

Nuove esperienze di documentazione territoriale con tecnologia LIDAR del B.I.M. dell'Adige ed analisi critica delle risultanze

Narciso Bonuzzi (*), Giampaolo Mistura (**), Marco Michelini (***), Mario Fondelli (****), Mario Gasperi (*****), Simone Ceresini e Andrea Orsi (*****).

(*) Consulente del Consorzio di Bacino Imbrifero Montano dell'Adige della Provincia di Verona
Via Barco di Sotto 1, 37030 Lavagno (VR), Tel. 045.983229, e-mail: narcisobonuzzi@gmail.com

(**) Professore Associato, Dipartimento di Fisica G. Galilei, Università di Padova, Via F. Marzolo 8, 35121 Padova
Tel. 049.8277020, e-mail: giampaolo.mistura@unipd.it

(***) Fotogrammetra, Studio A, Via Antonio Meucci 3, 50015 Grassano, Bagno a Ripoli (FI)
Tel. 055.644081, e-mail tecnico@studioafi.it

(****) Già Professore Ordinario di Topografia nella facoltà di ingegneria dell'Università di Firenze e
Università IUAV di Venezia, Facoltà di Pianificazione del Territorio, Via Jacopo Nardi 50, 50132 Firenze
Tel. 055.243898, e-mail: m.fondelli@3consulting.it

(*****) MG URBAN PLANNING, Via Seregnano 50/A Loc. Civezzano, 38045 Trento, Tel. 0461.858860
e-mail: gasperimario@gmail.com

(*****) Esperti tecnologia LIDAR, BlomCGR, Via Cremonese 35, Parma, Tel. 0521994948
e-mail: simone.ceresini@blomasa.com – andrea.orsi@blomasa.com

Riassunto

La coincidenza di un rilievo su area vasta con la tecnologia a sensore passivo quale quella aerofotogrammetrica e a sensore attivo *laser scanning* – *LiDAR* ha offerto l'opportunità di metterle a confronto per valutarne le peculiarità in termini metrico/qualitativi. In particolare è stata posta attenzione alla quarta risposta del segnale laser ossia all'intensità per valutare se questa preziosa informazione poteva essere messa in relazione con le precisioni del rilievo.

Abstract

I find the coincidence of a vast areas of the passive sensor technology such as that aerophotogrammetric and the active laser sensor scanning – LiDAR has the opportunity to compare them to assess their characteristics in terms metric / qualitative. In particular attention was paid to the fourth response of the laser signal intensity or to determine whether this valuable information could be related with the precision of the survey.

Il Consorzio del Bacino Imbrifero Montano dell'Adige di Verona, di seguito denominato Consorzio B.I.M. Adige, riunisce quell'insieme di territori, perimetrati per decreto del Ministero dei Lavori Pubblici, le cui acque confluiscono in un ampio territorio circostante, punto di confluenza di un intero sistema idrografico, ovvero la valle dell'Adige e il Lago di Garda.

Ad esso aderiscono ventinove comuni: Malcesine, Ferrara di Monte Baldo, Brentino Belluno, San Zeno di Montagna, Caprino Veronese, Rivoli Veronese, Dolcè, Sant'Anna d'Alfaedo, Fumane, Sant'Ambrogio di Valpolicella, Marano di Valpolicella, Negrar, Boscochiesanuova, Grezzana, Cerro Veronese, Roveré Veronese, Erbezzo, Velo Veronese, San Mauro di Saline, Verona, Mezzane di Sotto, Selva di Progno, Badia Calavena, Tregnago, Vestenanova, San Giovanni Ilarione, Cazzano di Tramigna, Roncà, Montecchia di Crosara.

Il Consorzio B.I.M. Adige, costituitosi nel 1954, è il destinatario degli indennizzi per i disagi conseguenti alla realizzazione di bacini, impianti per la produzione di energia idroelettrica nelle aree montane previsti dall'applicazione della Legge 27 dicembre 1953 n. 959, (detta anche Legge sull'Economia Montana) la quale prevede un sovracanoone a carico dei concessionari di derivazioni

d'acqua pubblica finalizzata alla produzione di forza motrice, e di quanti hanno opere di presa sopra i 500 metri all'interno del bacino imbrifero dell'Adige.

