

# FOTOGRAMMETRIA DIGITALE E 3D LASER SCANNING: UNA POSSIBILE INTEGRAZIONE TRA I METODI DI RILIEVO

Marco DUBBINI, Antonio ZANUTTA

DISTART - Università di Bologna, Viale Risorgimento 2 - 40136 Bologna, tel. 051.2093115, fax 051.6448073,

[marco.dubbini@mail.ing.unibo.it](mailto:marco.dubbini@mail.ing.unibo.it)

[antonio.zanutta@mail.ing.unibo.it](mailto:antonio.zanutta@mail.ing.unibo.it)

## Riassunto

Il sistema *TopEye* è un sistema di rilievo costituito da un insieme di sensori (*INS*, *GPS*, *Laser Range Finder*) installati su elicottero che fornisce direttamente il DEM di porzioni di territorio. La presenza a bordo di una camera digitale calibrata di tipo *Hasselblad* connessa al sistema, consente facilmente la generazione di ortofoto. Molteplici sono le applicazioni derivanti da tale sistema soprattutto in ambito ambientale (monitoraggio di zone a rischio idrogeologico, cave, calcolo dei volumi, ecc) anche se rimangono ancora aperte diverse problematiche connesse alla gestione ed elaborazione dei dati, al controllo e validazione dell'accuratezza dei prodotti ottenuti. Nel presente lavoro si è valutata la possibilità di utilizzare la fotogrammetria digitale, avvalendosi degli stereomodelli ottenuti dalla camera digitale di bordo. Il rilievo è stato eseguito nella zona di Molassana (GE) opportunamente scelta in quanto presenta caratteristiche morfologiche ed antropiche differenziate ideali per testare il sistema. In primo luogo si è voluto validare i parametri di orientamento esterno dei singoli fotogrammi ottenuti dal sistema stesso, mediante l'utilizzo di una stazione fotogrammetrica digitale a basso costo (*StereoView*). Si sono poi ricavati i parametri di orientamento esterno utilizzando PFA (Punti Fotogrammetrici d'Appoggio) dedotti in piattaforma CAD dall'analisi congiunta del DEM sovrapposto all'ortofoto generati dall'elaborazione dei dati provenienti dal sistema *TopEye*. In entrambi i casi sono stati prodotti DEM in modalità semi-automatica e utilizzando la procedura di auto-correlazione (*image matching*).

## Introduzione

Il *laser* a scansione (*Laser Scanning*) è un metodo di rilievo che in tempi rapidi fornisce DSM (*Digital Surface Model*) e a seguito di elaborazioni con specifici programmi, applicando differenti algoritmi di filtro, DTM (*Digital Terrain Model*; per es. Ackermann, 1996) di buona qualità. Tale metodo è stato concepito da almeno una decina di anni, ma solo attualmente sta vivendo un vero e proprio sviluppo grazie ai progressi della tecnologia. La scansione del territorio viene realizzata da un telemetro laser, posto a terra o come nel presente caso su di un velivolo (elicottero), che determina la distanza dal terreno in funzione del tempo impiegato da un raggio *laser* a percorrere il tragitto di andata e ritorno. Nello specifico il sistema *TopEye* è equipaggiato dal telemetro laser e da altri sensori quali GPS (*Global Positioning System*), *INS* (*Inertial Navigation System*) per il posizionamento e l'assetto del velivolo istante per istante al fine della georeferenziazione del dato (<http://www.combitech.se/survey/topeye/>; Al-Bayari et al., 2000). Con la scansione laser si effettua un campionamento discreto dei punti della superficie fisica da rilevare ottenendo un archivio di coordinate tridimensionali dei punti rilevati.

I sistemi di coordinate usati in questa tipologia di rilievo sono due e di tipo relativo: il primo è il sistema di coordinate euleriano tangente all'ellissoide di riferimento nella zona in cui si effettua la navigazione, con l'asse X orientato verso nord, asse Y verso est e asse Z con direzione entrante nell'ellissoide stesso. Il secondo sistema è solidale con l'aeromobile ed è un sistema di coordinate ortogonali destrorso definito dall'utente, in cui l'asse X è rivolto lungo la direzione di volo, l'asse Y

verso destra e l'asse Z uscente verso il basso. L'integrazione delle misure realizzate dal LS con i parametri derivanti dall'INS e con la posizione 3D ottenuta epoca per epoca dal sistema GPS, permette di ottenere il cosiddetto *raw data* georeferenziato (punti sparsi in coordinate assolute). I file contenenti questi dati hanno dimensioni che vanno dalle centinaia di migliaia, ai milioni di punti per chilometro quadrato. L'integrazione del sistema descritto con camere fotogrammetriche in affiancamento alle apparecchiature *laser*, GPS e INS, risulta essere oggi molto competitiva per la realizzazione di ortofoto.

