

Fotogrammetria da UAV (Unmanned Aerial Vehicle): un'opportunità per il rilievo 3D multiscala

*Original*

Fotogrammetria da UAV (Unmanned Aerial Vehicle): un'opportunità per il rilievo 3D multiscala / Chiabrando, F., Lingua, A., Maschio, P., Rinaudo, F., Spanò, A. - In: Aquileia, l'insula tra Foro e porto fluviale. Lo scavo del Dipartimento di Studi Umanistici dell'Università di Trieste 1. La strada / Fontana F.. - STAMPA. - Trieste : EUT Edizioni università di Trieste, 2017. - ISBN 978-88-8303-608-8. - pp. 102-121

*Availability:*

This version is available at: 11583/2718505 since: 2018-11-25T11:54:06Z

*Publisher:*

EUT Edizioni università di Trieste

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

Filiberto CHIABRANDO, Andrea LINGUA, Paolo MASCHIO,  
Fulvio RINAUDO, Antonia SPANÒ

Fotogrammetria da UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*):  
un'opportunità per il rilievo 3D multiscala

Nell'estate 2011, le attività di rilievo metrico 3D per la documentazione dello scavo archeologico di via Gemina in Aquileia, concordate in collaborazione tra il gruppo di ricerca di Geomatica del Politecnico di Torino e il Dipartimento di Scienze dell'Antichità (ora DiSU) dell'Università degli Studi Trieste, ebbero una svolta nella direzione dell'applicazione di tecnologie innovative. Oltre l'introduzione di tecniche di scanning laser terrestri descritte nel capitolo precedente e integrate a quelle della fotogrammetria terrestre fino ad allora sperimentate, si aggiunse la fotogrammetria da mezzi aerei non convenzionali, che da quegli anni ha avuto un enorme sviluppo nelle applicazioni del rilevamento, anche e in misura consistente in ambito archeologico.

In seguito all'acquisizione del *know-how* inerente questa nuova tecnologia da parte del gruppo di Geomatica, e dopo essersi dotati della strumentazione e aver messo a punto il metodo studiando il funzionamento e i piani di volo sia in laboratorio che nei campi volo, l'esperienza di Aquileia nel 2011, applicata al tratto di cardine e alla *domus* allora in luce, rappresenta la prima esperienza applicativa reale, che ha avuto un esito estremamente positivo e che quindi ricordiamo a distanza di qualche anno con estremo interesse. Questo capitolo sarà quindi dedicato a ripercorrere l'esperienza e a presentare i risultati, che saranno accompagnati alla fine da alcune brevi considerazioni sull'evoluzione ulteriore oggi disponibile, cioè la ripresa di immagini oblique oltretché nadirali, che contribuiscono a rendere il metodo sempre più efficace per le applicazioni nel campo del patrimonio culturale.

*La recente introduzione della fotogrammetria da droni per il rilevamento*

I rilievi aerofotogrammetrici sono sempre stati altamente stimati in campo archeologico, in particolar modo per tutte quelle applicazioni di studio del territorio di una certa estensione, generalmente non attestate alle aree di scavo per via della scala di lettura e

restituzione troppo piccole per le esigenze del dettaglio richiesto dallo scavo archeologico. I voli aerofotogrammetrici ordinari inoltre, oltre al limite delle quote di sorvolo soprattutto delle zone abitate corrispondenti a svariate centinaia di metri, sono sempre risultati piuttosto costosi. Per questa ragione, sono stati sviluppati e verificati numerosi sistemi in grado di acquisire immagini digitali ad alta risoluzione per applicazioni fotogrammetriche a basso costo (palloni aerostatici, mongolfiere, aquiloni, aerei ed elicotteri ultraleggeri, *etc.*). In questo ambito, i mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo (*Unmanned Aerial Vehicle*, UAV) dotati di camere digitali ad alta risoluzione, si sono rivelati sistemi a basso costo più che adatti alle esigenze della grande scala di dettaglio del patrimonio culturale e rappresentano una delle tecniche in ulteriore rapido sviluppo.

Negli anni successivi al 2000, i primi sviluppi nel senso dell'automazione del processo fotogrammetrico avevano dato nuovo impulso al graduale passaggio dai metodi tradizionali di raccolta dei dati, a quelli più produttivi con punto di vista cosiddetto a volo d'uccello, come piattaforme non motorizzate tra le quali palloni aerostatici frenati<sup>1</sup>, aquiloni<sup>2</sup> o pali telescopici, sperimentati anche nello scavo della strada e della *domus* dei Putti danzanti di Aquileia<sup>3</sup>.

