# La fotogrammetria area per la modellazione 3D del territorio in automatico: la Provincia di Venezia

Daniela Poli (*), Klaus Legat (**), Raimund Gasser (**), Stefano Picchio (***), Nuccio Bucceri (****), Daniele Gariboldi (*****)

(*) Terra Messflug GmbH, Eichenweg 42, 6460 Imst, Austria, d.poli@terra-messflug.at
(**) Vermessung AVT ZT-GmbH, Eichenweg 42, 6460 Imst, Austria , r.gasser@avt.at, k.legat@avt.at
(***) UniSky srl, Parco Scientifico Tecnologico di Venezia, via della Libertà 15, 30175 Venezia Marghera, Italia, stepicchio@gmail.com
(****) LTS srl, Viale della Repubblica, 209, 31100 Treviso, Italia, nuccio.bucceri@ltsht.com
(*****) Provincia di Venezia, Palazzo Ca' Corner, San Marco 2662, 30124 Venezia, Italia, daniele.gariboldi@provincia.venezia.it

**Riassunto**
L'articolo presenta uno dei primi esempi, o probabilmente il primo esempio in Italia, di generazione di nuvole dense di punti 3D con tecnica fotogrammetrica su una vasta area per una pubblica amministrazione. Le ditte Terra Messflug GmbH e UniSky srl, infatti, su commissione della Provincia di Venezia, hanno eseguito nel Marzo 2014 riprese aeree fotogrammetriche con camera Vexcel UltraCam Xp sull'intero territorio della Provincia di Venezia (circa 2.400 km$^2$) raccogliendo circa 4.000 immagini con dimensione al suolo di 15cm. L'obiettivo era di estrarre nuvole 3D con algoritmi avanzati di *dense image matching* per diverse applicazioni in ambito urbano e rurale, filtrare il modello digitale del terreno e produrre le ortofoto sull'intero territorio, ad un costo significativamente inferiore rispetto alla tecnica LiDAR. Le singole fasi della produzione fotogrammetrica, le caratteristiche e le potenzialità dei prodotti generati sono descritte criticamente, unitamente alle applicazioni previste.

***Abstract***
*The paper presents one of the first examples, or probably the first one in Italy, of dense 3D point clouds generation with photogrammetric techniques over a large area for a public administration. Companies Terra Messflug GmbH and UniSky srl, in fact, commissioned by the Province of Venice, performed in March 2014 aerial photogrammetric flights with Vexcel UltraCam Xp camera on the entire territory of the province of Venice (about 2,400 km$^2$), collecting approximately 4,000 images with ground pixel size of 15cm. The goal was to extract 3D point clouds with advanced algorithms of dense image matching for different applications in urban and rural areas, to filter the digital terrain model and produce standard and true-orthophotos throughout the country, at a cost significantly lower than for LiDAR technologies. The individual steps of the photogrammetric production, the characteristics and potential of the products generated are critically described, together with the intended application.*

## Introduzione

Nello scorso decennio il laser scanner aereo (LiDAR) era considerato il mezzo più vantaggioso, efficiente e rapido per fornire nuvole dense di punti 3D e modellare superfici e terreno in modo accurato. La tecnica fotogrammetrica appariva interattiva e laboriosa e non in grado di fornire gli