Nel presente lavoro si è valutata la possibilità di utilizzare la fotogrammetria digitale, avvalendosi degli stereomodelli ottenuti dalla camera digitale di bordo. La fotogrammetria è stata impiegata in duplice modalità: per validare i parametri di orientamento esterno (POE) forniti dal sistema *laser scanning* per ciascun fotogramma acquisito contemporaneamente al *raw data*; per generare un DTM di riferimento da impiegare per validare la procedura di affinamento dell'ortofoto realizzata in ambiente MicroStation. Il rilievo è stato eseguito nella zona di Molassana (GE) opportunamente scelta in quanto presenta caratteristiche morfologiche ed antropiche differenziate ideali per testare il sistema. L'area rilevata nel complesso copre circa 51000 mq per un totale di 2990924 punti (4÷5 punti a mq nel DTM) e di 12 fotogrammi aventi scala media di 1:5000 con una sovrapposizione del 60÷70%. Per lo studio in oggetto si è selezionata una stereocoppia ricoprente un'area di circa 3740 mq (Figura 1).

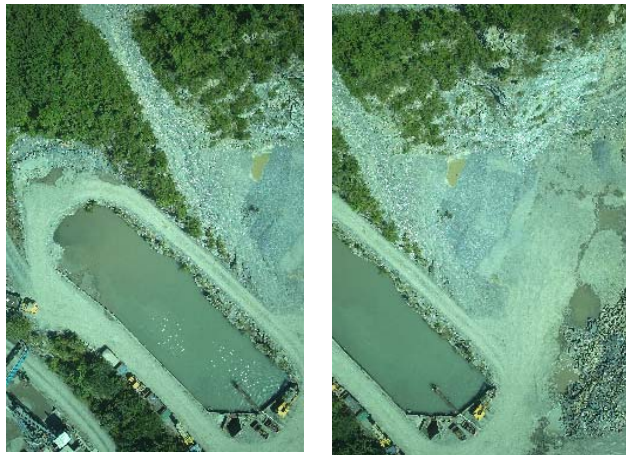


Figura 1 – Immagini utilizzate per la creazione della stereocoppia

### **Il dato laser: generalità sulla qualità**

Il sistema *TopEye* permette di generare DTM con errori paragonabili a quelli propri di una cartografia a media-grande scala. L'accuratezza finale è influenzata da svariati fattori concomitanti derivanti principalmente dalle caratteristiche tecnologiche dei sensori di bordo, dalla quota di volo, dalla morfologia del terreno (asperità, vegetazione, ecc) e dall'effetto della rifrazione atmosferica. L'accuratezza delle coordinate finali assolute dei *raw data* risulta essere nei migliori dei casi contenuta entro i 20÷40 cm. Un parametro fondamentale che condiziona l'accuratezza finale del prodotto è la densità di campionamento. Questa è funzione di una serie di fattori, quali: la dimensione del set di dati; la velocità di esecuzione del volo; il dettaglio che si vuole ottenere; le caratteristiche morfologiche della zona oggetto del rilievo. Ad esempio per una superficie estesa regolare può bastare rilevare un punto ogni dieci metri quadrati, per rilievi di maggior dettaglio in zone morfologicamente complesse, l'ordine è di 3-5 punti per metro quadrato. Generalmente per la copertura di una qualsiasi zona oggetto di rilievo, occorrono più strisciate. A causa di errori indotti dai vari sensori, potrebbe verificarsi la non corretta sovrapposizione delle strisciate adiacenti. Per tale motivo viene consigliato prima di ogni rilievo di eseguire la calibrazione del sistema *laser* (*TopEye* manuale di riferimento). Tale operazione viene realizzata in più fasi. In primo luogo si realizza la scansione di una stessa zona predefinita secondo strisciate ortogonali. In seguito un

