006	0,001	0,003	-0,003	0,037	0,005	0,012
			Z	-0,019	0,005	-0,004	0,008	-0,008	0,077	0,010	0,026
	TS4	30	X	-0,008	0,001	-0,001	0,003	-0,006	0,004	-0,001	0,003
			Y	-0,004	0,005	0,000	0,003	-0,002	0,006	0,001	0,003
			Z	-0,021	0,008	-0,003	0,009	-0,015	0,011	-0,002	0,009
40 m	WP	116	X	-0,007	0,007	0,000	0,005	-0,007	0,011	0,001	0,006
			Y	-0,004	0,005	0,000	0,003	-0,009	0,009	0,001	0,006
			Z	-0,014	0,005	-0,002	0,006	-0,018	0,012	-0,001	0,011
	TS3	242	X	-0,007	0,003	-0,001	0,003	-0,005	0,008	0,002	0,005
			Y	-0,003	0,005	0,001	0,003	-0,004	0,002	-0,001	0,002
			Z	-0,023	0,013	-0,002	0,012	-0,019	0,021	0,000	0,014
	TS6	124	X	-0,003	0,003	0,000	0,002	-0,007	0,006	0,000	0,005
			Y	-0,003	0,002	0,000	0,002	-0,004	0,003	0,000	0,002
			Z	-0,008	0,009	-0,001	0,005	-0,011	0,020	0,006	0,009

**Tabella 18.** Valori minimi, massimi, medi degli scarti e SQM ottenuti sui GCP e sui CP a parità di quota di volo, nei differenti processi di orientamento ottenuti con Pix4D con i punti di appoggio topografici.

Analogamente, le tabelle 19 e 20 mostrano i valori statistici ottenuti sui GCP e sui CP, a parità di quota di volo, nei differenti processi di orientamento ottenuti con i due software utilizzando come punti di appoggio i punti acquisiti con sistema GNSS.

In particolare, la tabella 19 mostra i valori massimi e minimi degli scarti sulle componenti planimetriche e sulla componente altimetrica per i voli realizzati utilizzando i punti di appoggio GNSS ed elaborati con il software PhotoScan. Nel caso dei voli alla quota di 15

m la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a -0,072 m per il volo eseguito con TS3 e scarti massimi che arrivano a 0,092 per il volo eseguito con TS1, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a -0,064 m per il volo con i TS1 e scarti massimi che arrivano a 0,040 per il volo eseguito con TS3. Nel caso, invece, dei voli alla quota di 25 m, la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a -0,045 m e scarti massimi che arrivano a 0,074 per i voli eseguiti con TS4, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a -0,061 m per il volo eseguito con TS4 e scarti massimi che arrivano a 0,031 per il volo eseguito con WP. Infine, nel caso dei voli alla quota di 40 m la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a -0,088 m e scarti massimi che arrivano a 0,092 per il volo eseguito con TS3, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a -0,067 m e scarti massimi che arrivano a 0,048 per il volo eseguito con WP.

I valori degli SQM ottenuti e sui CP ottenuti nei test condotti con PhotoScan utilizzando i punti di appoggio acquisiti con sistema GNSS sono mostrati nella tabella 19. In particolare, per i voli realizzati alla quota di 15 m gli SQM variano tra 0,034 m e 0,046 m lungo la componente x, tra 0,011 m e 0,042 m lungo la componente y e tra 0,021 m e 0,032 m lungo la componente z. Per i voli realizzati alla quota di 25 m gli SQM variano invece tra 0,018 m e 0,031 m lungo la componente x, tra 0,016 m e 0,036 m lungo la componente y e tra 0,004 m e 0,029 m lungo la componente z. Infine, per i voli realizzati alla quota di 40 m gli SQM variano tra 0,026 m e 0,047 m lungo la componente x, tra 0,035 m e 0,038 m lungo la componente y e tra 0,025 m e 0,035 m lungo la componente z.

Analogamente ai test condotti utilizzando i punti di appoggio topografici, anche per i test condotti con PhotoScan utilizzando i punti di appoggio GNSS è possibile escludere in generale la presenza di eventuali sistematismi anche se, in questo caso, i valori delle medie degli scarti si discostano maggiormente dal valore nullo.

