

## Un'applicazione al settore ambientale di fotogrammetria con piattaforma UAV

Maria Grazia D'Urso (\*), Antonella Gargiulo (\*\*), Andrea Rotondi (\*\*\*), Roberto Bracaglia (\*\*\*\*)

(\*) DICeM –Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale

Via G. Di Biasio, 43 – 03043 Cassino (FR); fax:089 2580897; durso@unicas.it (10 pt)

(\*\*) Tirocinante, DICeM –Via G. Di Biasio, 43 – 03043 Cassino (FR); antonella\_gar@hotmail.it

(\*\*\*) Dottorando di ricerca, DICeM –Via G. Di Biasio, 43 – 03043 Cassino (FR); a.rotondi@unicas.it

(\*\*\*\*) GEORES S.r.l. Piazzale De Matthaeis, 41, 03100 Frosinone, roberto.bracaglia@geores.it

### Sommario

Lo scopo del lavoro è quello di presentare i primi risultati di un'attività di rilevamento mediante piattaforme aeree a pilotaggio remoto per la documentazione e il monitoraggio di una cava attiva, da cui si estrae materiale calcareo, sita in località Alatri nel Lazio meridionale.

Dall'elaborazione delle immagini si ottengono prodotti geomatici con proprietà metriche che permettono una precisa analisi dimensionale della cava e il suo monitoraggio.

Dalle immagini acquisite si è passati all'informazione cartografica grazie alla elaborazione mediante Agisoft PhotoScan che ha permesso di generare ortofoto ad alta risoluzione georeferenziate (fino a 4 cm con precisione GCP) e DEM eccezionalmente dettagliati di texture e mesh poligonali. Il flusso di lavoro solo in parte automatizzato ha consentito di trattare un totale di 156 immagini e produrre dati fotogrammetrici di apprezzabile qualità.

### Abstract

Aim of this paper is to present the first results of a surveying with aerial platforms of UAV, Unmanned Aerial Vehicles, for illustrating and monitoring an active quarry, sited in a place denominated Alatri, in the Southern Lazio, from which, actually, calcareous material is mined. By elaborated images are carried out geomatic products with metric properties which allow a precise dimensional analysis of the quarry and its monitoring. From acquired images one is passed to cartographic information through the elaboration with software Agisoft PhotoScan that has allowed to generate high resolution orthophotos, georeferenced (up to 4 centimeters of precision on GCP) and DEM remarkably detailed in the texture and polygonal meshes. The flow of the work, only partially automated, has allowed to deal an amount of a number of 156 images and to produce photogrammetric data of significant quality.

### Introduzione

I sistemi aerei a pilotaggio remoto (SAPR) anche noti con il nome di UAV - Unmanned Aerial Vehicles - costituiscono uno dei temi centrali della ricerca nel campo delle tecniche di rilievo short-e close-range e la loro applicazione in ambito civile sta avendo una vasta diffusione, in svariati settori quali: agricoltura, silvicoltura, archeologia ed architettura, ambiente, gestione delle emergenze, monitoraggio ambientale.

L'applicazione della tecnica fotogrammetrica con UAV rappresenta un'appropriata e efficace soluzione se si tiene conto della disponibilità e frequenza richiesta nello sfruttamento dei siti di estrazione. D'altronde il calcolo volumetrico di un sito di deposito è essenziale per la stima del materiale da estrarre, del suo valore economico nonché per il controllo delle superfici da ripristinare nelle fasi successive all'estrazione.

Considerata la conformazione estesa della cava in oggetto e le caratteristiche morfologiche dell'intorno, è stato utilizzato un drone ad ala fissa (eBee- SenseFly) sul quale sono state installate una fotocamera digitale (Canon IXUS 127 HS), una piattaforma IMU per l'orientamento interno e un'antenna GPS. L'inserimento di GCP misurati con una coppia di ricevitori satellitari GNSS a doppia frequenza ha consentito la validazione dei prodotti del volo.