operatore esperto individua particolari omologhi nei vari DEM corrispondenti alla stessa zona. In ultimo, vincolando i dati laser corrispondenti ai vari punti omologhi, si determinano le correzioni da applicare al sistema. Occorre compiere questa procedura su di una zona in cui vi siano oggetti ben identificabili. Una volta determinati i parametri di orientamento corretti, i *raw data* vengono calcolati nuovamente. Se l'orientamento è ben fatto strisciate adiacenti risultano essere corrispondenti. Questo è un punto critico poiché la bontà dei risultati finali dipende dalla qualità dei dati ottenuti proprio in questa fase. I problemi maggiori che si incontrano, sono dovuti ai *cycle slip* del sensore *GPS* che si hanno in fase di virata del velivolo: per questo motivo è sempre bene fare sì che le virate tra una strisciata e la successiva siano fatte distanti dalla zona oggetto del rilievo.

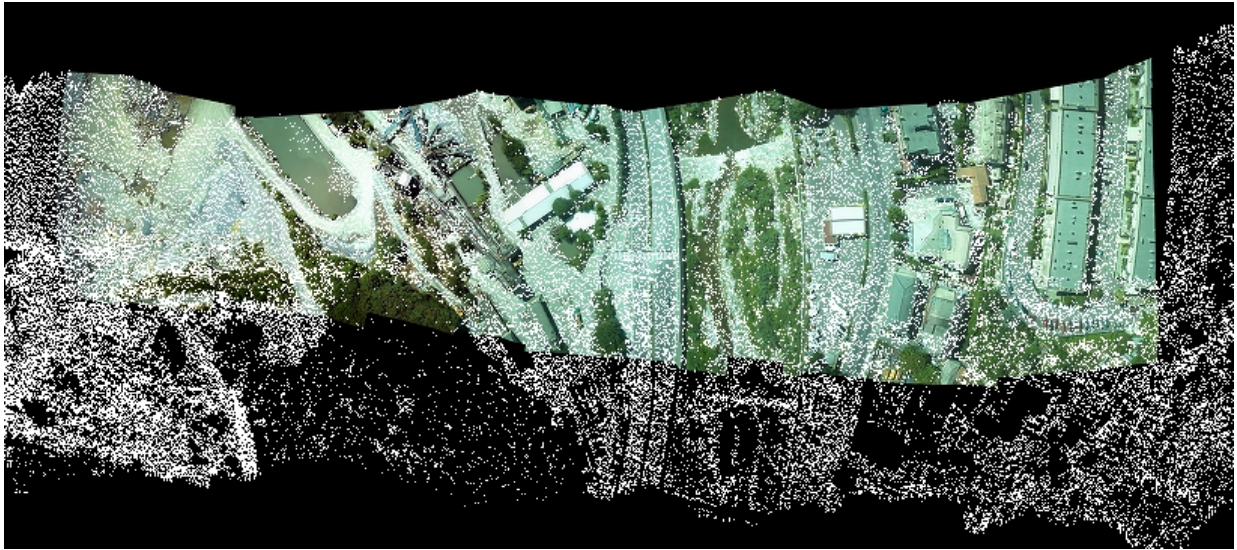
### **L'immagine digitale e creazione dell'ortofoto**

Il sistema *TopEye*, è equipaggiato con una camera digitale calibrata di tipo *Hasselblad Phase I*, con sensore CCD di 3056 x 2032 *pixel*, la quale può produrre immagini con dimensione del *pixel* di 4  $\mu\text{m}$  che variano dai 2 ai 20 cm a terra. Tale camera può fornire una copertura al suolo, in funzione della quota di volo, tra i 40x60 mq e i 400x600 mq. Nell'applicazione in oggetto, sono state rilevate immagini digitali aventi *pixel* con dimensione a terra di circa 4 cm e ricoprimento di circa 13160 mq, essendo la quota media di volo pari a circa 195 m. La macchina è stata programmata in modo tale da generare fotogrammi successivi aventi una sovrapposizione media del 60÷70%, per sperimentare la formazione di modelli stereoscopici. Le immagini digitali acquisite durante il volo sono state memorizzate nel formato ECW. Tale formato permette una elevata compressione del *file* senza rilevabili perdite di informazione. Altresì vi è la possibilità di memorizzare le stesse nel formato *TIFF*, ma questo, se si ha la possibilità, si preferisce non utilizzarlo in quanto produce immagini di dimensioni, in termini di mole di memoria, elevatissime e quindi di scomoda gestione da parte dei comuni *software*. Una volta ricavato il DTM dai dati provenienti dal rilievo *laser scanning*, si è passati alla creazione dell'ortofoto utilizzando il modulo *TerraPhoto*, un applicativo di *MicroStation*.