stessi risultati. Recentemente, grazie ai miglioramenti dei sensori ottici e, soprattutto, a nuovi algoritmi per l´individuazione automatica di punti corrispondenti (*dense image matching*), la fotogrammetria è riemersa come una tecnologia competitiva e in grado di fornire, in maniera automatica, nuvole di punti 3D e modelli digitali della superficie (DSM) geometricamente paragonabili a quelli ottenuti con strumentazione attiva, anche per grandi aree.
Inoltre la disponibilità di immagini con ricoprimento elevato e di un DSM accurato permette la generazione, sempre in modo automatico, di ortoimmagini di precisione che, a differenza di quelle standard ottenute proiettando le immagini sul modello digitale del terreno (DTM), sono geometricamente corrette non solo sul terreno, ma anche rispetto agli elementi su di esso, ad esempio tetti e facciate degli edifici. Questo prodotto risulta fondamentale per rappresentare il paesaggio, soprattutto urbano, in modo realistico tre dimensioni.
In letteratura la potenzialità della fotogrammetria aerea per modellazione 3D è dimostrata in numerose pubblicazioni (Haala and Rothermel, 2012, Irschara et al., 2012, Remondino et al., 2013). Il presente articolo riporta il primo esempio, a conoscenza degli autori, di questo tipo di attività, eseguito per una pubblica amministrazione in Italia su un´area di notevoli dimensioni.
Nel 2013, infatti, la Provincia di Venezia si è posta l'obiettivo di sviluppare ulteriormente i servizi offerti ai comuni del territorio, in previsione della futura Città Metropolitana. Dopo aver sviluppato nell'ambito di un progetto triennale in collaborazione con l'Università IUAV di Venezia e il suo spin-off UniSky, degli studi pilota sul suo territorio utilizzando dati LIDAR già disponibili, ha determinato di procedere a un utilizzo operativo di tali analisi che per potere essere utili dovevano interessare l'intera estensione della Provincia. Si è quindi posto il problema di procedere alla ricognizione tridimensionale dei 2500 $km^2$ del territorio provinciale in maniera economicamente sostenibile, specialmente con l'intenzione di ripetere tale ricognizione ogni 3-4 anni per rilevare l'evoluzione del territorio nel tempo e compiere interessanti e utili analisi spazio-temporali.
Terra Messflug, società di fotogrammetria aerea con sede in Austria, e UniSky hanno quindi proposto una soluzione basata su tecniche di fotogrammetria area, unite agli ultimi sviluppi nel campo dell´*image processing*.
Il presente articolo presenta il *workflow* seguito da Terra Messflug GmbH per il processamento dei dati e presenta i primi risultati della modellazione 3D e ortofoto di precisione.

## L'area di progetto e la pianificazione del volo

L´area di progetto comprende l´intera Provincia di Venezia e copre sia aree urbane e rurali caratterizzate da variazioni di altezza contenute ed elevata presenza di elementi idrografici.
Per rispondere alle esigenze della Provincia, il piano di volo, realizzato con il software TopoFlight (Topoflight, 2013), è stato pianificato con dimensione media del pixel a terra pari a 15cm e ricoprimento longitudinale del 70% e trasversale del 40%, incrementato a 80% e 60% sul centro storico di Venezia (Figura 1); ne risultano 47 strisciate suddivise in 3 blocchi, per un totale di 4072 immagini. Le riprese aeree sono state eseguite da Terra Messflug GmbH il 29, 30 e 31 Marzo 2013 nelle ore a cavallo del mezzogiorno con la camera UltraCam Xp della Microsoft Vexcel Imaging GmbH. La camera ha un sensore pari a 67,860 mm x 103,860 mm (che fornisce immagini con dimensioni in pixel di 11310 x 17310 pixel), una dimensione del pixel di 6 micron ed è accoppiata ad un ottica con focale di 100,5 mm.
A bordo del velivolo, durante le riprese fotogrammetriche, è utilizzata la piattaforma inerziale IGI IMU-Ild (256 Hz) per la misurazione diretta dell'orientamento della camera.