### Inquadramento topografico e geologico dell'area

La cava oggetto di studio è destinata al prelievo di inerti calcarei per l'edilizia ed è sita a SE del centro storico del comune di Alatri, individuata nella tavoletta IGM in scala 1:25000 Foglio 151 II S.E Alatri (cfr. Figura 1). Il territorio comunale di Alatri si estende per circa 80 Km<sup>2</sup> lungo le propaggini meridionali dei Monti Ernici, che costituiscono il confine naturale del Lazio con l'Abruzzo. Esso si inserisce tra i territori comunali di Frosinone a sud, Veroli ad est, Ferentino ad ovest, Trivigliano, Vico nel Lazio e Collepardo a nord. Il vasto territorio alatrense, subpianeggiante a sud, dove cede il passo all'ampia depressione della Media Valle Latina, è montuoso e/o collinare per la restante parte, comprende nella sua estensione gran parte del bacino idrografico del Fiume Cosa, affluente del Sacco che scorre ad est del centro cittadino in direzione media nord-sud. A scala locale, sotto l'aspetto geologico, il territorio di Alatri si inserisce all'interno del comprensorio pre-ernico dell'Appennino centro meridionale, e costituisce un'estesa fascia di raccordo con l'area depressionaria della Media Valle Latina.



Figura 1 - Stralcio Tavoletta IGM 1:25000 Foglio n° 151. In rosso si inquadra l'area.

### Realizzazione della rete topografica di appoggio

Una rete topografica caratterizzata da una precisione centimetrica è stata installata per il rilevamento della cava e dell'area limitrofa. La determinazione delle coordinate dei punti di controllo a terra, GCP ( Ground Control Point) è stata eseguita con una coppia di ricevitori satellitari GNSS (Global Navigation Satellite System) geodetici RTK (Real Time Kinematics) a doppia frequenza, in modalità Post-Processing (DGPS) per garantire sia una migliore precisione sia il controllo delle misure.

Il riattacco al sistema di riferimento nazionale è stato eseguito attraverso uno stazionamento differenziale statico dei ricevitori GPS della durata di 20 minuti sul vertice trigonometrico "151076 Alatri" (Lat. 41° 42' 48.51996" N; Long. 13° 21' 38.72073" E; H=295.18 mt s.l.m.) in modo da orientare con precisione il rilievo GPS.

Nell'applicazione qui illustrata la rete di appoggio è costituita da 14 capisaldi materializzati con target infissi nel terreno e visibili, posizionati lungo la strada che costeggia l'intero perimetro della cava e all'interno del corpo della stessa, in corrispondenza di punti di estrazione del materiale.



Figura 2 - Rete di inquadramento a terra.

I punti sono stati ubicati in luoghi facilmente accessibili e su manufatti già presenti in loco aventi dimensione, consistenza e destinazione di uso tali da garantire un'adeguata stabilità nel tempo. Nella scelta della posizione, inoltre, si è tenuto conto della stazionabilità in modo da consentire il centramento forzato, oltre all'assenza di ostacoli per la ricezione del segnale dai satelliti (Figura 2).

**Acquisizione immagini: strumenti e metodi**

Il sistema di acquisizione delle immagini utilizzato è costituito da una componente hardware e da una componente software. La componente hardware è composta da un drone UAV eBee, completamente autonomo sul quale è installata una fotocamera digitale Canon IXUS 127 HS (cfr. Tabella 3 e Tabella 4); la componente software è costituita da una componente software costituita da un primo software di pianificazione, gestione e georeferenziazione immagini, eMotion2 e da un secondo software di elaborazione, Agisoft Photo Scan, per la generazione di DEM, DTM, Pointcloud, Mesh, Contour Lines e Ortofoto.

	Caratteristiche principali di eBee	
	Peso al decollo	630 gr
	Ampiezza alare	96 cm
	Autonomia	45 min per batteria
	Resistenza al vento	Fino a 45 km/h
	Velocità di crociera	36-57 km/h
	Portata radio	fino a 3 km
	Area coperta	0.75 km <sup>2</sup> per volo ( fino a 8 voli giornalieri)
	Atterraggio autonomo	Circolare o lineare
	Risoluzione a terra	3-30 cm/px (dipendente dall'altezza di volo)

Tabella 3

Caratteristiche principali della fotocamera				
Camera model	Resolution	Focal Length	Pixel size	Sensor dim.
Canon IXUS 127 HS	4608 x 3456	4.3 mm	1.33853 x 1.33853 μm	6.17 x 4.63 mm

Tabella 4

Emotion2 è un software di recente generazione che permette di pianificare, simulare e gestire missioni di volo progettate semplicemente definendo l'area mappata.