Le fasi per giungere alla generazione dell'ortofoto sono molteplici. In primo luogo si esegue la classificazione dei dati *raw* del DEM per estrapolare quelli relativi al suolo (DTM). I dati vengono trasformati in una superficie TIN. In seguito si selezionano i file che vengono utilizzati per associare a ciascun fotogramma il tempo GPS di scatto (interpolato facendo uso dei dati dell'INS), le coordinate del centro di presa e i tre angoli *roll*, *pitch* ed *heading* determinati dall'INS. Questi parametri vengono automaticamente ricavati utilizzando i dati interpolati del GPS ed il *file* di calibrazione della camera stessa, in quanto questo riporta in un sistema locale le coordinate del centro di presa riferite all'antenna. Oltre questi due *file*, per la generazione dell'ortofoto, occorre inserire nel software *TerraPhoto* anche il *file* di calibrazione della camera digitale.

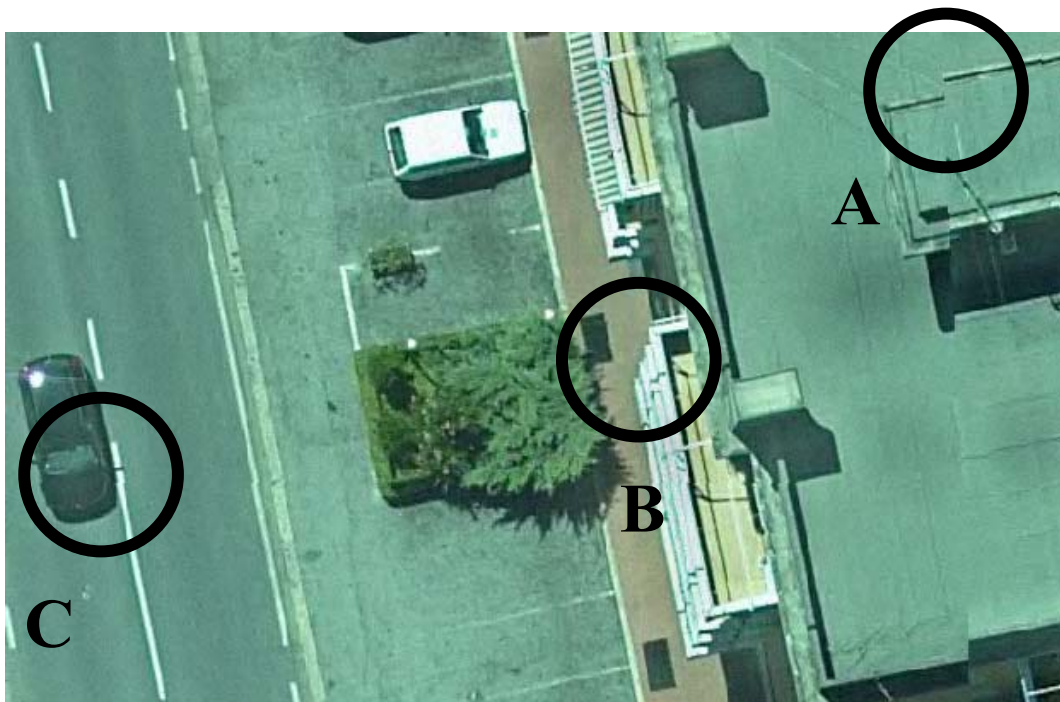
Una volta caricati questi *file*, è necessario definire quali punti *laser* utilizzare per creare il DTM che servirà per la generazione dell'ortofoto. Questi vengono selezionati mediante la classe di appartenenza definita utilizzando comuni criteri e procedure di classificazione (Al-Bayari et al., 1999). In tale operazione viene optata la classe dei punti appartenenti al terreno denominata *Ground*.

Si suddivide l'area oggetto in grandi settori costituenti un grigliato entro ciascuna cella del quale viene lanciato il processo di ortorettifica. Le dimensioni di tale grigliato sono dettate sia dalle dimensioni medie dell'impronta a terra dei fotogrammi che dalla percentuale di sovrapposizione degli stessi. Viene creata un'immagine ortorettificata per ciascuna cella del grigliato e fatta successivamente la mosaicatura delle varie immagini ottenute. Il prodotto risultante è mostrato in Figura 2.