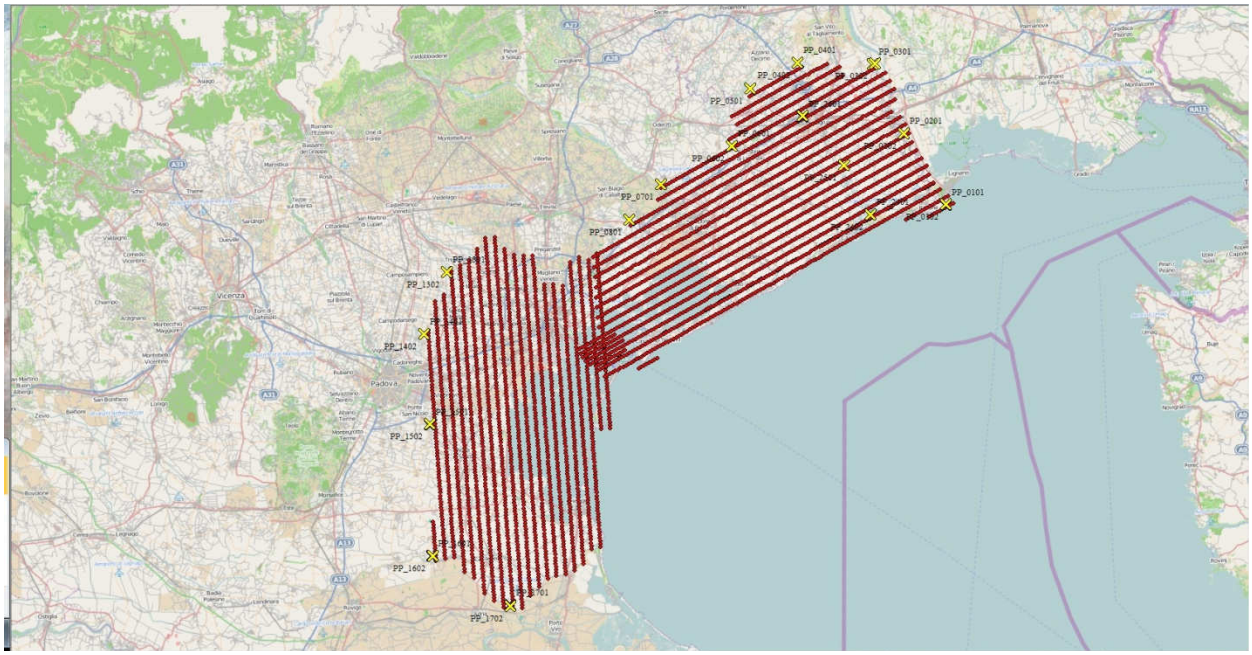

*Figura 1. Piano di volo: strisciate (in rosso) e distribuzione dei punti di controllo a terra (in giallo).*

## Workflow

Le operazioni seguite per l´estrazione dell´informazione geometrica 3D e relativa tessitura sono riassunte in Figura 2. Le fasi di preparazione e orientamento delle immagini hanno seguito le procedure tradizionali di fotogrammetria aerea. In seguito alla ripresa, le immagini sono state processate radiometricamente in modo automatico e la triangolazione aerea è stata eseguita con il software Match-AT di Inpho. Le traiettorie misurate dalla stazione inerziale a bordo sono state processate con tecnica differenziale (DGPS) con 4 stazioni master nella Regione Veneto ubicate in maniera tale che ciascun fotogramma non risultasse più distante di 50 km dalla stazione master. Il post-processing delle traiettorie è stato eseguito mediante il software GrafNav. I dati GNSS e INS sono integrati con il software AEROoffice della IGI GmbH. Per l'orientamento relativo, i punti di legame sono stati estratti semi-automaticamente. In aggiunta, 16 coppie di punti sono state rilevate a terra con tecniche topografiche e precisioni centimetriche ed utilizzate per la triangolazione aerea, eseguita con il software Match-T.

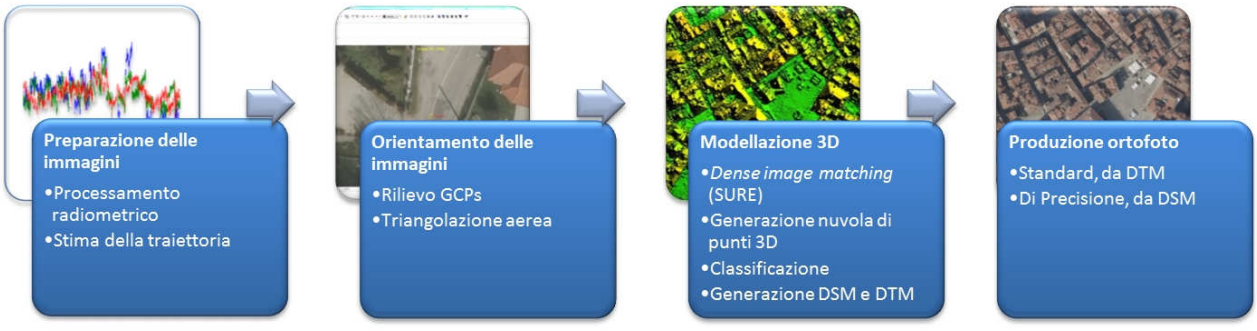


*Figura 2. Schema del workflow seguito durante il processamento delle immagini.*

## Modellazione 3D con *dense image matching*

Per *image matching* s'intende l'individuazione di corrispondenze tra primitive estratte in due o più immagini e la stima delle corrispondenti coordinate 3D con modelli di collinearità o proiettivi. Questo processo genera una mappa di densità nello spazio immagine e una nuvola di punti 3D nello spazio oggetto. Esistono molti algoritmi per l'estrazione automatica delle primitive e l'assegnazione della loro corrispondenza (Gruen, 2012; Remondino et al., 2013). In fotogrammetria aerea classica