In coerenza con quanto indicato nella Legge suddetta, il Consorzio B.I.M. Adige, all'art. 2 del proprio Statuto, ha posto, quale obiettivo centrale della propria operatività, l'attivazione di tutte le iniziative e le incentivazioni idonee a favorire lo sviluppo economico e sociale della montagna veronese secondo una programmazione triennale da realizzare con investimenti annuali specificamente destinati.

Considerato che le realtà comunali ricomprese nell'ambito territoriale consortile, sono caratterizzate da:

- territori di dimensioni modeste con peculiarità altimetriche tali da comportare disagi nella fornitura dei servizi e nelle attività di controllo;
- strutture gestionali assai ridotte (uffici tecnici sguarniti e/o affidati a personale esterno);
- conoscenza approssimativa del territorio, conseguente a rilievi parziali, spesso realizzati in modo impreciso e/o da terzi con inadeguata competenza;
- cronica carenza di risorse umane e tecnologiche

e rilevato, altresì, che per tutti i Comuni è vitale la conoscenza puntuale del proprio territorio e la possibilità di seguirne l'evoluzione in tempo reale, il Consorzio B.I.M. Adige ha da tempo posto in essere il progetto "SER.P.I.CO." (Servizi Permanenti Informativi Comunali), che si configura come un intervento strategico globale di sistema finalizzato a fronteggiare e risolvere le difficoltà funzionali proprie dei sistemi operativi dei singoli Comuni.

L'impiego costante e organicamente strutturato di tecnologie innovative al servizio della struttura organizzativa del Consorzio B.I.M. Adige in appoggio alle realtà locali, ha consentito di sviluppare sinergie ad alta efficienza e stringente efficacia operativa.

Ciò ha garantito, oltre ad un'altrimenti impensabile linearità di funzionamento, anche notevoli vantaggi in termini economici e temporali, favorendo, aspetto di non minore importanza, l'integrazione armonica di ambienti amministrativi non sempre in grado di assettarsi adeguatamente fra loro in modo veloce e proficuo.

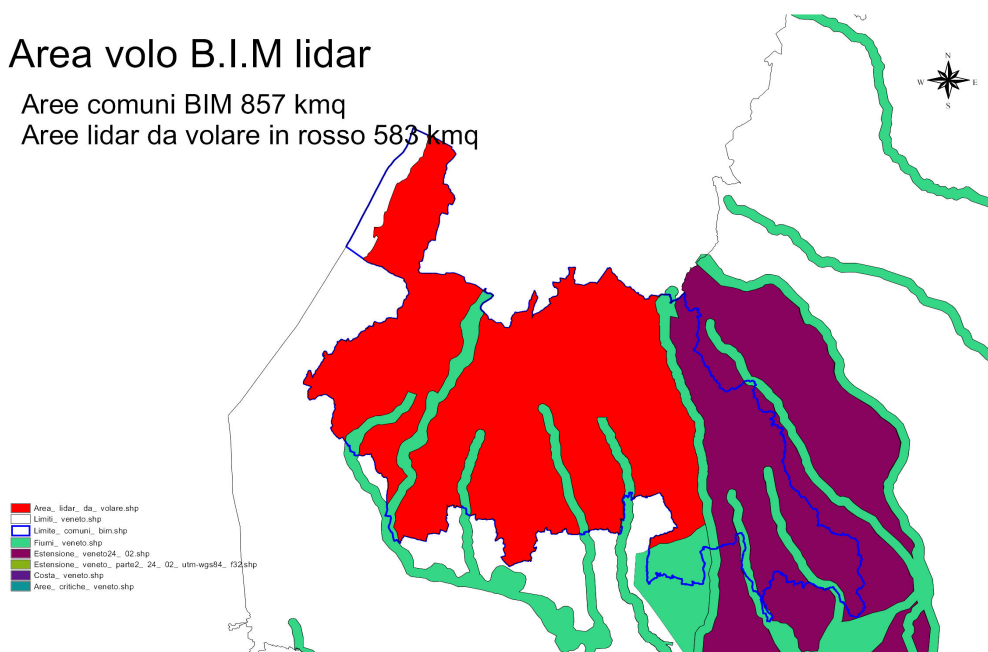
Ne è nata una sorta di holding tecnico-amministrativa funzionalmente calibrata sulle complesse esigenze di un territorio articolato e multiforme, ancorché sostanzialmente omogeneo sul piano ambientale, morfo-geologico e amministrativo.