Attraverso una specifica finestra di selezione, anche importabile da Google Earth, è possibile definire l'area che si vuole rilevare. In funzione del ricoprimento, della sovrapposizione delle immagini e dell'altezza di volo l'area in questione viene acquisita in una sequenza di strisciate progettate nel piano di volo i cui parametri sono riportati nella Tabella 5.

Parametri di volo							
$\alpha$	H Flight	GSD	Overlap	Sidelap	B	N° di stisciate	N° di immagini
71°	130 m	4 cm	70%	70%	65 m	18	156

Tabella 5

Il volo fotogrammetrico è stato effettuato in condizioni meteorologiche perfette (assenza di nubi, foschia, ecc.) e negli orari centrali della giornata, per sfruttare la massima illuminazione disponibile e per minimizzare l'influenza delle ombre al suolo.

### Georeferenziazione dei modelli e analisi dei risultati

Il rilevamento della cava situata in località Monte Sant' Angelo, a SE del centro storico di Alatri, in provincia di Frosinone, nel Lazio meridionale è stato eseguito mediante il drone ad ala planante UAV eBee in data 12/04/2013 alle ore 12 circa. Il centro estrattivo destinato al prelievo di inerti calcarei per l'edilizia è costituito da un fronte di altezza massima di circa 50 m che si sviluppa su un' area di circa 6 ettari. In condizioni meteorologiche ottimali e con una velocità del vento del valore di circa 10m/s il volo è stato pianificato ed eseguito ad una quota di 130 metri su un'area di circa 36 ettari ed ha consentito di acquisire circa 200 immagini georeferenziate. Il primo step della georeferenziazione dei modelli è consistito in un processo di geotag (effettuato mediante il software di pianificazione Emotion2) che ha permesso di ricollocare geograficamente le varie immagini attraverso le informazioni GPS-IMU registrate durante il volo.

Attraverso il software di pianificazione del volo, come è noto, è stato possibile creare:

- geotag delle immagini;
- geoinfo con relative informazioni geografiche ed angoli di assetto;
- file kml per verificare come l'apparecchio si è comportato in volo;
- file di interfaccia per integrazione con altri software di elaborazione.

L'elaborazione mediante Agisoft Photo Scan, un software per l'elaborazione di immagini acquisite da droni plananti e a rotore relative a vaste coperture areali del territorio, ha permesso di generare ortofoto ad alta risoluzione georeferenziate (fino a 4 cm con precisione GCP) e DEM ( Digital Elevation Model) eccezionalmente dettagliati di *texture* e *mesh* poligonali. Il flusso di lavoro in buona parte automatizzato ha elaborato in totale 156 immagini e il processo di elaborazione immagini, una volta avviato, è stato suddiviso in cinque passaggi:

- 1) importazione delle immagini;
- 2) individuazione di punti chiaramente riconoscibili nei vari fotogrammi;
- 3) correlazione tra i punti omologhi durante la fase di *matching* utile a localizzare i vari punti di legame "*tie Points*".
- 4) processamento *bundle-adjustment*, un procedimento che, una volta individuati i *tie points* che legano i vari fotogrammi, porta alla generazione dei parametri di orientamento esterno necessari per la fase di stereo-restituzione dei singoli fotogrammi.
- 5) generazione di un formato raster di anteprima a bassa risoluzione.

Successivamente sono stati inseriti i *markers*, ovvero i GCPs rilevati, posizionati lungo la strada che costeggia l'intero perimetro della cava e all'interno del corpo cava, su materiale geologico classificato come calcare granulare bianco giallastro. Questa fase ha permesso di geo-referenziare il