				PHOTOSCAN - PUNTI DI APPOGGIO GNSS							
Quota	Modalità acq.	Num. imm.	Componente	GCP				CP			
				MIN	MAX	MEDIA	SQM	MIN	MAX	MEDIA	SQM
15 m	WP	72	X	-0,049	0,021	-0,004	0,027	-0,050	0,056	0,000	0,034
			Y	-0,046	0,083	-0,010	0,040	-0,036	-0,003	-0,016	0,011
			Z	-0,015	0,043	0,008	0,019	-0,046	0,011	-0,019	0,021
	TS1	158	X	-0,046	0,069	0,010	0,046	-0,070	0,050	-0,007	0,045
			Y	-0,065	0,030	-0,015	0,025	-0,045	0,092	-0,001	0,042
			Z	-0,046	0,025	-0,008	0,021	-0,064	0,029	-0,009	0,031
	TS3	85	X	-0,039	0,067	0,010	0,045	-0,072	0,050	-0,007	0,046
			Y	-0,050	0,023	-0,015	0,022	-0,050	0,089	-0,006	0,042
			Z	-0,049	0,029	-0,007	0,022	-0,054	0,040	-0,009	0,032
25 m	WP	34	X	-0,018	0,026	0,003	0,016	-0,040	0,032	-0,003	0,023
			Y	-0,034	0,086	0,004	0,035	-0,022	0,029	-0,004	0,019
			Z	-0,016	0,052	0,005	0,020	-0,029	0,031	-0,006	0,029
	TS2	57	X	-0,058	0,032	0,000	0,029	-0,026	0,036	0,012	0,018
			Y	-0,053	0,028	0,002	0,030	-0,020	0,028	0,014	0,016
			Z	-0,007	0,006	-0,001	0,004	-0,007	0,006	0,001	0,004
	TS4	30	X	-0,044	0,036	0,003	0,025	-0,045	0,023	-0,008	0,022
			Y	-0,037	0,019	-0,013	0,019	-0,039	0,074	-0,012	0,036
			Z	-0,046	0,030	-0,002	0,023	-0,061	0,023	-0,009	0,027
40 m	WP	116	X	-0,087	0,059	0,002	0,041	-0,036	0,077	0,013	0,031
			Y	-0,052	0,057	0,001	0,027	-0,072	0,077	0,012	0,038
			Z	-0,132	0,120	-0,001	0,053	-0,067	0,048	-0,019	0,030
	TS3	242	X	-0,036	0,116	0,007	0,060	-0,088	0,092	0,003	0,047
			Y	-0,003	0,042	-0,003	0,043	-0,074	0,067	0,015	0,035
			Z	-0,043	0,032	-0,011	0,037	-0,049	0,037	-0,009	0,035
	TS6	124	X	-0,042	0,060	0,001	0,029	-0,036	0,070	0,020	0,026
			Y	-0,047	0,043	0,000	0,023	-0,084	0,078	0,013	0,036
			Z	-0,130	0,101	0,000	0,050	-0,054	0,030	-0,017	0,025

**Tabella 19.** Valori minimi, massimi, medi degli scarti e SQM ottenuti sui GCP e sui CP a parità di quota di volo, nei differenti processi di orientamento ottenuti con PhotoScan con i punti di appoggio GNSS.

La tabella 20 mostra, invece, i valori massimi e minimi degli scarti sulle componenti planimetriche e sulla componente altimetrica per i voli realizzati utilizzando i punti di appoggio GNSS ed elaborati con il software Pix4D. Nel caso dei voli alla quota di 15 m la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a -0,036 m per il volo eseguito con TS1 e scarti massimi che arrivano a 0,047 per il volo eseguito con TS1 e TS3, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a -0,033 m per il volo con i WP e scarti massimi che arrivano a 0,051 per il volo eseguito

con TS1 e TS3. Nel caso, invece, dei voli alla quota di 25 m, la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a  $-0,033$  m e scarti massimi che arrivano a  $0,046$  per i voli eseguiti con WP, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a  $-0,054$  m e scarti massimi che arrivano a  $0,045$  per il volo eseguito con TS4. Infine, nel caso dei voli alla quota di 40 m la tabella presenta lungo le componenti planimetriche scarti minimi che arrivano a  $-0,081$  m e scarti massimi che arrivano a  $0,086$  per il volo eseguito con TS3, mentre, per la componente altimetrica mostra scarti minimi che arrivano a  $-0,034$  m e scarti massimi che arrivano a  $0,054$  per il volo eseguito con TS3.