si utilizzano algoritmi basati su *area-based* e *feature-based matching* che identificano e riconoscono le primitive in modo sparso, cioè per singoli elementi (ad esempio punti), e valutano la loro corrispondenza con misure di correlazione delle intensità dei valori di pixel in un intorno, a cui si possono aggiungere vincoli geometrici e radiometrici. I recenti sviluppi nell'*image matching* sono indirizzati al perfezionamento di algoritmi basati su ricostruzioni dense, non più sparse, che meglio si adattano alla modellazione di superfici irregolari, come appunto il terreno e gli oggetti su di esso. Uno degli approcci principali è quello proposto da Hirschmüller (Hirschmüller, 2008) e detto *semi-global matching* (SGM), implementato oggigiorno in molti software commerciali per l'estrazione di modelli digitali della superficie. Sulla base di accurati test eseguiti con diversi algoritmi, la scelta è ricaduta sul software SURE (SUrface REconstruction, Rothermel et al., 2012) della ditta nFRAME (nFRAME web, 2014).
Diverse prove sono state svolte su aree ristrette per la scelta dei parametri ottimali, sulla base delle caratteristiche del volo, delle immagini e, soprattutto, del ricoprimento e uso del terreno, quindi il *matching* è stato lanciato per tutte le immagini, con densità 15cm (1 pixel). L´operazione, che ha richiesto un tempo complessivo di 430 ore, è stata eseguita in parallelo su quattro gruppi di 1000 immagini ciascuno e sul centro storico, caratterizzato da ricoprimento più elevato (Figura 3).
Per la generazione della nuvola di punti 3D, i risultati del *matching* sono stati ricampionati a 25cm, ovvero densità di 16 punti /m$^2$. L´area di progetto è stata suddivisa in 24 aree rettangolari (Figura 4) e i prodotti distribuiti in 12´000 fogli quadrati di 500m di lato. Secondo le richieste della Provincia, due nuvole di punti 3D sono state prodotte per ogni foglio: la prima con l´informazione di colore delle bande RGB, la seconda con l´informazione in falso colore (bande R, G e NIR). L´operazione ha richiesto 450 ore macchina.
Successivamente i punti 3D sono stati classificati in *ground* e *above-ground* con il software TerraScan di TerraSolid e macro appositamente sviluppate per il progetto, per la produzione dei corrispondenti modelli digitali del terreno (DTM) e della superficie (DSM) con passo 5m.

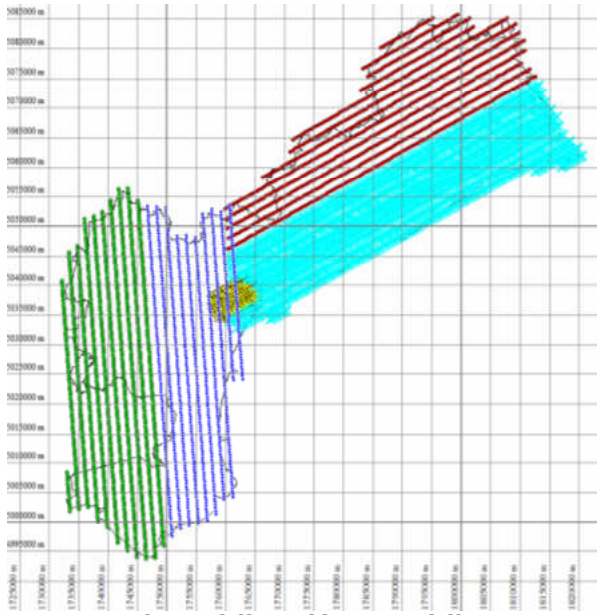

*Figura 3. Schema della suddivisione delle immagini per dense image matching.*

*Figura 4. Schema della divisione dell´area di progetto per la generazione della nuvola di punti 3D.*

**Ortofoto di precisione**

Un ulteriore vantaggio derivante dall´esecuzione delle riprese aeree con ricoprimento più elevato rispetto ai parametri standard consiste nella possibilità di generare ortofoto di precisione, o *true-orthophotos*. Le immagini aeree sono proiettate sono solo sul terreno, ma anche sui volumi su di esso, rappresentati dal DSM. La qualità dei risultati dipende dalla geometria di acquisizione, dall´incidenza di occlusioni e, soprattutto, dalla qualità del DSM. Nel caso della Provincia di

Venezia, le ortofoto sono state prodotte in modo automatico con il software SURE durante la generazione delle nuvole di punti 3D. In Figura 5 è riportato un esempio di DSM e ortofoto di precisione nella parte storica di Venezia.