*Figura 2 – Ortofoto con sovrapposizione dei punti laser*

Da un'accurata analisi del prodotto, si può rilevare che esso risulta essere ottimale nelle zone riproducenti il terreno, mentre non è accettabile per tutti quegli oggetti che si elevano dallo stesso (Figura 3). L'ortofoto è stata infatti generata utilizzando un modello tridimensionale epurato dal rilievo degli edifici. Un'altra fonte di errore è data dalla mosaicatura dell'ortofoto. Questa operazione viene eseguita automaticamente dal programma sia per quanto riguarda la scelta dei fotogrammi da impiegare che per la delimitazione delle zone di mosaicatura. La Figura 3 mostra lo *shift* sul tetto di un edificio (A) dell'ordine delle decine di centimetri dovuto alla combinazione dei due fattori, mentre si può notare che in corrispondenza del terreno (C) non vi sono *shift* apprezzabili. In (B) risulta evidente l'effetto dovuto alla quota degli edifici.



*Figura 3 – Accuratezza qualitativa del prodotto di ortorettifica*

Per valutare qualitativamente il prodotto, si esegue un'accurata analisi visiva del DTM sovrapposto all'ortofoto. Nel caso vi siano scostamenti evidenti tra particolari omologhi (immagine-dato laser) è consigliata l'adozione della procedura di affinamento dei parametri di orientamento esterno dei fotogrammi impiegati per la generazione dell'ortofoto. Questa tecnica consiste nell'inserire nelle zone di sovrapposizione di ciascun fotogramma i cosiddetti *tie-point*, vale a dire punti di legame tramite i quali successivamente si ricalcolano i suddetti parametri impiegando i principi matematici propri della fotogrammetria. E' bene inserire tali punti nel maggior numero possibile di fotogrammi per ciascuna strisciata ed in numero non inferiore a 5-6 per ciascun fotogramma. Per rendere il metodo più efficace è preferibile che il posizionamento dei punti sia arealmente uniforme sul fotogramma stesso. Una volta inseriti i *tie-point*, viene lanciata la procedura di elaborazione. Alla fine viene proposto il *report* dei risultati della rielaborazione: da questo si può evincere se i *tie-point* stessi sono stati inseriti correttamente o meno. Se il risultato viene considerato accettabile, si lancia un'altra elaborazione che permette il ricalcolo dei parametri di orientamento esterno di ogni singolo fotogramma. Questa procedura è di tipo iterativo: solitamente la convergenza la si raggiunge dopo due, al massimo tre iterazioni. Infine si rigenera l'ortofoto con i parametri così definiti.

### Integrazioni con la fotogrammetria

Si è voluto iniziare una serie di studi per validare i parametri di orientamento esterno forniti dal sistema *laser scanning*.

In ambiente *StereoView* (Menci *software*) si è orientata una coppia stereoscopica utilizzando direttamente i parametri di orientamento esterno (POE) di ciascun fotogramma ricavati precedentemente all'applicazione della procedura di affinamento dei POE.

Le parallassi residue riscontrate sul modello hanno messo in luce errori nell'orientamento non eliminati. Test successivi realizzati dall'azienda che ha realizzato il rilievo, hanno riscontrato in effetti una non perfetta calibrazione del sensore INS posizionato a bordo. A seguito di questo esperimento si è voluta verificare l'efficacia della procedura di affinamento dei POE.

Nel secondo test effettuato il modello è stato creato utilizzando la procedura tradizionale di orientamento interno, relativo ed assoluto. La fase di orientamento esterno è stata realizzata grazie all'impiego di Punti Fotogrammetrici d'Appoggio (PFA) definiti in ambiente *MicroStation* analizzando congiuntamente il dato *laser* e l'ortofoto rigenerata.

In seguito è stato generato il DTM della zona in modalità semi-automatica secondo un grigliato regolare con passo 1 metro per 1 metro. Il confronto tra il DTM così ottenuto e quello *laser scanning* interpolato opportunamente sulla stessa griglia, ha dato luogo alle differenze mostrate nelle figure 4 e 5.