La tabella riporta anche i valori degli SQM ottenuti sui CP ottenuti nei test condotti con Pix4D utilizzando i punti di appoggio acquisiti con sistema GNSS. In particolare, per i voli realizzati alla quota di 15 m si registrano degli SQM variabili tra  $0,025$  m e  $0,027$  m lungo la componente x, tra  $0,016$  m e  $0,017$  m lungo la componente y e tra  $0,026$  m e  $0,027$  m lungo la componente z. Analogamente, per i voli realizzati alla quota di 25 m si ottengono SQM variabili tra  $0,024$  m e  $0,025$  m lungo la componente x, tra  $0,013$  m e  $0,016$  m lungo la componente y e tra  $0,024$  m e  $0,033$  m lungo la componente z. Infine, per i voli realizzati alla quota di 40 m si ottengono SQM pari a  $0,023$  m lungo la componente x, e variabili tra  $0,036$  m e  $0,038$  m lungo la componente y e tra  $0,019$  m e  $0,021$  m lungo la componente z.

Anche per i test realizzati con Pix4D con i punti di appoggio GNSS è possibile escludere la presenza di eventuali sistematismi anche se, come per i test condotti con PhotoScan utilizzando i punti di appoggio GNSS, i valori delle medie degli scarti si discostano maggiormente dal valore nullo.

				PIX 4D - PUNTI DI APPOGGIO GNSS							
Quota	Modalità acq.	Num. imm.	Componente	GCP				CP			
				MIN	MAX	MEDIA	SQM	MIN	MAX	MEDIA	SQM
15 m	WP	72	X	-0,028	0,036	0,001	0,026	-0,035	0,036	-0,002	0,027
			Y	-0,070	0,034	-0,002	0,033	-0,011	0,042	0,027	0,016
			Z	-0,052	0,017	-0,004	0,022	-0,033	0,038	0,020	0,026
	TS1	158	X	-0,027	0,034	0,000	0,024	-0,036	0,034	-0,003	0,026
			Y	-0,066	0,039	0,000	0,032	-0,011	0,047	0,029	0,017
			Z	-0,035	0,020	0,001	0,018	-0,028	0,051	0,005	0,027
	TS3	85	X	-0,028	0,033	0,000	0,025	-0,032	0,034	-0,003	0,025
			Y	-0,064	0,036	0,000	0,031	-0,010	0,047	0,031	0,016
			Z	-0,045	0,021	0,001	0,021	-0,028	0,051	0,008	0,027
25 m	WP	34	X	-0,028	0,034	0,001	0,024	-0,033	0,032	-0,003	0,024
			Y	-0,062	0,031	0,000	0,031	-0,005	0,046	0,031	0,016
			Z	-0,033	0,031	0,002	0,021	-0,039	0,037	0,006	0,026
	TS2	57	X	-0,023	0,036	0,002	0,022	-0,031	0,036	-0,003	0,025
			Y	-0,055	0,035	0,001	0,030	-0,002	0,044	0,032	0,014
			Z	-0,035	0,032	0,003	0,023	-0,033	0,042	0,005	0,024
	TS4	30	X	-0,019	0,032	0,001	0,018	-0,031	0,036	-0,002	0,025
			Y	-0,054	0,030	0,000	0,029	0,003	0,045	0,031	0,013
			Z	-0,038	0,022	-0,003	0,019	-0,054	0,045	-0,002	0,033
40 m	WP	116	X	-0,049	0,051	0,000	0,029	-0,066	0,031	-0,019	0,023
			Y	-0,043	0,046	0,000	0,022	-0,078	0,078	-0,012	0,038
			Z	-0,103	0,103	-0,002	0,045	-0,024	0,047	0,016	0,019
	TS3	242	X	-0,063	0,049	0,000	0,030	-0,059	0,038	-0,020	0,023
			Y	-0,044	0,040	0,000	0,021	-0,081	0,086	-0,011	0,036
			Z	-0,088	0,086	-0,003	0,043	-0,034	0,054	0,014	0,021
	TS6	124	X	-0,053	0,042	0,000	0,028	-0,062	0,042	-0,020	0,023
			Y	-0,035	0,038	0,000	0,020	-0,078	0,085	-0,011	0,037
			Z	-0,086	0,108	-0,003	0,043	-0,025	0,050	0,014	0,020