modello e ridurre gli errori delle coordinate X,Y,Z, come illustrato nella Tabella 6. Quindi, è stato rilanciato il processo di *bundle-adjustment* impostando parametri di alta definizione: le impostazioni di qualità più elevate permettono di ottenere informazioni dettagliate e una geometria più precisa.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
101	0.002728	-0.008869	0.009043	0.012957	4	0.119229
102	-0.060732	-0.093119	-0.083172	0.138842	6	0.140892
103	-0.052367	0.058390	-0.188142	0.203836	6	0.171271
105	0.018342	-0.040825	0.093229	0.103416	11	0.385202
106	0.018023	0.074300	-0.066925	0.101608	17	0.241253
107	0.030755	-0.048029	-0.363148	0.367599	18	0.418336
108	0.006234	-0.100641	-0.111770	0.150532	18	0.362229
109	0.022001	-0.099547	-0.100091	0.142870	17	1.061324
110	0.003953	0.541712	0.211783	0.581652	15	1.631892
111	0.016681	0.127091	0.490157	0.142870	20	1.645927
112	0.031873	-0.131045	0.296052	0.325324	18	0.679931
113	0.015445	-0.159930	-0.401925	0.432851	14	0.920052
114	-0.020959	-0.034568	0.152194	0.157471	13	0.324424
115	-0.031976	-0.084142	0.050453	0.103188	13	0.666215
<b>Total</b>	<b>0.028758</b>	<b>0.169520</b>	<b>0.234515</b>	<b>0.290794</b>	<b>190</b>	<b>0.885772</b>

Tabella 6 - Residui dei punti di controllo.

Il software Agisoft PhotoScan, dopo l’inserimento dei GCP, ha elaborato 156 immagini, generando ortofoto ad alta risoluzione georeferenziate fino a 4 cm di precisione.

A causa di alcuni fattori come la scarsa consistenza di alcuni elementi dell’immagine, rumori e particolari non inerenti al rilievo eseguito, come ad esempio alberi, automezzi, passaggio di persone, ecc., si possono verificare dei punti “anomali” per eliminare i quali si può ricorrere all’impiego di algoritmi di filtraggio. Nel caso in esame si è scelto un filtraggio di tipo aggressivo e l’insieme dei punti ottenuti è stato convertito direttamente in una superficie poligonale (mesh) e, per una visualizzazione fotorealistica, il modello geometrico è stato, poi, texturizzato.

Una volta che il set di immagini è stato orientato, si ottiene una ricostruzione 3D attraverso un processo di modellazione da cui si possono estrarre misure della superficie e informazioni vettoriali. Infatti un potente algoritmo “*image matching*” consente di estrarre dalla *mesh*, nuvola sparsa di punti, una nuvola di punti densa 3D mostrata in Figura 7, con una sufficiente risoluzione per descrivere la superficie rilevata e le sue discontinuità.

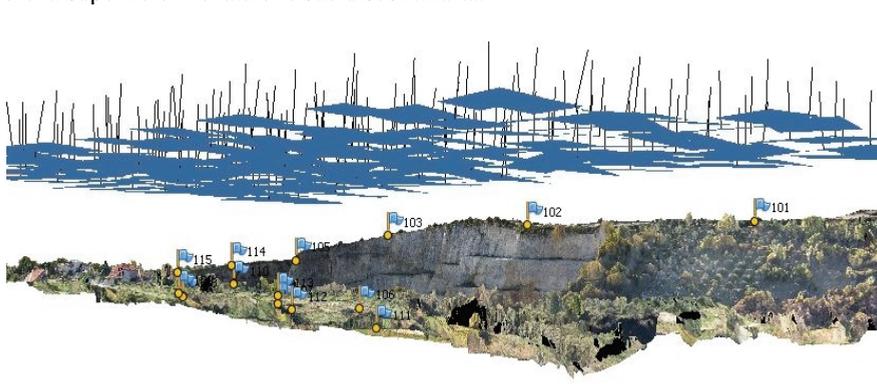


Figura 7 - Nuvola densa dei punti con l’allineamento delle immagini.

La successiva Figura 8, che rappresenta una nuvola densa classificata, mette in evidenza le discontinuità della superficie con un colore uniforme di grigio, le zone di mancanza di dati di aggregazione in una scala di grigio più chiari e le aree ricoperte di vegetazione in una tonalità di grigio più scuro.

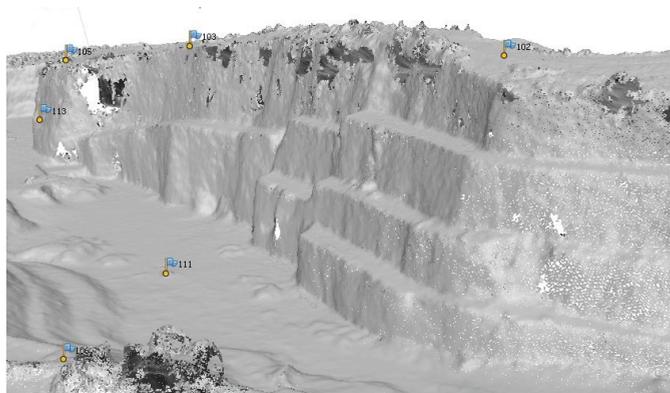


Figura 8 - Nuvola densa classificata.