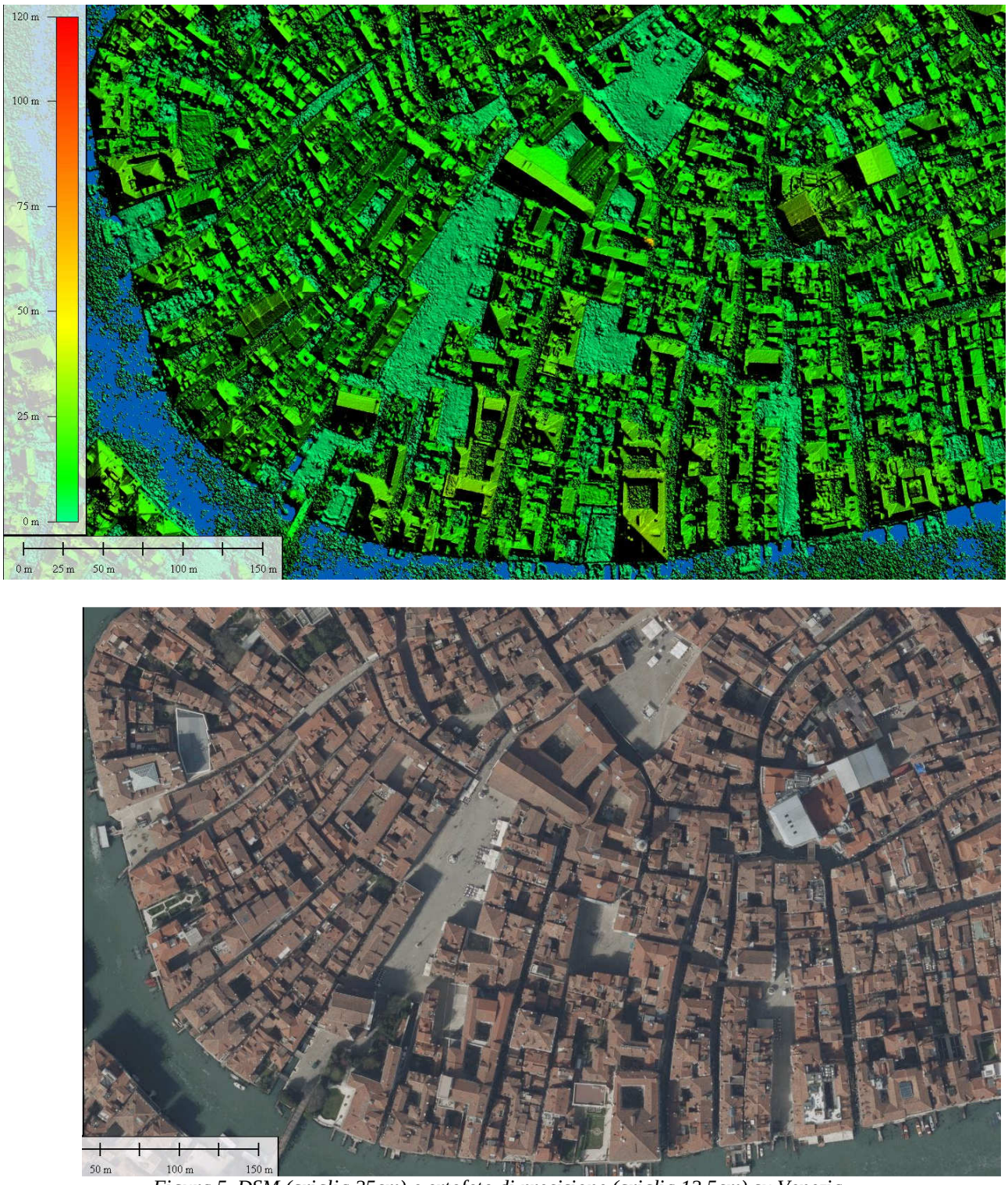


*Figura 5. DSM (griglia 25cm) e ortofoto di precisione (griglia 12.5cm) su Venezia.*

## Analisi preliminare dei risultati

I prodotti 3D e le ortofoto sono tuttora in fase di verifica e collaudo da parte della Provincia. Dalla prima analisi dei risultati emerge una generale soddisfazione rispetto alla completezza dei risultati, alla qualità e al livello di automazione.