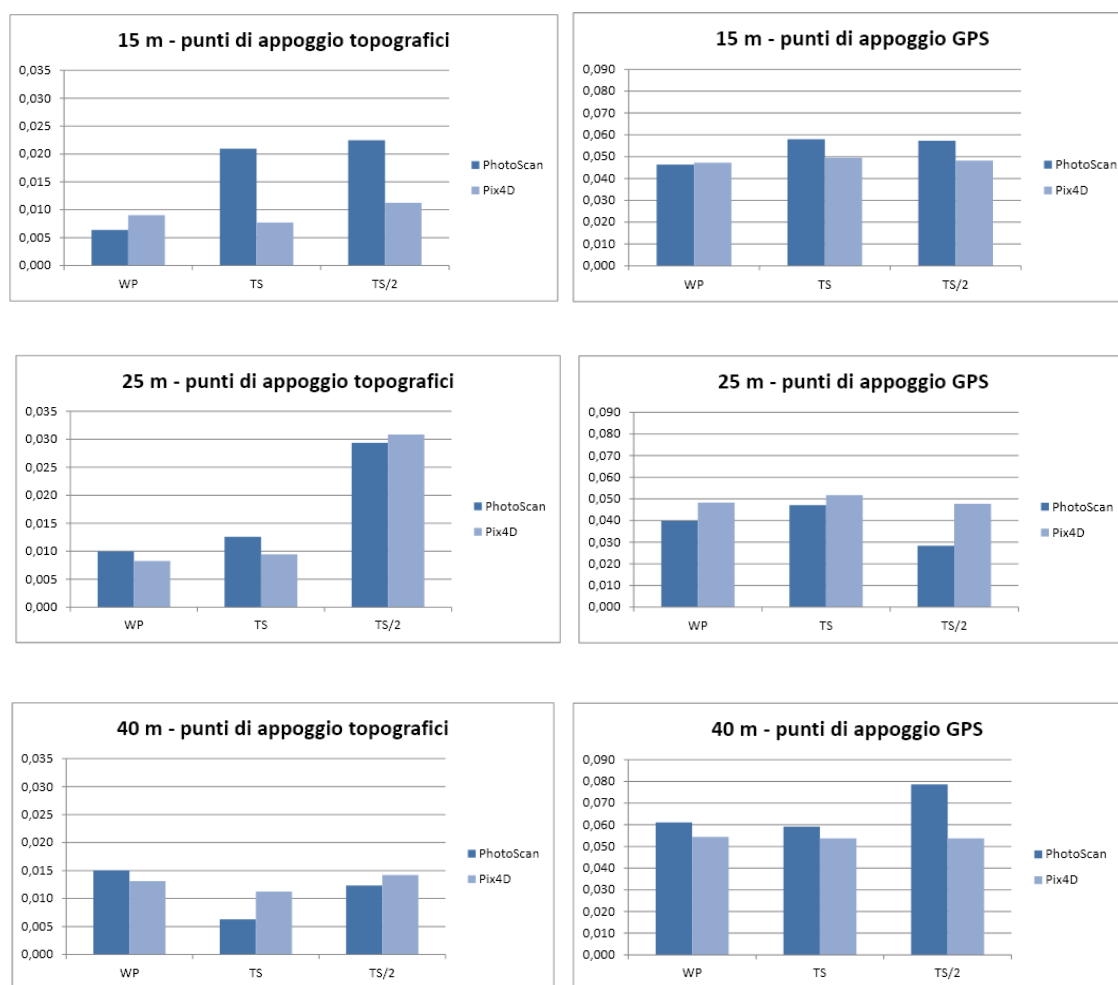
**Tabella 20.** Valori minimi, massimi, medi degli scarti e SQM ottenuti sui GCP e sui CP a parità di quota di volo, nei differenti processi di orientamento ottenuti con Pix4D con i punti di appoggio GNSS.

In generale, come ci si aspettava, le tabelle mostrano scarti sulle componenti planimetriche e sulla componente altimetrica nell'ordine di pochi centimetri, compatibili con le precisioni del rilievo dei target.

I risultati ottenuti hanno permesso di valutare l'influenza della metodologia di rilievo dei punti di appoggio sulle accuratezza degli orientamenti e in particolare, hanno dimostrato che sulla stessa zona, indifferentemente dalla quota di volo, e di conseguenza dal GSD, si ottengono valori degli scarti quadratici medi tridimensionali con lo stesso ordine di

grandezza variabile tra 1 e 2 cm per i progetti con i punti di appoggio topografici e tra 4 e 5 cm per i progetti con i punti di appoggio GNSS. Ciò significa che l'accuratezza dell'orientamento indipendente dalla quota di volo è fortemente vincolata dalla metodologia utilizzata per il rilievo dei punti di appoggio.

Ulteriori test hanno permesso di valutare a parità di quota di volo quale sia la condizione migliore per l'acquisizione delle immagini da SAPR. Gli istogrammi riportati in figura 150 permettono di confrontare gli scarti ottenuti in corrispondenza delle diverse quote di volo nei progetti realizzati con immagini acquisite con scatto sui waypoint, con scatti continui ad intervallo di tempo e con scatti continui ad intervallo di tempo dimezzato. In particolare, gli istogrammi riportano sia gli scarti ottenuti utilizzando i punti di appoggio rilevati con la stazione totale sia gli scarti ottenuti utilizzando i punti di appoggio rilevati con il GNSS.