L'obiettivo comune di tali sistemi, e ancor più quelli definiti non convenzionali come gli UAVs, anche denominati RPVs (*Remote Piloted Vehicles*), è di ottenere immagini aeree a bassa quota utili sia come pura documentazione dello scavo sia come dati primari che, grazie all'utilizzo di tecniche tipiche della Geomatica come la fotogrammetria digitale, possono essere trasformati in prodotti metricamente attendibili, quali modelli del terreno e ortofoto, utili ed efficaci per una corretta rappresentazione e conoscenza dell'area investigata<sup>4</sup>.

Le possibilità offerte dalla fotogrammetria digitale ed il continuo sviluppo di camere digitali compatte ad altissima risoluzione, associate ad una sempre maggiore miniaturizzazione e sostenibilità in termini di costi della sensoristica ha permesso un sostanziale incremento e diffusione dei sistemi UAV utilizzati per la realizzazione di rilievi fotogrammetrici in campo archeologico, architettonico e ambientale.

Nati negli anni '50 per scopi militari, gli odierni UAV, caratterizzati da livelli di tecnologia e prestazioni sempre più elevate, vengono utilizzati sia in campo militare che civile per operazioni di ricognizione, controllo, misure atmosferiche, valutazione dei danni, mappatura dei rischi naturali e altri fenomeni per i quali non è possibile un accesso diretto al sito. Tali velivoli sono classificati sulla base di specifiche diverse; la classificazione più efficace e tuttora valida è stata redatta dall'*Unmanned Vehicle Systems In-*

<sup>1</sup> ALTAN *et alii* 2004; CELYKOIAN, ALTAN, TOZ 2003; FOTINOPOULOS 2004.

<sup>2</sup> ABER, ABER, PAVRI 2002; BITELLI, TINI, VITTUARI 2003; BOGACKI, MALKOWSKI, MISIEWICZ 2008.

<sup>3</sup> COSTAMAGNA *et alii* 2010.

<sup>4</sup> VERHOEVEN 2009.

*ternational Association* (International Unmanned Aerial System Community, 2008). Secondo questa classificazione, gli UAV sono suddivisi in tre categorie principali a seconda del loro possibile utilizzo: *Tactic*, *Strategic* e *Special Purpose*. A loro volta le tre categorie principali sono suddivise in sottocategorie, in base alle loro caratteristiche e prestazioni: capacità di volo, quota massima raggiungibile, peso, autonomia. I sistemi oggi utilizzati a titolo principale per il rilievo e la documentazione a grandissima scala possono essere considerati appartenenti alla categoria *Tactic* (sottocategorie micro e mini UAVs). Nella tabella 1 si riportano le caratteristiche dei sistemi che si riferiscono alla categoria *Tactic*.

Le esperienze eseguite a livello nazionale e internazionale negli anni 2000 e successivi sono state veramente ingenti; un campione scelto nell'ampia letteratura dei test con utilizzo di differenti approcci e piattaforme comprende quelli che prevedono l'utilizzo di motori elettrici o a combustione quali gli aeromodelli ad ala fissa<sup>5</sup> e i mini-elicotteri<sup>6</sup>.

**Tabella 1 – Classificazione degli UAVs *Tactic* a cura della *Unmanned Vehicle Systems International Association* (2008)**

Tactic UAVs Sottocategorie	Acronimo	Capacità di volo [Km]	Max quota di volo raggiungibile [m]	Autonomia [ore]	Peso [Kg]
Micro	μ (Micro)	< 10	250	1	< 5
Mini	Mini	< 10	150-300	< 2	150
Close Range	CR	10-30	3000	2-4	150
Short Range	SR	30-70	3000	3-6	200
Medium Range	MR	70-200	5000	6-10	1250
Medium Range Endurance	MRE	> 500	8000	10-18	1250
Low Altitude Deep Penetration	LADP	> 250	50-9000	0,5-1	350
Low Altitude Long Endurance	LALE	> 500	3000	> 24	< 30
Medium Altitude Long Endurance	MALE	> 500	14000	24-48	1500

<sup>5</sup> BENDEA *et alii* 2008, HAALA *et alii* 2011.

<sup>6</sup> EISENBEISS *et alii* 2005; PATIAS *et alii* 2007; REMONDINO *et alii* 2009, SKARLATOS, THEODORIDOU, GLABENAS 2004; TOKMAKIDIS, SKARLATOS 2000, CHIABRANDO *et alii* 2011.