Dal punto di vista della nuvola di punti 3D, l´algoritmo contenuto in SURE ha completato il *matching* su tutta l´area di progetto, indipendentemente dal tipo di copertura o geometria della superficie. Sono stati ottenuti risultati soddisfacenti anche in corrispondenza di elementi generalmente critici per *image-based matching*, come superfici uniformi (ombre, coperture di capannoni industriali, etc.) o spigoli dei tetti (Figura 6).

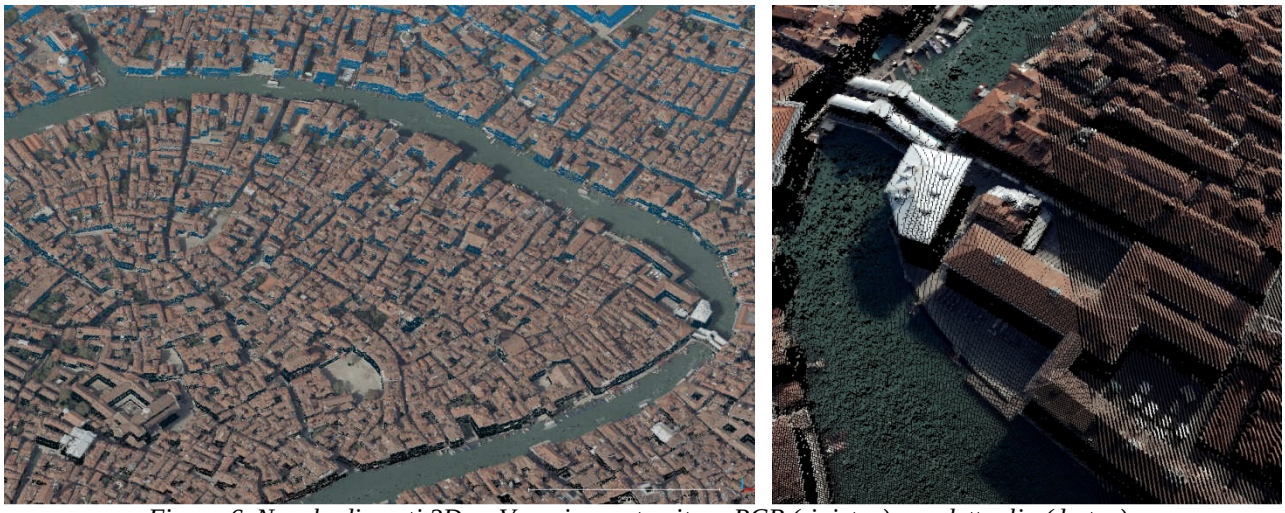

*Figura 6. Nuvola di punti 3D su Venezia con tessitura RGB (sinistra) con dettaglio (destra).*

Il DSM mostra un livello di dettaglio notevole in ambiente urbano ed è possibile distinguere edifici adiacenti di piccole dimensioni, o i dettagli sui tetti (Figura 5).
La scelta di aumentare il ricoprimento delle riprese aeree sul centro storico di Venezia, caratterizzato da vicoli stretti ed un´alta densità di edifici adiacenti, si è rivelata vincente, alla luce dei risultati ottenuti nella modellazione 3D e nell´ortofoto di precisione (Figura 5).
La disponibilità della componente spettrale dell'infrarosso nella nuvola di punti permette di classificare i punti in base anche a noti indici spettrali (SAVI , NDWI2 e altri) ottenendo una ottima classificazione in vegetazione (alta e bassa), edifici, acqua, terreno permeabile e impermeabile (Figura 7).