**Figura 150.** Scarti ottenuti in funzione della differente modalità di acquisizione delle immagini utilizzata per il rilievo del sito: punti di appoggio topografici e GNSS

I test condotti mostrano che i voli condotti alla quota di 15m con la modalità di acquisizione con scatto sui waypoint presentano i valori più bassi degli scarti, nell'ordine di 0,5 cm con i punti di appoggio topografici e 4,5 cm con i punti di appoggio GNSS. I test condotti alla quota di 25 m, invece, mostrano valori degli scarti uguali e pari ad 1 cm per i test con punti di appoggio topografici e valori pari a 4 cm con i punti di appoggio GNSS sia con la modalità di acquisizione con scatti continui ad intervallo di tempo sia con quella con scatto sui waypoint. Incrementando la quota di volo a 40 m, i test mostrano un comportamento differente: gli scarti sono pari a 1,4 cm con la modalità di acquisizione con scatto sui waypoint e 0,8 cm con la modalità di acquisizione con scatti continui ad intervallo di tempo, nel caso in cui sono utilizzati i punti di appoggio topografici mentre sono pari a 6 cm gli scarti ottenuti nei voli realizzati con la modalità di acquisizione con scatto sui waypoint e con la modalità di acquisizione con scatti continui ad intervallo di tempo, nel caso in cui sono utilizzati i punti di appoggio GNSS.

Gli stessi grafici mostrano un comportamento comune per la totalità dei test compiuti con entrambi i software: sia nel caso dei punti di appoggio rilevati topograficamente sia nel caso dei punti di appoggio rilevati con GNSS. A parità di quota, i voli realizzati con modalità di acquisizione con scatto ad intervallo di tempo dimezzato, che consente di acquisire prese sovrabbondanti, restituiscono scarti maggiori se confrontati con gli scarti ottenuti nei voli realizzati con modalità di acquisizione con scatto ad intervallo di tempo e con scatto sui waypoint, nonostante l'uso di una configurazione con elevate percentuali di sovrapposizione tra immagini successive. Questo comportamento che non dipende dalla quota di acquisizione dei fotogrammi è semplicemente determinato dalla modalità di acquisizione dei fotogrammi.

Durante il percorso di acquisizione delle immagini, il velivolo segue un andamento che è fortemente influenzato dalla modalità di acquisizione. Con la modalità di acquisizione con scatto ad intervallo di tempo il velivolo segue una rotta regolare, ad una velocità più o meno costante, senza dover rallentare in prossimità dei waypoint e senza dover accelerare per riprendere la propria rotta; quando, invece, il piano di volo impone al mezzo di effettuare acquisizioni in corrispondenza dei waypoint, il velivolo non segue più la rotta in modo regolare ma è costretto a rallentare e addirittura fermarsi per stazionare sul punto e ad accelerare per dirigersi verso il punto successivo. Inoltre, quest'ultima modalità di



acquisizione crea non pochi problemi al velivolo che è costretto, punto per punto, a modificare la sua posizione per adattarsi a quella stabilita in fase di pianificazione del volo. Rapide frenate, rapide accelerazioni e ricerca precisa del punto per stabilizzare la posizione dello scatto possono agire a sfavore della corretta esecuzione del volo.



## Capitolo 9. Conclusioni

Il principale obiettivo di questa ricerca è stato quello di affrontare le problematiche connesse con le fasi di acquisizione e elaborazione dei dati ottenuti da SAPR con la finalità di dimostrare il grande potenziale di questi sistemi per la fotogrammetria aerea di prossimità. In particolare, i test condotti hanno permesso di definire delle procedure di rilievo fotogrammetrico da SAPR più produttive in termini di ottimizzazione dei tempi e affidabilità metrica del rilievo, e di analizzare le problematiche connesse all'impiego di software fotogrammetrici/computer vision per l'orientamento delle immagini. Ulteriori test hanno permesso di effettuare delle verifiche sull'affidabilità metrica di alcuni modelli 3D.

I risultati dei test realizzati consentono di confermare i vantaggi offerti dai SAPR per il rilievo del territorio nel campo della fotogrammetria aerea, i quali permettono di superare i limiti legati alle caratteristiche geometriche dell'oggetto e dell'area da rilevare.

I test condotti sul dataset del "Foro Romano" del sito archeologico di Seapinum hanno permesso di valutare le condizioni per il posizionamento e il numero dei punti di appoggio da utilizzare nella fase di orientamento del blocco fotogrammetrico. In particolare, le ridotte dimensioni del sito hanno permesso di verificare l'influenza del numero e della distribuzione dei punti di appoggio anche per aree di piccola estensione in cui basterebbero pochi punti (per esempio 4) per l'orientamento delle immagini.