Oggi le piattaforme possono essere suddivise secondo diversi tipi di classificazione, in base all'equipaggiamento, al tipo di volo, ai sensori, alla durata, alla distanza e quota di volo. A seguito anche delle esperienze e dei test eseguiti da parte del nostro gruppo<sup>7</sup>, due importanti categorie di velivoli, i droni ad ala fissa e i multi-rotori, offrono diverse prestazioni e risultati: un multi-rotore può volare a più bassa quota, con più stabilità, ma è privo di autonomia in termini di tempo di volo, al contrario un drone ad ala fissa vola fino a 50 minuti e può raggiungere una maggiore altezza, ma ha bisogno di un continuo controllo del volo. Si è ormai orientati sull'utilizzo di mini-elicotteri non a singola elica ma supportati da sistemi a quattro, sei e otto eliche (i cosiddetti quadri, esa o epta-cotteri), in grado di coniugare una migliore maneggevolezza e stabilità rispetto ai tradizionali con una sola elica; costi minori e una semplificazione nelle operazioni di controllo da parte dell'operatore addetto alla fase di volo e acquisizione sono ulteriori caratteristiche.

#### *L'UAV multi-rotore utilizzato e l'area di sorvolo*

Il sistema multi-rotore utilizzato consiste in un mezzo aereo a basso costo a decollo e atterraggio verticale (*Vertical Take Off and Landing*) denominato HexaKopter di produzione MikroKopter, venduto dalla casa madre in kit da assemblare. Come descritto dal nome, il velivolo è dotato di sei ali rotanti, pesa 1.2 kg ca. comprese le batterie e permette di sollevare un carico (*payload*) massimo di 1 kg.

La dotazione completa prevede alcune schede di controllo e un insieme di sensori di navigazione come indicato nello schema di fig. 3. In particolare, sono comprese le seguenti parti:

- sei motori *Brushless* dotati di eliche da 10" di lunghezza;
- sei schede *Brushless Controls* (BCs) che regolano la velocità di rotazione dei motori;
- una scheda *Flight Control* (FC) che monitora le caratteristiche del volo e la relativa comunicazione dal velivolo a terra (i dati registrati dal giroscopio triassiale, l'accelerometro triassiale, l'altimetro e la bussola digitale);
- un radiocomando permette il pilotaggio del mezzo ad un operatore addestrato come la posizione bloccata in volo (*hold*), ritorno a casa (*return to home*), navigazione verso punti prestabiliti (*waypoint*), ausilio al radio comando manuale mediante la modalità *carefree*;
- un *Navi Control* (NC) permette la trasmissione in tempo reale dei dati di traiettoria e gli altri parametri di telemetria;

---

<sup>7</sup> CHIABRANDO *et alii* c.s.

- un ricevitore GPS (MKGPS) dotato di antenna leggera integrata nella scheda;
- un sensore MK3MAG dotato di un magnetometro triassiale che permette di definire l'assetto del velivolo;
- uno strumento di collegamento seriale *wireless* bidirezionale utilizzato per la gestione delle operazioni durante l'esecuzione del volo;
- un PC che costituisce la stazione di controllo e permette di effettuare tutte le regolazioni necessarie per la corretta configurazione del sistema.

La fig. 3 mostra il sistema evidenziando alcuni dettagli tra cui la camera digitale utilizzata per finalità di presa fotogrammetrica e video. In questa applicazione è stata utilizzata la camera Sony Nex 5 con sensore CMOS di formato 23,5 x 15,6 mm (dimensioni APS-C), pixel di lato pari a 5  $\mu\text{m}$  per un totale di 14 Mpixel, ottica *pancake* con focale 16 mm. Durante il volo, lo scatto può essere controllato in remoto secondo tre modalità di cui due ad azionamento manuale mediante radiocomando (scatto singolo o sequenza temporizzata regolato dalla FC), la terza automatica con scatto in corrispondenza di un evento definito in fase di pianificazione del volo, per esempio il passaggio da *waypoint* regolato dalla NC.

La camera digitale è montata su un sostegno servo-assistito che permette rotazioni controllate elettronicamente lungo due direzioni (attorno agli assi  $\zeta$  e  $\eta$  disponendo la camera ad asse verticale). I movimenti del sostegno (e quindi della camera) sono regolabili manualmente mediante apposito controllo sul radiocomando o, automaticamente (dalla FC) compensando le rotazioni della camera durante il volo per avere l'asse sempre con la stessa direzione (per esempio sempre verticale).