Dopo la costituzione del polo tecnico presso il Consorzio B.I.M. Adige, che garantisce nel tempo, la raccolta e la diffusione di dati e servizi ai Comuni, è scaturita l'urgenza di adeguare i sistemi informativi comunali con dati aggiornati e innovativi; pertanto a seguito dell'avvio dei lavori di formazione della nuova CTRN e DB geografico in collaborazione con la Regione del Veneto, e del visualizzatore nadirale/prospettico metricamente sensibile, è stata avviata la campagna di voli per l'acquisizione della scansione laser aerea di parte del territorio consortile.

Tale rilievo è integrato nel Progetto Nazionale di Telerilevamento del Ministero dell'Ambiente a completamento di quanto già realizzato dal Ministero rappresentato nella figura seguente:

Area volo B.I.M lidar

Aree comuni BIM 857 kmq
 Aree lidar da volare in rosso 583 kmq



1. Territorio interessato dal progetto del rilievo Laser Scanning-LiDAR.

Al progredire della domanda di informazioni territoriali per la gestione delle risorse naturali e antropiche ha offerto in questi ultimi tempi, un prezioso contributo il *laser scanning 3D*, nella sua applicazione aerospaziale *LiDAR (Light Detection And Ranging)*. Un sistema ottico di prospezione a scansione, che usa lunghezze d'onda ultraviolette, nel visibile o nel vicino infrarosso, utilizzando la tecnologia *laser* per misurare la distanza tra il punto di emanazione dell'impulso laser e gli ostacoli che ne generano la riflessione, per ricavare modelli digitali virtuali delle superfici *DSM (Digital Surface Model)* e *DTM (Digital Terrain Model)*, con una notevole densità di punti del relativo spazio XYZ, caratterizzati da una alta georeferenziazione spaziale.

Allo stato dell'arte, come noto, gli orientamenti operativi nel settore dei rilevamenti ambientali, tendono, in generale, a preferire le tecnologie dei sistemi di *remote sensing* attivi. I principali vantaggi di queste tecnologie sembrano risiedere nell'elevata precisione assicurata dai dati osservati, nella immediatezza delle misure, nella sensibilità alla natura fisica degli oggetti illuminati, nel controllo della sorgente di energia emessa. E questo, perché l'acquisizione dei dati osservati presenta alcuni importanti meriti operativi rispetto alle tradizionali tecnologie passive, come l'aerofotogrammetria, dato che la resa finale delle misure non è influenzata dal livello di insolazione degli oggetti osservati e il sensore attivo non è direttamente disturbato dalle variazioni meteorologiche.

Ricerche sperimentali hanno recentemente messo in luce che la percezione della forma non è soltanto un problema di geometria spaziale, ma soprattutto un problema fisico degli oggetti illuminati, dato che la precisione metrica conseguibile nei processi di rilevamento *LiDAR* può variare al mutare delle proprietà fisiche dei materiali costituenti gli oggetti di volta in volta esaminati. Poiché la luminosità del segnale di ritorno all'emittente laser scanner, dagli oggetti di volta in volta illuminati, derivante dal bilancio energetico tra emissione, assorbimento e riflessione, differisce al variare della natura fisica propria degli stessi materiali interessati, della loro porosità intrinseca e della loro posizione nello spazio 3D che li accoglie.

Al fine di colmare, almeno in via preliminare, le lacune finora rilevate sulla surrogabilità o meno dei dati osservati con l'uno o l'altro sistema, in relazione ad una loro integrazione reciproca, per un monitoraggio nel tempo degli stati di consistenza e di conservazione del patrimonio architettonico ed ambientale, è stato dato avvio di recente ad una valutazione delle discrepanze deducibili dal confronto dei modelli digitali del terreno di una stessa area campione territoriale, ottenibili dall'alternata applicazione delle due diverse metodologie, passiva e attiva.