**Utilizzo dei prodotti**

I temi che la Provincia di Venezia in collaborazione con IUAV e Unisky intende sviluppare sono:

- lo sviluppo storico dell'uso del suolo, con un confronto comparativo sugli anni 2007, 2011 e 2014 riguardo al rapporto nei diversi territori della provincia tra suolo permeabile e impermeabile. Tale strumento è finalizzato al monitoraggio della pianificazione e allo studio dell'evoluzione del territorio;
- l'estrapolazione dai dati tridimensionali delle sagome degli edifici rilevati da aereo e il loro confronto con i dati amministrativi forniti dai comuni, con particolare riguardo alle aree in cui siano presenti vincoli ambientali, ai fini della tutela del territorio;
- la realizzazione di una mappa di esposizione solare per i tetti di tutti gli edifici del territorio, permettendo tramite uno strumento web l'interrogazione fino al livello di singola falda ai fini del calcolo della convenienza e del ritorno economico di una copertura con pannelli fotovoltaici o termici;
- l'incrocio dei dati a disposizione dei comuni sul consumo di energia elettrica e di gas degli edifici con altri dati quali quelli anagrafici o relativi agli interventi di ristrutturazione effettuati, al fine di offrire analisi statistiche finalizzate a una migliore gestione energetica delle città;
- il calcolo di indici di resilienza nelle zone densamente abitate, ai fini dell'individuazione delle aree a rischio per il fenomeno "isola di calore", i cui elementi di rischio sono comuni a

quelle per allagamenti dovuti al fenomeno delle “bombe d’acqua”. In particolare censimento delle piante e delle superfici permeabili, verifica dello stato di manutenzione dei fossi e delle rive, posizione dei tombini, supporto tramite modello tridimensionale delle pendenze alla ridefinizione dei bacini e sottobacini, utilizzando anche una visualizzazione integrata dei piani delle acque. Inoltre calcolo di opportuni indici in grado di evidenziare zone a rischio (elevato rapporto tra superfici impermeabili/permeabili, canyon urbani, altri fattori di rischio);