A completamento del sistema è stata installata una telecamera a bassa risoluzione, visibile in fig. 4d con trasmissione analogica in tempo reale a 2.4 MHz. Il segnale viene ricevuto a terra, convertito mediante apposita strumentazione USB e memorizzato dalla stazione di controllo in formato video (AVI).

#### *L'acquisizione dei dati (fotogrammetrici e topografici)*

L'acquisizione delle informazioni fotogrammetriche è stata pianificata inizialmente in modo del tutto manuale a partire dalla planimetria dell'area di scavo e controllando la geometria delle aree da riprendere rispetto ai ricoprimenti dei fotogrammi (fig. 5). Sin dal principio si era previsto un volo e la conseguente realizzazione di modelli digitali di elevazione (DEM) e ortofoto a maggiore scala, quindi da volo a quota più bassa, per la strada, e uno complessivo a scala leggermente minore per l'intero scavo, comprendente anche l'intera *domus* fino ad allora scavata.

Per la pianificazione operativa si era proceduto sfruttando una ortofoto della zona derivata dal satellite Quickbird (fig. 6a) impostando i parametri di scala dei due voli a differenti quote. Il volo basso, sviluppato sui resti del cardine, a est della zona di scavo, ha un'altezza media di volo pari a 10 m che comporta un abbracciamento dei fotogrammi di 10 x 15 m. Il ricoprimento longitudinale è stato fissato al 75% garantendo una base di presa di 4 m ca., mentre il ricoprimento trasversale è stato fissato al 30% per assorbire eventuali errori di inseguimento delle rotte fissate. In totale si è prevista l'acquisizione di trentasei fotogrammi.

Il volo alto ricopre l'intera area interessata dallo scavo con un'altezza media di volo pari a 18 m che comporta un abbracciamento dei fotogrammi di 18 x 27 m. Il ricoprimento longitudinale è stato fissato al 75% garantendo una base di presa di 7.50 m ca., mentre il ricoprimento trasversale è stato fissato al 40% ritenendo, alla quota di volo prevista, una maggior possibilità di instabilità del velivolo rispetto al volo basso. In totale si è prevista l'acquisizione di sessanta fotogrammi.

Dal progetto del volo sono state estratte le coordinate dei punti di inizio e fine strisciata (rappresentati rispettivamente da una croce e da una stella in fig. 6a), in seguito inserite nel software di controllo della stazione di terra e inviate dalla memoria locale all'esacottero mediante la connessione wireless Xbee. In seguito al decollo eseguito manualmente, per ogni blocco, l'operatore ha fissato la quota di progetto con l'altimetro barometrico e avviato il volo autonomo dell'esacottero che ha seguito il percorso assegnatogli. Anche la fase di atterraggio è stata svolta manualmente.

La fig. 6b mostra le traiettorie effettivamente seguite dal mezzo (in rosso il volo alto, in arancione il volo basso) che evidenziano le difficoltà nell'inseguimento fedele delle rotte di progetto che si sono verificate a causa della presenza di un vento a raffiche durante l'esecuzione del volo.

Prima della realizzazione dei voli, per poter eseguire correttamente le operazioni di triangolazione aerea e per avere un riscontro sulla qualità dei dati acquisiti sono stati posizionati e misurati su tutta l'area una serie di target da utilizzare sia come punti di appoggio (GCPs – *Ground Control Points*) sia come punti di controllo (CPs – *Control Points*). Le operazioni di misura sono state eseguite con l'utilizzo di una Stazione Totale nel sistema di coordinate georiferito e materializzato sull'area dello scavo di via Gemina sin dal 2009.

Le tendenze della fotogrammetria digitale contemporanea al volo prevedono l'estrazione automatica dei punti di legame nei diversi fotogrammi attraverso l'utilizzo delle tecniche di autocorrelazione di immagini e il calcolo degli orientamenti esterni dei fotogrammi con gli algoritmi propri della triangolazione a stelle proiettive. Il congruo numero di punti noti è utile per eliminare gli effetti dovuti alla labilità del sistema riso-

lutivo, quindi una attenta fase di appoggio (misura topografica di una serie di punti ben visibili sui fotogrammi) è ritenuta sempre necessaria così come è buona norma prevedere sempre di avere a disposizione una serie di punti di controllo omogeneamente distribuiti all'interno del blocco per la verifica a posteriori dell'accuratezza dei risultati ottenuti. Questi punti di controllo sono poi riutilizzabili per le verifiche di accuratezza finale dei prodotti del rilievo che a partire dal blocco orientato si possono generare.