Per questa preventiva analisi sperimentale, è stato prezioso il *test* offerto dalla documentazione in corso d'opera dell'area del Consorzio B.I.M. Adige, sottoposta ad una copertura aerofotogrammetria a colori, realizzata con *Digital Mapping Camera DMC* dalla quota relativa media di volo di 1.700 m circa, e ad una congiunta scansione laser della stessa area territoriale, tramite il *Sistema Lidar Optech Pegasus*, operante da quota relativa di 1.600 m circa, ottenendo una densità media di punti pari a circa 2 punti/m². Sensore di ultima generazione che ha le seguenti caratteristiche:

Parametri	Caratteristiche
Operatività	Tra 300m e 2500 m di quota di volo relativa
Accuratezza orizzontale	1/5.500 x quota di volo relativa; 1 σ
Accuratezza verticale (1 σ)	< 5 – 15 cm; 1 σ
Acquisizione dell'impulso	4 misure per ciascun impulso
Acquisizione dell'intensità	12 bit dinamici per ciascuna misura
Angolo di scansione	Programmabile fino a 65° max
Abbracciamento	Variabile da 0 a 0,93 x la quota relativa (m)
Sistema GPS/inerziale	Applanix-Optec custom POS con ricevitore interno a 12 canali Dual frequency a 10 kHz
Frequenza di scansione	Programmabile da 100 a 400 kHz
Divergenza del raggio laser	0,20 mrad (impronta a terra di 20 cm a 1000 m di quota)

Un *test* quello sviluppato, che fatte le debite constatazioni qualitative e dimensionali, poteva fornire appunto validi elementi di giudizio e di indirizzo per un eventuale più approfondito confronto tra i due diversi sistemi di *remote sensing*, quello LiDAR e quello aerofotogrammetrico, mirato soprattutto alla documentazione del patrimonio architettonico ambientale per la relativa salvaguardia delle risorse naturali ed antropiche.

Prendendo le mosse dall'opportunità di verificare l'affidabilità di un rilevamento topo-cartografico realizzato a partire da una copertura aerofotogrammetrica digitale a colori, e la corrispondente affidabilità di una sistematica scansione *LiDAR*, interessanti ognuna la stessa area sperimentale territoriale, si è così provveduto ad un approfondito saggio comparativo degli elaborati prodotti dai due sistemi, e successivamente ai necessari diretti riscontri di verità sul terreno.

L'esame è stato effettuato portando a confronto varie sezioni longitudinali altimetriche della stessa lunghezza di 500 m circa, opportunamente situate ed orientate: sono stati confrontati i due diversi modelli digitali virtuali risultanti, ottenuti dall'applicazione coniugata del sistema fotogrammetrico passivo e del sistema *LiDAR* attivo, nonché del rilevamento topografico diretto *GPS* per il necessario controllo metrico finale.

Dall'insieme delle 15 sezioni *test* realizzate ne sono state estratte in seguito 3 a campione per una più approfondita diretta verifica a verità sul terreno, mediante appropriate e accurate determinazione *GPS*.

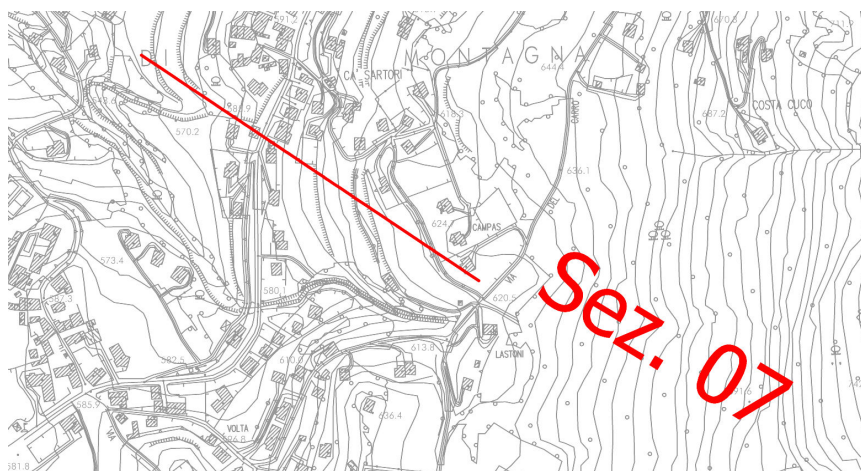
I risultati ottenuti dalle comparazioni medesime sono definiti dalle discrepanze altimetriche medie quadratiche che seguono:

- scansione *LiDAR* - cartografia aerofotogrammetria: $\pm 0,19$ m
- scansione *LiDAR* - verità a terra *GPS*: $\pm 0,25$ m
- cartografia aerofotogrammetria - verità a terra *GPS*: $\pm 0,23$ m

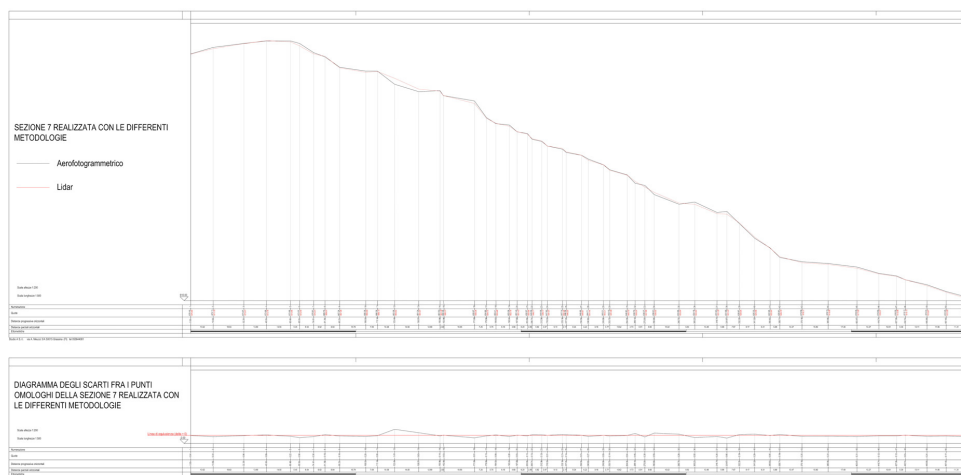
che chiaramente mostrano come le discrepanze fra le misure attive e quelle passive, od errori sperimentali di misura, presentino fra loro una congruente omogeneità e compatibilità.

Entità definite, nelle misure col *LiDAR*, dalla variazione del segnale laser di ritorno, definita dalla variazione dell'intensità della luminanza riflessa, che secondo quanto mostra il diagramma della sezione 7, sembra condensare i valori minori delle discrepanze nelle aree di maggior riflessione degli oggetti illuminati ed i relativi valori maggiori in quelle di minor riflessione, o di maggior assorbimento. Nel diagramma la graduazione dei livelli dell'intensità di luminanza riflessa è stata espressa per maggior evidenza attraverso una semplice scalatura decimale.

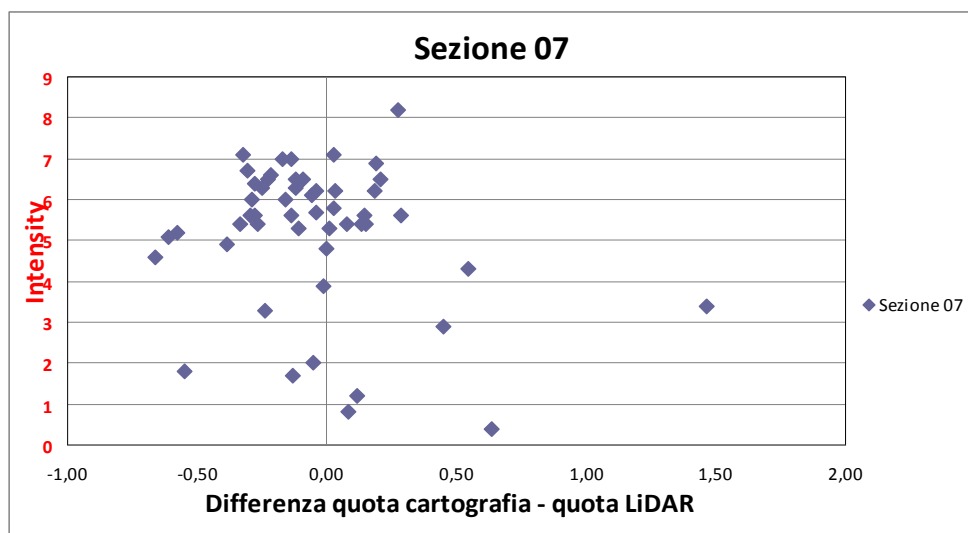
Per maggior chiarezza sono riferiti di seguito per la medesima sezione 7 a campione, nell'ordine: la rappresentazione cartografica del territorio interessato dalla sezione campione, i profili altimetrici derivati dal metodo aerofotogrammetrico, dall'esplorazione LIDAR e dalle determinazioni *GPS a verità* sul terreno, nonché la distribuzione di densità degli scarti ottenuti in relazione all'intensità della relativa luminanza di ritorno.