Le osservazioni dei GCPs sono state usate all'interno dell'algoritmo di *bundle-adjustment* in modalità "self-calibrating" per ottenere i parametri dell'orientamento interno, per correggere gli errori sistematici e le deformazioni di acquisizione delle immagini e, infine, per garantire una scala carta affidabile e una conseguente georeferenziazione.

Nel dataset della esperienza descritta, alla fine della soluzione *bundle-adjustment*, viene garantito un errore di riproiezione di 1 pixel, definito come quell'errore geometrico corrispondente alla distanza, nel piano dell'immagine, del punto proiettato rispetto a quello misurato.

Successivamente è stata condotta l'analisi della precisione teorica del rilievo della cava. Conoscendo la distanza focale  $c$  pari a 4.3 mm; la distanza della cava,  $h$ , pari alla quota di volo di 130 metri; la distanza media tra i due centri di proiezione  $b$  uguale a 65 m, si è ottenuto la scala immagine  $m_b$  mediante la relazione seguente:

$$m_b = \frac{h}{b} \quad [1]$$



Figura 9 - Ortofoto georeferenziata.



Figura 10 - Modello 3D georeferenziato.

Le immagini del blocco hanno una scala media di 1:30000. Nota la  $\sigma_x^2$ , precisione stimata nello spazio immagine pari a 1.33853  $\mu\text{m}$ , ovvero la dimensione del pixel, attraverso la relazione [2] è stato possibile calcolare la precisione della distanza di campionamento a terra  $\sigma_x$ , e attraverso la relazione [3] la precisione in volo  $\sigma_z$ :

$$\sigma_x \cong \sigma_y \cong m_b \cdot \sigma_x^2 \quad [2]$$

$$\sigma_z \cong m_b \cdot \frac{h}{b} \cdot \sigma_x^2 \quad [3]$$

ottenendo, pertanto, un valore di scarto planimetrico  $\sigma_x \cong \sigma_y = 4 \text{ cm}$ .

Studi sperimentali hanno valutato un fattore di progetto,  $q$ , definito come il rapporto dello scarto quadratico medio dell'ascissa  $x$  e quello della  $z$  come si riporta nella relazione seguente:

$$q = \frac{\sigma_z}{\sigma_x} \quad [4]$$

Per valori di  $q$  compresi tra 1.5-3.0 si verifica che si restituisce una rete geometrica affidabile.

L'analisi della precisione teorica delle coordinate stimate della cava rilevata ha fornito, quindi, valori di  $\sigma_x \cong \sigma_y$  pari a  $\pm 4$  centimetri e  $\sigma_z$  pari a  $\pm 8$  centimetri; inoltre l'analisi della matrice di covarianza della soluzione "*bundle adjustment*" ha confermato il valore dell'ordine della dimensione del pixel di 1.3  $\mu\text{m}$ . Attraverso lo studio dei DEM ottenuti è stato possibile risalire al volume del materiale di scavo alla data in cui è stato effettuato il rilievo: è stato digitalizzato in ArcMap un poligono vettoriale per foto-interpretazione da una sorgente dato ortofoto. Il poligono che circoscrive il corpo della cava è stato importato nel software QT Modeler e, tramite l'operazione di "*smooth*" e l'interpolazione delle quote circostanti il corpo cava, si è potuto stimare il volume medio pari a 1'217'954  $\text{m}^3$ . L'accuratezza di questa procedura è fortemente dipendente dalla risoluzione ottenuta delle immagini e dalla capacità di elaborazione del software utilizzato. La precisione in elevazione  $\sigma_z$  dipende dalla scala dell'immagine  $m_b$ , dal rapporto tra la distanza dell'oggetto  $h$  e la *baseline* tra le due immagini  $b$ , e dall'indice di precisione  $\sigma_x^2$  stimata nello spazio immagine secondo la relazione (3); per il caso di studio è stata valutata una precisione media di elevazione,  $\sigma_z$ , di circa 8 cm. Infine nella Figura 11 si riporta il DEM restituito da Agisoft PhotoScan sovrapposto a Google Earth in cui la variazione colorimetrica rappresenta la variazione di quota: al rosso corrisponde la quota massima (364 mt) e al blu la quota minima (268mt).