### *L'elaborazione dei dati fotogrammetrici*

Il confronto tra la fig. 6a e la fig. 6b mostra che le traiettorie seguite dal drone durante il volo non hanno rispettato in modo sensibile le specifiche di progetto. Inoltre, come si evince chiaramente dalla fig. 9, alcune immagini impiegate non hanno ricoprimenti costanti e presentano sbandamenti differenti dovuti per la maggior parte all'influenza negativa delle raffiche di vento che si sono manifestate durante le operazioni di ripresa. Considerato il peso limitato dell'esacottero utilizzato questi fenomeni sono da considerarsi 'normali' in condizioni operative reali.

Tuttavia grazie all'estrema flessibilità dell'algoritmo di triangolazione aerea implementato nel software di fotogrammetria utilizzato per l'elaborazione dei dati (LPS – *Leica Photogrammetric Suite*) è stato possibile orientare con successo le sessantadue immagini acquisite. Per le operazioni di orientamento sono stati utilizzati 30 GCPs e 15 CPs; inoltre per migliorare il concatenamento tra i vari fotogrammi impiegati sono stati individuati automaticamente circa milleduecento punti di legame (TPs – *Tie Point*). La fig. 10 mostra il grafico del blocco fotogrammetrico a valle della triangolazione aerea e i risultati di precisione e accuratezza ottenuti.

### *Generazione dell'ortofoto e utilizzi coordinati allo studio archeologico*

Alla luce dei risultati ottenuti è stato possibile procedere sia alla generazione del modello digitale di superficie (DSM), con le procedure previste dal *software* LPS, sia alla generazione delle ortoproiezioni dei singoli fotogrammi e alla successiva mosaicatura delle stesse in un'unica ortofoto dell'intera *domus* (fig. 11). In funzione delle prime analisi eseguite su alcuni punti di controllo non utilizzati per il processo fotogrammetrico, essendo gli scarti inferiori a  $\pm 3$  cm ca., è possibile affermare che l'ortofoto realizzata rispetta le tolleranze tipiche di una rappresentazione a scala 1:200.

Le ortofoto della *domus* e della strada sono state calcolate impostando un *Ground Sampling Distance* (dimensione del pixel a terra) pari rispettivamente a mezzo centimetro e a 2 mm; entrambe consentono cioè una eccellente possibilità di lettura dei particolari archeologici ritratti e ortoproiettati, quindi misurabili sul piano orizzontale come dimostra lo stralcio riportato nella fig. 12.

La possibilità di disporre di un'immagine ad altissima risoluzione sovrapponibile con la restituzione del disegno di scavo, di poter visualizzare porzioni a elevati livelli di zoom, di integrare ulteriori ortofoto di origine fotogrammetrica derivati dai precedenti test di riprese da palo telescopico<sup>8</sup> si inserisce pienamente nell'ottica della documentazione multi-scala e multi-precisione che può supportare le analisi archeologiche dello scavo, per esempio consentendo di svolgere osservazioni degli elementi e materiali anche in laboratorio.

Un prodotto in grado di coniugare l'aspetto bidimensionale tipico dell'ortofoto alla terza dimensione tipica del modello altimetrico è l'Ortofoto Solida di Precisione (OSP)<sup>9</sup>. L'OSP è un prodotto raster che associa ad ogni pixel di una matrice georiferita, sia le consuete informazioni cromatiche (ed eventualmente radiometriche multi o iperspettrali) sia il valore di quota. È possibile quindi osservare un'immagine 2D, l'ortofoto, e contemporaneamente navigare o ottenere informazioni altimetriche relative ai pixel interrogati. Data l'intrinseca semplicità dei dati raster, una OSP può essere visualizzata e interrogata mediante un opportuno visualizzatore, sviluppato in Visual Fortran con le routine grafiche GINO v. 7.5 molto facile ed intuitivo<sup>10</sup>. È possibile leggere le coordinate cartografiche o nel sistema di riferimento prescelto per ogni posizione del cursore all'interno della OSP, effettuare le classiche operazioni di visualizzazione (pan, zoom), realizzare misurazioni di distanze, angoli, aree e volumi semplici, definire piani e sezioni del modello denso. Numerosi piani così definiti possono essere utilizzati per calcolare volumi complessi come intersezione con la superficie del modello altimetrico.

La semplicità del software lo rende di immediato utilizzo, senza specifico addestramento per l'utente e ne permette una implementazione su tablet PC che potrebbero essere utili per esempio in applicazioni sul campo.