2. Tracciato su CTRN della sezione n. 7 di verifica e controllo dei diversi rilievi.



3. Grafico dei profili aerofotogrammetrico-LiDAR-GPS della sezione n. 7.



4. Grafico di dispersione della misura di intensità riferita alle differenze di quota tra il rilievo aerofotogrammetrico e quello LiDAR.

Fatte le opportune riserve sull'accuratezza o meno delle analogie proposte, il *test* sviluppato sembra dunque evidenziare la possibilità di ottenere un'affidabile omogeneità metrica e qualitativa dei dati numerici ricavabili dall'applicazione simultanea delle tre diverse metodologie sperimentate messe a confronto. Per cui se ne può agevolmente dedurre, che il loro impiego nel monitoraggio programmato degli stati di consistenza e salvaguardia del patrimonio architettonico ed ambientale, non possa sollevare incertezze nella loro alternanza operativa, quando rimangano identiche le condizioni della misura.

Ampiamente confermato appare comunque l'interesse scientifico dell'*intensità della luminanza riflessa*, nella corretta interpretazione dei dati provenienti dal *sistema attivo*, poiché consente di attribuire il grado di affidabilità dei dati osservati e di selezionarne la relativa qualità informativa. Così come, appare importante l'incremento della *densità della nuvola di punti* per unità di superficie, preziosa per assicurare ai dati metrici richiesti una migliore accuratezza.

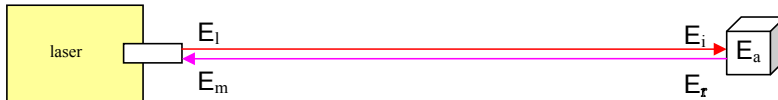
Una sorta di metadati questi, indispensabili per l'apprezzamento della precisione della misura metrica e per rilevare altresì la discontinuità delle caratteristiche fisiche dei materiali costitutivi degli oggetti terrestri di volta in volta illuminati dalla sorgente energetica controllata. Visto che, riepilogando, l'intensità del segnale retroriflesso può esprimere il peso da attribuire al dato osservato, mentre la densità dei punti della nuvola può altresì esprimere l'accuratezza del DTM dal quale potrà essere infine estratto lo stesso dato osservato.

È comunque evidente come il sistema attivo LIDAR possa avere ulteriori imprevedibili sviluppi con l'acquisizione dei modelli digitali virtuali degli oggetti esplorati, quando la tecnologia *laser scanning* sarà in grado di realizzare, con la nuvola di punti dello spazio XYZ considerato, anche la copertura fotografica dello stesso spazio, mediante l'impiego di opportune fotocamere metriche digitali coassiali incorporate nel medesimo sensore attivo.

Dalla fusione delle metodologie attiva e passiva, sembrerebbe possibile pervenire infine anche alla percezione della firma spettrale degli stessi oggetti illuminati, utile a riconoscerne nel contempo la loro natura fisica e tecnologica.