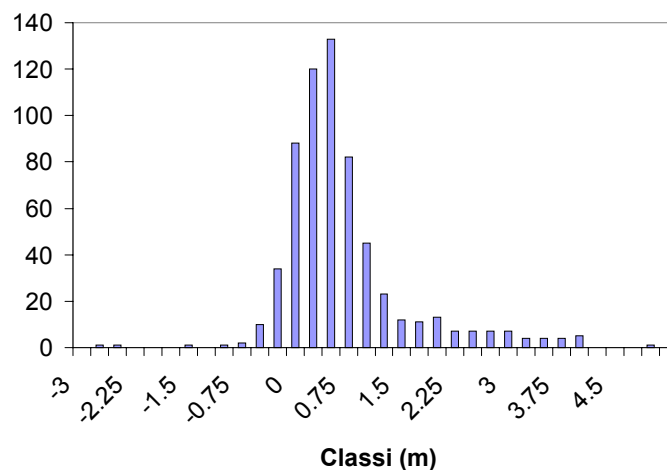


Figura 4 – Istogramma delle frequenze relative alle differenze fra i due DTM (DTM LS – DTM Fotog.; classi ogni 10 cm)

Dai confronti effettuati risultano essere presenti differenze dell'ordine dei 20÷60 cm con deviazione standard dell'ordine dei 45÷75 cm. Tale risultato è dovuto al tipo di morfologia del terreno ed alla presenza di svariati elementi cosiddetti di "disturbo", quali ad esempio bassa vegetazione, presenza di uno specchio d'acqua, superficie irregolare (presenza di grossi massi). Tutto questo porta ad una classificazione non del tutto ineccepibile per quanto riguarda i punti laser che risultano essere in genere a quote maggiori rispetto ai corrispondenti punti fotogrammetrici. Per comprendere l'esatta collocazione degli scostamenti maggiori tra i due DTM, si è sovrapposto all'ortofoto della zona interessata il modello a isoipse delle differenze. Analizzando l'immagine (Figura 5) si può notare che i valori estremi che escono dal campo di accettabilità (esterni a  $\pm 1,5$  metri) sono localizzati in corrispondenza di zone vegetate.