Come evidenziato nelle diverse esperienze svolte a livello nazionale ed internazionale, nonché in quella di Aquileia, i sistemi non convenzionali per la realizzazione di prodotti cartografici a grandissima scala consentono di ottenere risultati metricamente corretti e di grande interesse per la documentazione multi-scala dello scavo archeologico. Se alcuni anni fa il bilancio a valle del test poteva prefigurare promettenti prospettive applica-

<sup>8</sup> SPANÒ *et alii* 2012, COSTAMAGNA *et alii* 2010.

<sup>9</sup> DEQUAL, LINGUA 2003.

<sup>10</sup> LINGUA, AGOSTO, DEL BIANCO 2007.

tive, oggi si può riferire che lo sviluppo e la continua miniaturizzazione della tecnologia consentono di poter disporre di sistemi sempre più flessibili e di ridotte dimensioni, fino a quelli sotto i 300g che consentono voli non pericolosi e a quote particolarmente basse tanto da non essere sottoposti alle restrizioni della normativa ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile) in materia di volo.

Un'altra novità particolarmente indagata e sperimentata negli ultimi anni è la possibilità di rendere particolarmente flessibile la geometria di ripresa dei sistemi, acquisendo immagini non più solo nadirali ma con inclinazioni di diversa entità (generalmente comprese tra 30° o 45°) che consentono di sviluppare di gran lunga la possibilità di riprendere e rilevare correttamente anche i fronti degli edifici o in generale lo sviluppo in elevato delle strutture, sicuramente non adeguatamente documentabile dalle sole riprese nadirali<sup>11</sup>.

La relativa facilità di uso, il basso costo e l'automazione dei processi di elaborazione necessari per la generazione di ortofoto e modelli di superficie, consente di prefigurare questa tecnica come una possibilità efficiente e concreta per un aggiornamento consueto e facilmente continuo della documentazione dello scavo archeologico.

---

<sup>11</sup> TEPPATI LOSÈ *et alii* 2017.

## ILLUSTRAZIONI

- Fig. 1 a. Ultime fasi di preparazione prima del decollo; b. il gruppo di allievi e docenti che assiste al volo del multi-rotore avendo liberato l'area di scavo (Politecnico di Torino).
- Fig. 2 I droni impiegati con sempre maggiore frequenza per i progetti applicati ai beni culturali da parte del gruppo del Politecnico di Torino. a. L'Hexakopter della Mikrokopter ai bordi dello scavo di via Gemina; b. il drone ad ala fissa Ebee della Sensefly (Politecnico di Torino).
- Fig. 3 Schema dei componenti del sistema Hexakopter di Mikrokopter (Politecnico di Torino).
- Fig. 4 La camera digitale Sony NEX-5. a. l'antenna del ricevitore GPS Ublox; b. l'elettronica di controllo; c. dal basso verso l'alto: BL, FC, NC, MK3Mag, MKGPS; d. l'Hexakopter di Mikrokopter (Politecnico di Torino).
- Fig. 5 Prima pianificazione dei voli, con quantificazione dei ricoprimenti e del numero di strisciate, operato sulla planimetria di scavo (Politecnico di Torino).
- Fig. 6 a. La pianificazione del volo svolta su ortofoto da satellite (Quickbird); b. la traiettoria effettiva dell'esacottero in ambiente Google Earth, in rosso il volo alto in arancione il volo basso (Politecnico di Torino).
- Fig. 7 L'inserimento del planning all'interno della stazione di terra per il controllo del volo dell'esacottero per il volo basso (a) e il volo alto (b) (Politecnico di Torino).
- Fig. 8 a. Stazione di controllo a terra allestita ai bordi dello scavo; b. misura dei punti di controllo mediante tecnica topografica tradizionale; c. inserimento di target a terra per il controllo dell'orientamento dei blocchi di fotogrammi (Politecnico di Torino).
- Fig. 9 a. immagini relative al blocco fotogrammetrico acquisito durante il volo alto. Si notano le sovrapposizioni non costanti ed alcune rotazioni delle immagini; b. Esempio di una porzione di strisciata (3 fotogrammi) acquisita nel corso del volo a quota minore sull'area delle botteghe affacciate sul cardine, che non presentano differenze di scala e sbandamenti (Politecnico di Torino).
- Fig. 10 Blocco fotogrammetrico orientato (sinistra) e deviazione standard sui GCPs e CPs del blocco fotogrammetrico orientato ( $\sigma_0 = 10$  mm) (Politecnico di Torino).
- Fig. 11 a. Ortofoto della *domus* dei Putti danzanti (scala finale 1:200); b. ortofoto finale della strada (scala finale compresa tra 1:100 e 1:200. Immagini non in scala) (Politecnico di Torino).
- Fig. 12 Stralcio dall'ortofoto della strada, nel quale è visibile una linea di mosaicatura di due fotogrammi successivi, che presentano valori radiometrici e di esposizione del fotogramma leggermente diversi, ma buona accuratezza metrica (Politecnico di Torino).
- Fig. 13 Proiezione delle due ortofoto, sul modello lidar complessivo dello scavo e sovrapposizione della pianta ricostruttiva (Politecnico di Torino).
- Fig. 14 Il concetto dell'ortofoto solida di precisione (sinistra); visualizzatore della stessa con alcuni esempi di misurazione, definizione di piani e sezioni, calcolo di volumi complessi (destra) (Politecnico di Torino).