In realtà, i test hanno mostrato come i dataset con un minore numero di GCP (4 in tutto) presentano residui maggiori rispetto alle configurazioni elaborate utilizzando un maggior numero GCP, uniformemente distribuiti sull'area da rilevare. Questi risultati confermano

la necessità di predisporre sull'area da sorvolare una serie di punti di appoggio, in numero sufficiente e omogeneamente distribuiti, che consentono di accrescere la stabilità del blocco.

Ulteriori test hanno permesso di stimare l'accuratezza nell'orientamento dei prodotti 3D in relazione all'accuratezza associata alle coordinate dei punti di appoggio e in relazione ai parametri utilizzati in fase di calibrazione della camera.

I test hanno dimostrato come l'accuratezza assegnata ai GCP influenza i residui in maniera differente in relazione al software utilizzato: in PhotoScan si registrano dei residui maggiori nei progetti effettuati con una accuratezza minore (pari a 2 cm) mentre, al contrario, in Pix4D si ottengono degli scarti superiori con una accuratezza maggiore (pari a 0,5 cm).

Inoltre, i test condotti hanno mostrato un comportamento comune in funzione dei parametri di calibrazione della camera sulla precisione dell'orientamento. In particolare, i progetti processati considerando nel calcolo dell'orientamento interno la totalità dei parametri di calibrazione della camera, mostrano degli scarti sempre inferiori rispetto ai progetti in cui i parametri relativi alla correzione delle deformazioni affini e tangenziali sono esclusi dal calcolo.

I test compiuti con il dataset di Villa Lampedusa ai Colli hanno permesso di analizzare le problematiche relative alle procedure di calibrazione delle camere fotografiche e in particolare, di verificare se nel caso di rilievi con immagini acquisite con differente distanza di presa, o nei casi in cui non è possibile bloccare la focale è possibile ottenere un orientamento più corretto realizzando calibrazioni differenti, una per ogni tipologia di presa o realizzando un progetto con una calibrazione unica per tutte le tipologie di dataset. Nonostante dal punto di vista fotogrammetrico la metodologia più corretta dal punto di vista concettuale è la prima, i test condotti hanno permesso di dimostrare come la realizzazione di un progetto con una calibrazione unica per tutte le tipologie di dataset restituisce valori degli scarti confrontabili con il primo.

I test condotti sul sito archeologico di Eraclea Minoa hanno permesso di analizzare in dettaglio le procedure di pianificazione del volo, influenzate dalla quota di volo, della velocità di spostamento del mezzo, dei ricoprimenti longitudinali e trasversali, della modalità di esecuzione della ripresa e delle caratteristiche dei sensori utilizzati.

In particolare, i test hanno permesso di valutare l'influenza della metodologia di rilievo dei punti di appoggio sulle accuratezza degli orientamenti e poiché i valori degli scarti quadratici medi tridimensionali ottenuti sulla stessa zona, con quote di volo differenti, hanno lo stesso ordine di grandezza, è stato possibile dimostrare come l'accuratezza dell'orientamento è indipendente dalla quota di volo ma fortemente vincolata dalla metodologia utilizzata per il rilievo dei punti di appoggio.

Ulteriori test hanno permesso di valutare a parità di quota di volo quale sia la condizione migliore per l'acquisizione delle immagini da SAPR. In particolare, i test hanno dimostrato come l'accuratezza degli orientamenti non è influenzata dalla quota di acquisizione dei fotogrammi ma dalla modalità di acquisizione dei fotogrammi. In particolare, i risultati ottenuti, confermano i test condotti da Eisenbeiss (2011) e Javier et al (2015) che dimostrano che il valore degli scarti nei test condotti con acquisizione continua ad intervallo di tempo regolare è minore rispetto agli scarti ottenuti nei test condotti con acquisizioni esclusivamente in corrispondenza dei waypoint e, inoltre, dimostrano come i voli realizzati con modalità di acquisizione con scatto ad intervallo di tempo dimezzato, che consente di acquisire prese sovrabbondanti, restituiscono scarti maggiori se confrontati con gli scarti ottenuti nei voli realizzati con modalità di acquisizione con scatto ad intervallo di tempo e con scatto sui waypoint.

I test compiuti hanno dimostrato anche come la modalità di acquisizione con scatto continuo ad intervallo di tempo influisce positivamente oltre che sulla durata del volo, anche sulla sua fluidità e quindi sulla qualità delle immagini acquisite, nonostante il numero dei fotogrammi acquisiti sia di gran lunga superiore rispetto alla modalità di acquisizione con scatto sui waypoint.