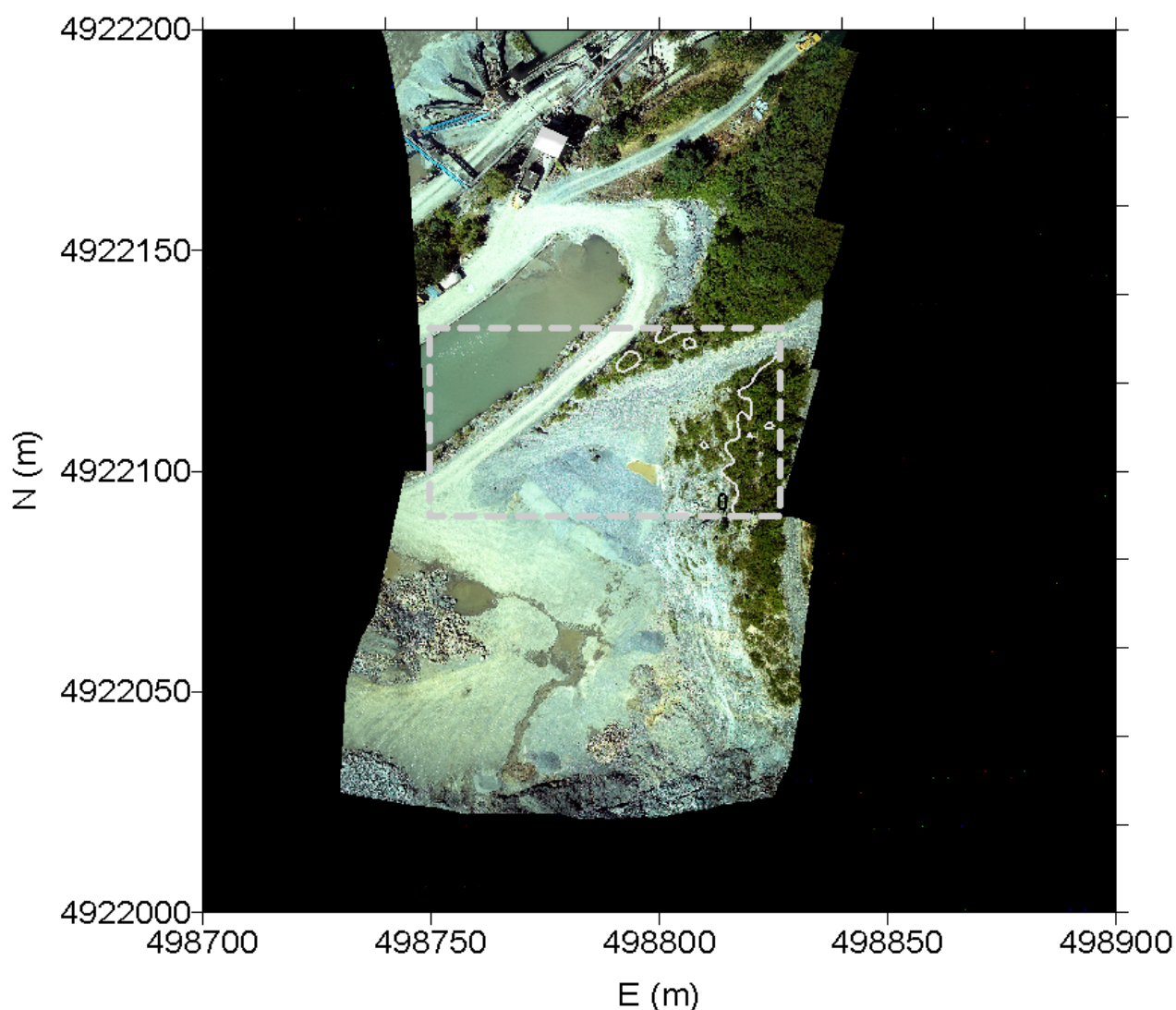


Figura 5 - Confronto tra il DTM generato con il laser scanning e il DTM di riferimento; le differenze in forma di isoipse sono state sovrapposte all'ortofoto: nero = linea di scostamento dei  $-1.5$  metri; grigio = linea di scostamento dei  $+1.5$  metri

In tali zone si presume che il sistema *laser scanning* non abbia ben interpretato il terreno.

E' stata fatta anche la restituzione di elementi antropici distintamente riconoscibili e successivamente sovrapposta all'ortofoto generata col processo di *TerraPhoto*. Il risultato che si è ottenuto è soddisfacente per quanto riguarda una cartografia a scala 1:2000 o inferiore (Figura 6). Come si può evidenziare dal particolare riportato, lo scostamento che si ha della linea di restituzione dell'argine del laghetto con l'immagine dello stesso, risulta dell'ordine dei 50 cm. Sia nel confronto tra DTM che nella valutazione degli scostamenti tra ortofoto e restituzione vettoriale, si evince che il prodotto fotogrammetrico non si scosta significativamente da quello laser scanning. Questo conferma l'efficacia della procedura di affinamento dei POE realizzata in ambiente MicroStation.

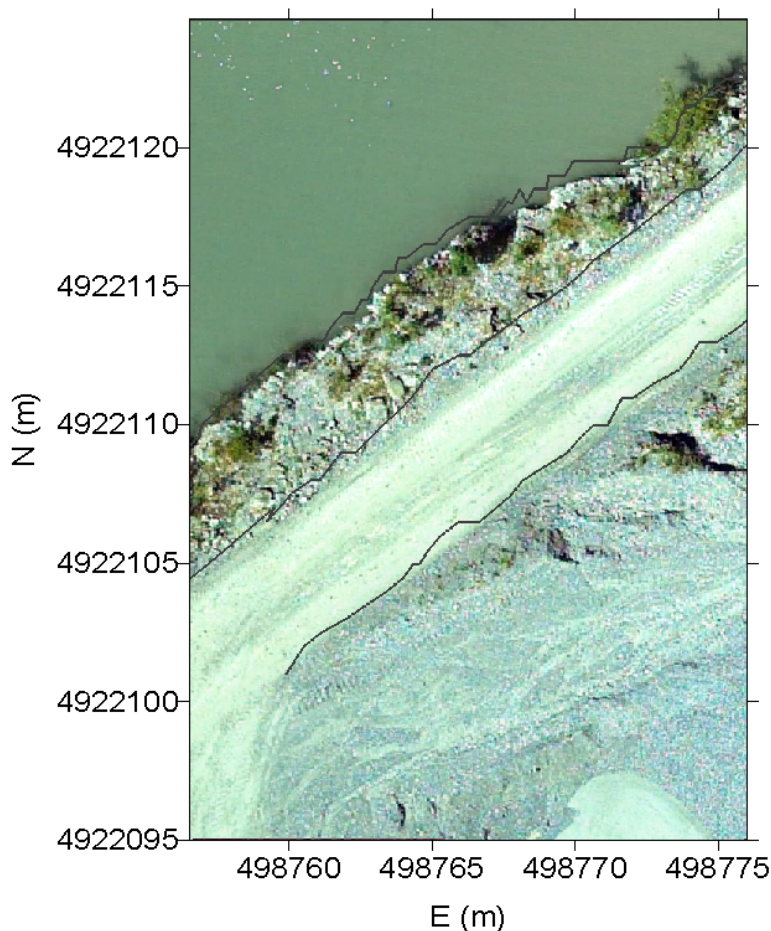


Figura 6 – Particolari della restituzione sovrapposta all'ortofoto rigenerata (dato laser scanning)