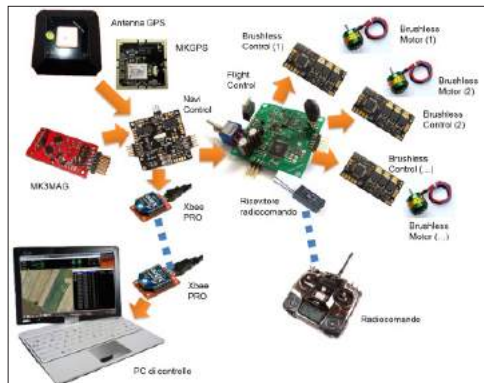
1a

1b



2a

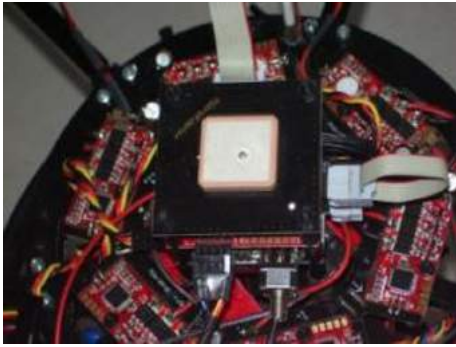
2b



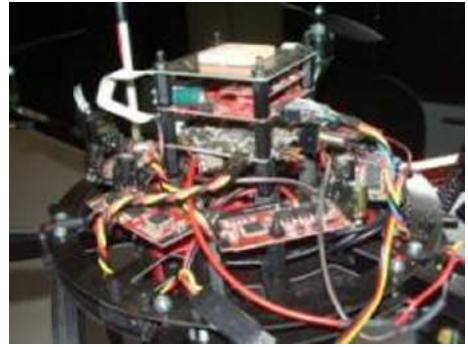
3



4a



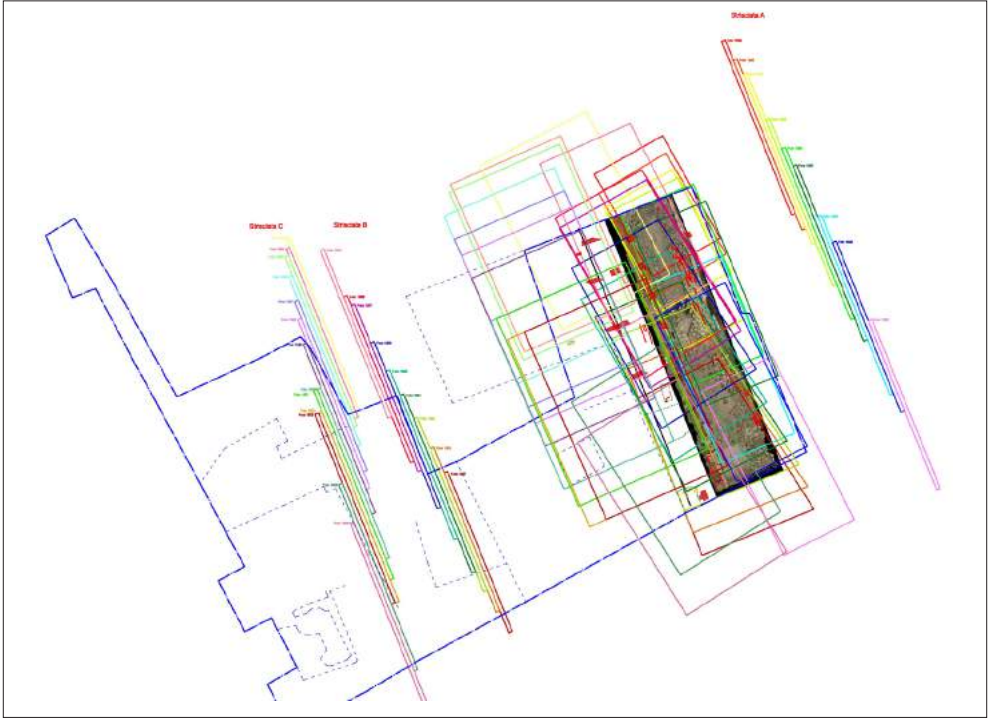