## Bibliografia

Abraham, S. and Hau, T., 1997. Towards autonomous highprecision calibration of digital cameras. Proceedings of SPIE Videometrics V, El-Hakim (Ed.), Vol. 3174, pp. 82-93.

Balletti C., Guerra F., Pilot L., 2006. Integrazione di tecnologie 3d multiscala per la conoscenza, l'interpretazione e la diffusione di un sito archeologico. X Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano. Università IUAV di Venezia.

Bay H., Tuytelaars T., Van Gool.,(2006) SURF: Speeded Robust Features. Presented to ECCV 2006. Gratz, Austria

Blistan P., Kovanič L., Zelizňaková V., Palková J., 2016. Using UAV photogrammetry to document rock outcrops. Acta Montanistica Slovaca, July 2016.

Brown, D.C., 1971 Close-range camera calibration. PE&RS, Vol. 37(8), pp.855-866.

Clarke, T.A. and Fryer, J.G., 1998. The development of camera calibration methods and models. The Photogrammetric Record, Vol. 16(91), pp. 51-66

Colomina I., Molina P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92, pp. 79-97.

Eisenbeiss H., 2004. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition, international workshop on "processing and visualization using high-resolution imagery". Pitsanulok, Thailand, November 2004.

Eisenbeiss H., Lambers K., Sauerbier M., Zhang L., 2005. Photogrammetric documentation of an archaeological site (palpa, peru) using an autonomous model helicopter, CIPA 2005 XX International Symposium, 26 September – 01 October, 2005, Torino, Italy.

Eisenbeiss H., 2008. The autonomous mini helicopter: a powerful platform for mobile mapping, The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information science, vol.xxxvii, part B1, Beijing 2008.

Eisenbeiss H., 2011. The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping, Wichmann/VDE Verlag. Belin & Offenbach.

Eisenbeiss H., 2011. UAV Photogrammetry, investigation of uav systems and flight modes for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record* 26(136), pp. 400–421.

Eisenbeiss H., UAV Photogrammetry.

F.-Javier Mesas-Carrascosa, J. Torres-Sanchez, I. Clavero-Rumbao, A. Garcia-Ferrer, J.M. Peña, I. Borra-Serrano, F. López-Granados, 2015. Flight Parameters for Generating Accurate Multispectral Orthomosaicks by UAV to support site-specific crop management. *Remote Sensing* 7, pp. 12793-12814.

Fraser, C.S., 1982. On the use of non-metric cameras in analytical non-metric Photogrammetry. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 24(5), pp. 156-166

Fryer, J., 1996. Camera Calibration. In ‘Close-range Photogrammetry and Machine Vision’. Atkinson (Ed.), Whittles Publishing, UK, pp.156-179.

Gini R., Passoni D., Pinto L., Sona G., Pulejo S., Baracani M., 2012. L'utilizzo di immagini acquisite da UAV per la documentazione e una miglior fruizione di beni culturali e paesaggistici. *Bollettino A.I.C.* nr. 144-145-146 / 2012.

Gruen A. and Beyer, H.A., 2001. System calibration through self-calibration. In ‘Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision’ Gruen and Huang (Eds.). *Springer Series in Information Sciences* 34, pp. 163-194.

Gruen A., 2012. Development and status of image matching in photogrammetry. *The Photogrammetric Record* 27(137): 36–57. Marzo 2012.

Horcher A., Visser R.J.M., 2004. Unmanned Aerial Vehicles: Applications for Natural Resource Management and Monitoring COFE (Council on Forest Engineering). Annual Meeting 2004, Proceedings (=http://www.cnr.vt.edu/ifo/VT%20Andy%20COFE%202004%20Drone%20Paper1.pdf 5 p.

Lingua A., Marenchino D., Nex F., 2009. Performance Analysis of the SIFT Operator for Automatic Feature Extraction and Matching in Photogrammetric Applications. *Sensors (Basel)*, 9(5): 3745–3766, Maggio 2009.



Lowe D.G., 1999. Object recognition from local scale-invariant features. Proceedings of International conference in Computer Vision. Curfu, Greece. 2004. pp. 1150–1157.

Lowe D., 2004. Distinctive image feature from scale-invariant. International Journal of Computer Vision 60(2). Pag. 91-110.

Journal of Archaeological Science, 38, pp. 697-710.

Kraus K., 1998. Fotogrammetria vol.1, Levrotto & Bella.

Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G., 2013. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the structure from motion approach on coastal environments. Remote sensing 5, pp. 6880-6898.