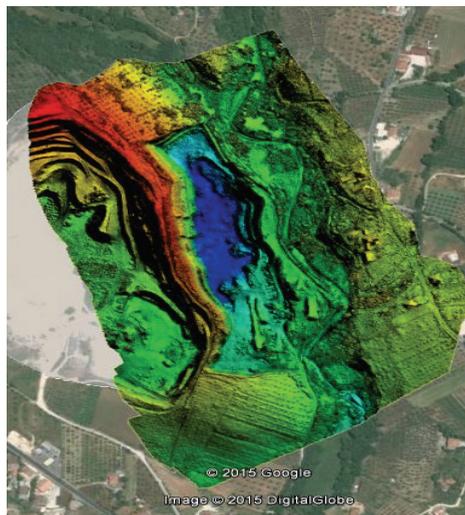


Figura 11 - DEM sovrapposto su Google Earth.

## Conclusioni

I primi risultati dell'attività di rilevamento eseguita permettono di confermare i vantaggi offerti dai sistemi UAV. Per supportare correttamente le analisi geo – meccaniche e valutazioni sui volumi dei materiali di scavo è necessario disporre di una affidabile documentazione su aree estese (l'intera cava, in questo caso) e, al contempo, di un elevato livello di dettaglio.

Il principale vantaggio della tecnica di rilevamento adottata con piattaforma UAV è la possibilità di documentare ad alta risoluzione aree di notevole estensione e di raggiungere in tempi contenuti anche zone difficilmente o completamente non accessibili.

Tuttavia per validare la precisione dei modelli ottenuti sarebbe sempre auspicabile la comparazione dei risultati ottenuti con i nuovi sistemi UAV con quelli ottenuti con tecniche di analisi tradizionale e innovative quali laser-scanning, o, preferibilmente, impiego di stazioni totali di alta precisione, e/o fotogrammetria digitale con impiego di camere di alta/altissima precisione.

## Bibliografia

- Aguilera D.G., Hernández J.F., Taboada J.M., González P.R., López D.H., García B.F., Sanz I.G., Perez B.A. – 3D Modelling and accuracy assessment of granite quarry using unmanned aerial vehicle – *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I – 3*, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
- Candiago S., Remondino F., De Giglio M., Dubbini M., Gattelli M. – Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images - *Remote Sens.* 2015, 7(4), 4026-4047; doi:[10.3390/rs70404026](https://doi.org/10.3390/rs70404026).
- Cavegn S., Haala N., Nebiker S., Rothermel M., Tutzauer P. – Benchmarking density image matching for oblique airborne imagery – *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3*, 2014 ISPRS Technical Commission III Symposium, 5 – 7 September 2014, Zurich, Switzerland.
- Dell'asta E., Thoeni K., Santise M., Forlani G., Giacomini A., Roncella R. - Network Design and Quality Checks in Automatic Orientation of Close-Range Photogrammetric Blocks - *Sensors* 2015, 15, 7985-8008; doi:[10.3390/s150407985](https://doi.org/10.3390/s150407985).
- Hartley R., Zisserman A. - *Multiple View Geometry in Computer Vision* – New York (USA): Cambridge University Press, 2003. ISBN 0-521-54051-8.
- Remondino F., Nex F., Sarazzi D. – Piattaforme UAV per applicazioni geomatiche – *Geomedia* n°6, 2011.
- Remondino F., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D. - UAV Photogrammetry for mapping and 3D modeling – Current status and future perspectives – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland.
- Remondino F. - State of the art in dense image matching - *The Photogrammetric Record* 29(146): 144–166 (June 2014) DOI: [10.1111/phor.1206](https://doi.org/10.1111/phor.1206).
- Salvini R., Riccucci S., Gulli D., Giovannini R., Vanneschi C., Francioni M. – Geological application of UAV photogrammetry and terrestrial laser scanning in marble quarrying (Apuan Alps, Italy) – *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 5*, doi:[10.1007/978-3-319-09048-1\\_188](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_188) – Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- Zylka A. – University of Vermont – *Small Unmanned Aerial System (sUAS) for Volume Estimation*- 2014.