4b



4c



4d



5



6a



6b



7a



7b



8a



8b



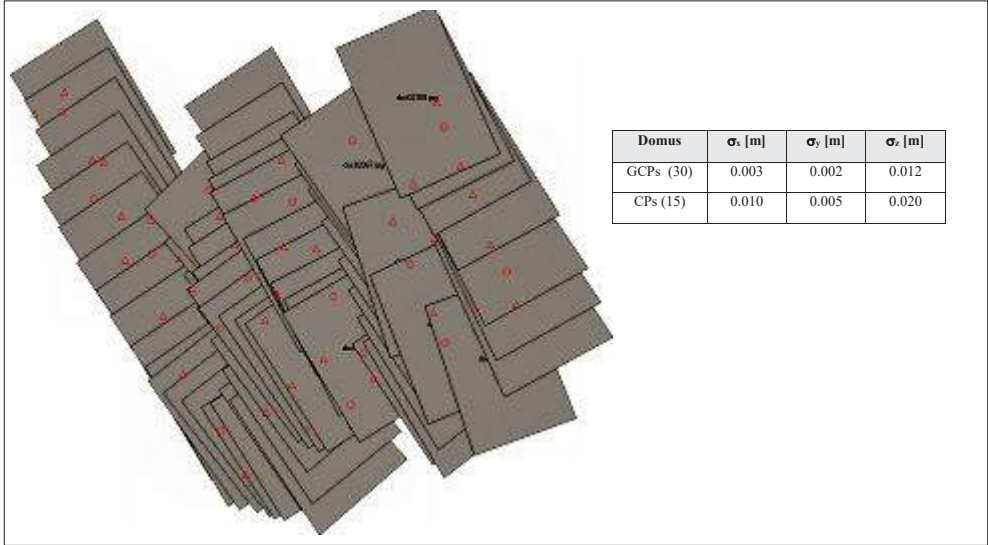
8c



9a

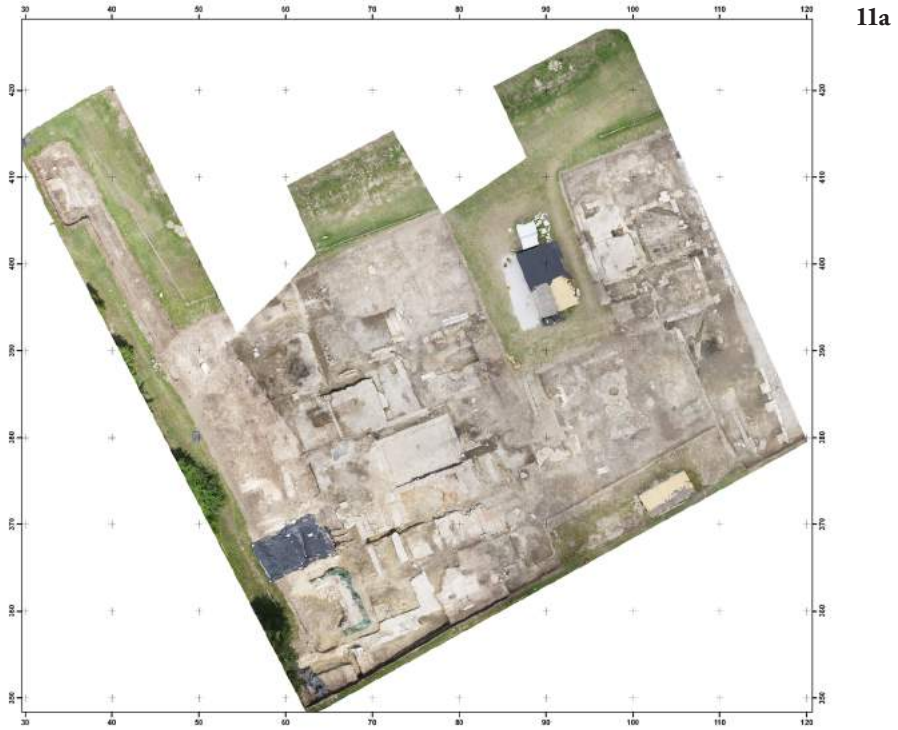


9b



10







12



13