### Conclusioni

E' stata presa in esame una zona campione sulla quale si è eseguito un rilievo *laser scanning* utilizzando il sistema *TopEye* con acquisizione di immagini digitali, in modo tale da poter ottenere coppie di stereogrammi.

La località in esame è Molassana in provincia di Genova. La scelta è qui ricaduta in quanto presenta caratteristiche morfologiche ed antropiche ideali per testare il sistema in differenti condizioni di operatività.

Successivamente all'acquisizione dei dati, sono state effettuate tutte le elaborazioni necessarie per estrapolare quei dati *laser* necessari per l'ottenimento del DTM. Tramite questo si è creata l'ortofoto utilizzando le immagini digitali per mezzo del *software TerraPhoto*.

Si è utilizzata la fotogrammetria per la validazione dei parametri di orientamento esterno (POE) forniti dal sistema integrato *laser scanning*. A seguito delle procedure di affinamento dei POE realizzate in ambiente MicroStation si è realizzato l'orientamento esterno di un modello

opportunamente scelto avvalendosi dei PFA individuati dalla sovrapposizione del dato *laser* con l'ortofoto rigenerata.

Il confronto tra un DTM prodotto in ambiente *StereoView* con quello creato dal dato laser scanning ha evidenziato una buona corrispondenza tra i prodotti. Questo indica che la procedura di affinamento dell'ortofoto risulta essere efficace. Il *laser scanning* integrato con camera fotogrammetrica può perciò essere considerato un metodo rapido ed efficace oltre che per la generazione di accurati DTM di vaste zone, per la produzione di ortofoto e per la determinazione di PFA specialmente in zone ove i metodi tradizionali di rilievo risultano difficilmente applicabili.

### **Ringraziamenti**

Si ringrazia il Comune di Molassana, il Consorzio RT3 Auselda AED Group per aver gentilmente concesso i dati necessari alla sperimentazione ed in particolare il Professor Maurizio Barbarella per la sua costante disponibilità.

### **Riferimenti**

- Ackermann F., 1996. "Airborne laser scanning for elevation models". GIM, Vol.10 n.10 .
- Al-Bayari O., 2000. "Some Problems in Kinematic Airborne Laser Survey". Reports on Geodesy, 6th Geodetic Millennium Meeting Poland-Italy.
- Al-Bayari O., Barbarella M., Fazio C., Pellegrinelli P., Sanna G., 2001. "Confronti tra Superfici Generate con Laser Scanning". Atti della 4<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, 3 – 6 ottobre 2000.
- Al-Bayari O., Barbarella M., Dubbini M., Zippilli C., 2000. "Alcuni studi sull'utilizzo del Laser Scanning inerenti a problematiche di tipo topografico". Atti della 4<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, 3 – 6 ottobre 2000.
- Baltsavias, E. P., 1999. "A comparison between photogrammetry and laser scanning". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3), 83-94.
- Casella V., Galetto R., Spalla A., 2000. "Il Progetto di Ricerca Cofin98 sull'impiego del laser a scansione". Bollettino della SIFET (2000 2), 13-26.
- Dequal S., Rinaudo F., 1995. La fotogrammetria digitale. Bollettino SIFET 2/1995.
- Dequal S., A. Lingua, Rinaudo F., 2000. Ortofoto di precisione a grande scala in ambito urbano. Atti della 4a Conferenza Nazionale ASITA, 3 – 6 ottobre 2000.
- Kilian J., Haala N, English M.1(1996). "Capture and Evaluation of airborne laser scanner data". Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing XXXI, 383-388, part B3.
- Kraus K., Pfeifer N.,1998. "Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne laser Scanner data". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol 53 No 4, pp 193-200.
- TopEye Manual reference; <http://www.combitech.se/survey/topeye/>