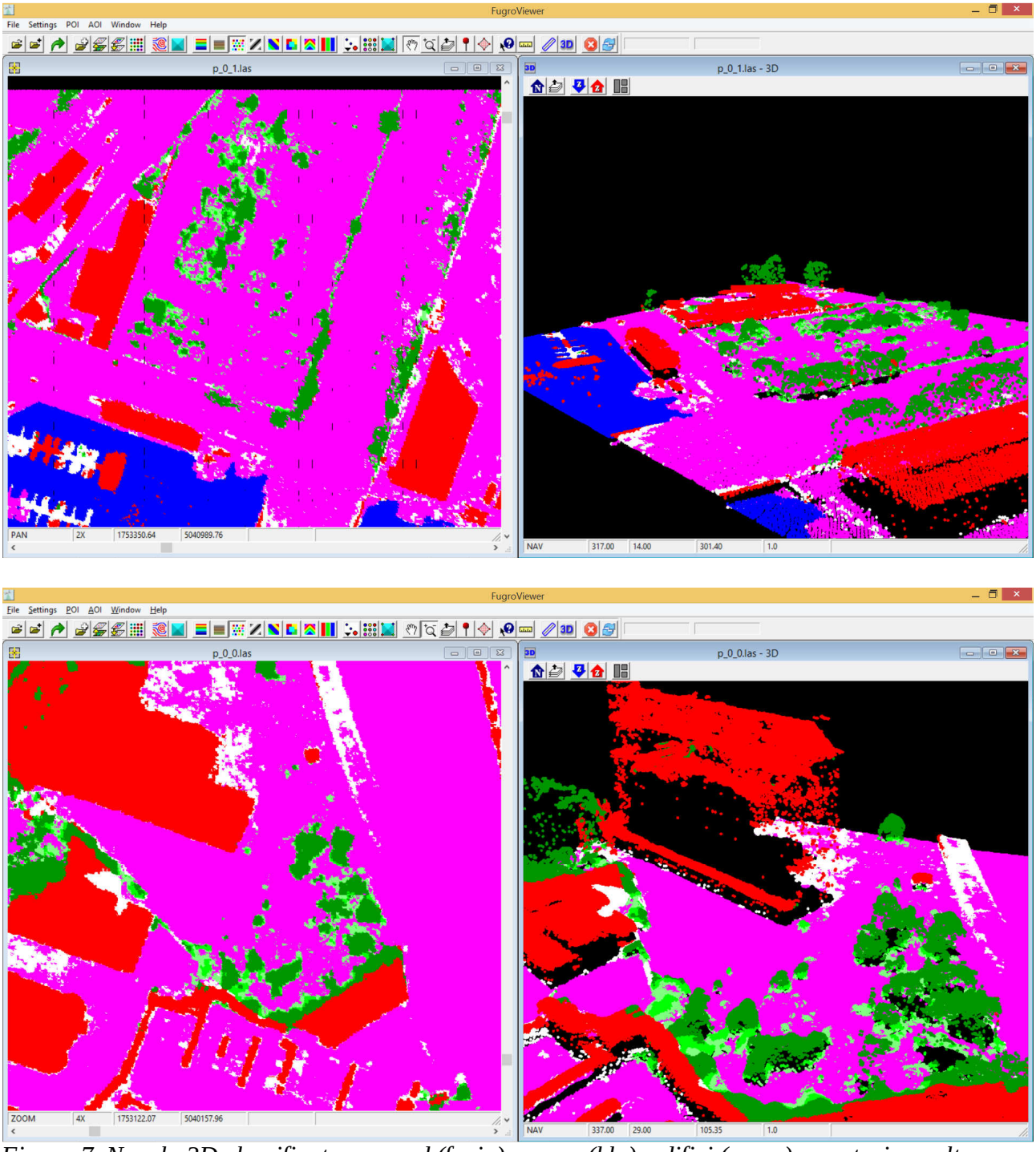


*Figura 7. Nuvola 3D classificata: ground (fuxia), acqua (blu), edifici (rosso), vegetazione alta (verde scuro)e bassa (verde chiaro).*

## Conclusioni

Nel 2013 la Provincia di Venezia ha commissionato a UniSky srl la modellazione 3D della superficie della Provincia (ca 2500 $km^2$), che comprendeva la nuvola di punti 3D con densità di almeno 9 punti /$m^2$, la classificazione dei punti, la generazione dei modelli digitali del terreno e della superficie e la produzione di ortofoto tradizionali e di precisione (*true-orthophoto*) in colore RBG e falso colore. Con la collaborazione della società aerofotogrammetrica Terra Messflug GmbH, il lavoro è stato eseguito con tecniche di fotogrammetria aerea digitale, unite ai più recenti sviluppi nel campo nell´*image processing* automatico e, in particolare, del *dense image matching*. Le riprese aeree, eseguite da Terra Messflug nel Marzo 2013 con ricoprimento 70%-40% (80% - 60% sopra il centro storico di Venezia), hanno prodotto circa 4000 immagini con risoluzione geometrica pari a 15cm. Per la generazione automatica delle nuvole 3D, Terra Messflug ha utilizzato il software SURE di nFRAME, opportunamente settato per adattarsi alle caratteristiche dell´area di progetto.
L'elevata densità della nuvola di punti, il suo contenuto multispettrale, le ortofoto ad alta risoluzione unite alla sostenibilità economica del rilievo su ampie estensioni sono elementi che abilitano analisi e strumenti di supporto alle decisioni altrimenti non possibili su una scala amministrativa così estesa come quella provinciale/metropolitana.

## Riferimenti bibliografici

Gruen A. (2012). "Development and Status of Image Matching in Photogrammetry". *The Photogrammetric Record*, Special Issue: Ian Dowman retirement symposium, 27(137): 36–57.

Haala, N. and Rothermel, M. (2012). "Dense Multi-Stereo Matching for High Quality Digital Elevation Models". PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. Jahrgang 2012 Heft 4 (2012), p. 331-343.

Hirschmüller H. (2008). Stereo processing by semi-global matching and mutual information. IEEE Trans. PAMI, Vol. 30.

Irschara, A., Rumpler, M., Meixner, P. Pock, T., Bischof, H. (2012). Efficient and globally optimal multi view dense matching for aerial images. ISPRS Annals, Volume I-3, 227-232.

Microsoft, 2014. http://www.microsoft.com/ultracam/en-us/UltraMapModules.aspx (ultimo accesso Settembre 2014).

nFRAME, 2014. http://nframes.com/sure/ (ultimo accesso Settembre 2014).

Remondino, F., Spera, M.G., Nocerino, E., Menna, F., Nex, F. (2014). "State of the art in high density image matching". The Photogrammetric Record, Vol. 29(146), pp. 144-166, DOI: 10.1111/phor.12063.

Rothermel, M., Wenzel, K., Fritsch, D., Haala, N. (2012). SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. Proceedings LC3D Workshop, Berlin ,December 2012.

Topoflight, 2013. http://www.topoflight.com/ (ultimo accesso Settembre 2013).