Mancini F., 2016. Rapporto sulla sessione “benchmark” - uso di immagini UAV per la ricostruzione 3d: esperienze condivise tra utenti; BOLLETTINO SIFET n.1 – anno 2016: Sezione Vita.

Markelin L., Honkavaara E., Hakala T., Suomalainen J., Peltoniemi J., 2010. Radiometric stability assessment of an airborne photogrammetric sensor in a test field, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65, pp. 409-421.

Miyatsuka Y., 1996. Archaeological real time photogrammetric system using digital still camera. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XVIII ISPRS Congress, Vienna, Austria, XXXI-B5, pp. 447-452.

Paparoditis N., Souchon J.-P., Martinoty G., Pierrot-Deseilligny M., 2006. High-end aerial digital cameras and their impact on the automation and quality of the production workflow. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 60, pp. 400-412.

Pena J.M., Torres-Sanchez J., Serrano-Perez A., De Castro A.I., Lopez-Granados F., 2015. Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (UAV) technology for weed seedling detection as affected by sensor resolution, Sensor 15, pp. 5609-5626.

Remondino F., Fraser F., 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25-27 September 2006.

Sauerbier M., Schrotter G., Eisenbeiss H., Lambers K., 2006. Multi-resolution image-based visualization of archaeological landscapes in Palpa (Peru), Campana, S. and Forte, M.: Campana, S. and Forte, M.. Oxford: Archaeopress, From Space To Place: Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology, pp.353-359.

Tsai, R.Y., 1987. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. IEEE Int. Journal Robotics and Automation, Vol. 3(4), pp. 323-344.

Tufarolo E., 2014. Auto-calibrazione di fotocamere digitali amatoriali applicata a tecniche di acquisizione multi-scala in fotogrammetria dei vicini. Bollettino AIC 152/2014

Wallace L., Lucieer A., Watson C., Arren Turner D., 2012. Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. Remote Sens 4, pp. 1519-1543.

Wang Q., Wu L., Chen S., Shu D., Xu Z., Li F., Wang R., 2014. Accuracy Evaluation of 3D Geometry from Low-Attitude UAV Images: A Case Study at Zijin Mine. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-4.

Wester-Ebbinghaus W., 1980. Aerial Photography by radio controlled model helicopter, The Photogrammetric Record, 10, 55, pp. 85-92.

Wolf P. R., Dewitt B.A., 2000. Elements of photogrammetry with application in GIS. McGraw – Hill, 2000.

Yasuda Y., Miyatsuka Y., 2001. Archaeological 3D visualization for Chinese fortress sites. GIS Development, <http://www.gisdevelopment.net/application/archaeology/general/archg0015.htm>, (accessed May 19 2009).

Yoo C. I., Oh T. S., 2016. Beach volume change using UAV photogrammetry songjung beach, korea. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B8.

Ziemann, H. and El-Hakim, S. F., 1983. On the definition of lens distortion reference data with odd-powered polynomials. *Canadian Surveyor*, 37(3): 135-143.

Zhang, Z., 2000. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 22(11), pp. 1330-1334

Zhang Y., 2008. Photogrammetric processing of low altitude image sequences by unmanned airship. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information science*, vol.xxxvii, part B5, Beijing 2008.

Zischinsky T., Dorffner L., Rottensteiner F., 2000. Application of a new model helicopter system in architectural photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Supplement B5, Amsterdam 2000.

## Normativa di riferimento

Circ. n. 328 AN/190 ICAO, 2011. Unmanned Aircrafts Systems (UAS), del 10 marzo 2011, [www.ICAO.int](http://www.ICAO.int).

Studio JAA-Eurocontrol «A concept for European Regulations for civil Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)», maggio 2004

Regolamento ENAC (versioni 2013, 2015 e 2016),

R.D.L. 24 Dicembre 1922 n.1878

Regolamento CE n.2042/2003

R.D. 11 gennaio 1925 n.356

Nuovo Codice della Navigazione (Approvato con R.D. 30 marzo 1942, n. 327

D.Lgs. 6 marzo 1948, n. 616

Legge 17 aprile 1956, n. 561

Regolamento (UE) n. 1178/2011

decreto legislativo 30 giugno 2003, n. 196 e successive modificazioni

circolare n.238 “Unmanned Aircraft System (UAS)”,

Dichiarazione di Riga emanata il 12 marzo del 2015

regolamento (CE) N. 216/2008

regolamento EASA “Introduction of a regulatory framework for the operation of drones”,

Dpr 133/2010

Documento A-NPA 16-2005, 2005. Policy for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) certification, [easa.europa.eu/](http://easa.europa.eu/).