Dall'analisi comparata di tutte le quindici sezioni di controllo rilevate con particolare riguardo al valore dell'intensità del raggio riflesso o intensità misurata che contiene informazioni sulla natura della superficie riflettente, si è provveduto a tracciare un bilancio energetico del lanciato fascio

luminoso emesso dalla strumentazione laser per evidenziare, sinteticamente, alcuni elementi utili al confronto:



E_l = energia emessa dal laser;

E_i = energia incidente;

E_a = energia assorbita;

E_r = energia riflessa;

E_m = energia misurata;

da cui,
$$E_i = E_l - E_a \quad [1]$$

L'energia riflessa dalla superficie E_r può essere espressa come

$$E_r = E_i \times R \quad [2]$$

dove R è il coefficiente di riflessione o riflettanza che dipende da moltissimi fattori, tra cui la natura della superficie riflettente. La riflettanza è una quantità adimensionale e numericamente $0 \leq R < 1$ dove i due valori limite 0 (1) si riferiscono ai casi ideali di un corpo perfettamente assorbente (riflettente).

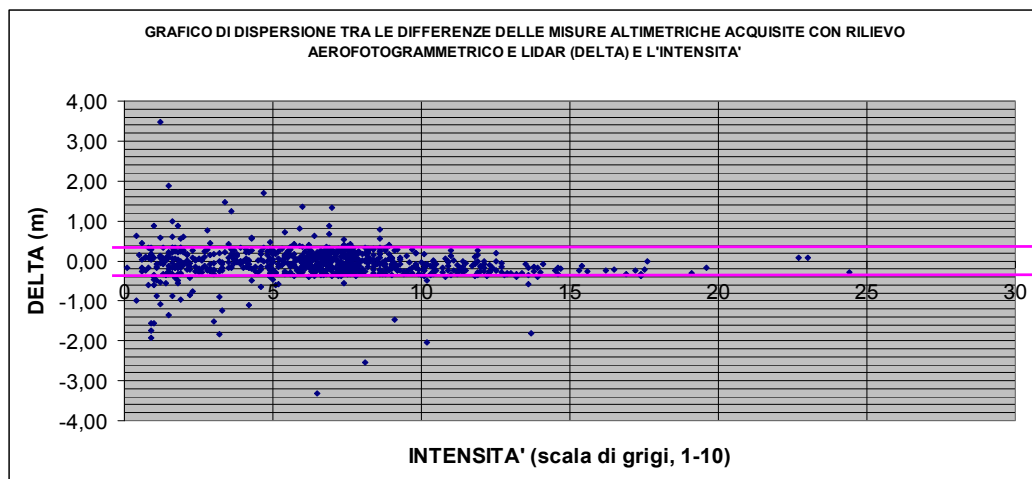
L'energia misurata dal rivelatore montato sull'aereo E_m è quindi il risultato del bilancio energetico

$$E_m = (E_i - E_a) \times R - E_a \quad [3]$$

Se si considera un'area media della sezione a terra del fascio luminoso A , le considerazioni precedenti possono applicarsi anche alle corrispondenti intensità luminose essendo le intensità proporzionali al rapporto E/A .

L'ingegnerizzazione digitale ha reso le strumentazioni elettroniche utilizzate oggi estremamente efficienti; pertanto, considerato che nella tecnica LIDAR il segnale laser riflesso spegne un temporizzatore che conta il tempo di volo del fascio dalla sua emissione alla sua rivelazione, è lecito assumere che questa operazione non sia influenzata dall'intensità misurata, se questa è superiore ad una determinata soglia. In altre parole, possiamo aspettarci che la determinazione altimetrica non sia influenzata dal valore dell'intensità del fascio.

Per verificare questa ipotesi sono stati prese in considerazione simultaneamente i dati delle quindici sezioni di controllo acquisite a campione sul comprensorio. Le misure LIDAR sono state confrontate con quelle effettuate con il rilievo aerofotogrammetrico. La differenza tra le due misure, indicata con delta, è stata graficata in funzione dell'intensità rilevata del fascio laser.



5. Grafico di dispersione della misura di intensità riferita alla differenze di quota tra il rilievo aerofotogrammetrico e quello LiDAR per tutte le quindici sezioni.

Come si vede, nell'intervallo di intensità esplorato compreso tra 1 e 10 i valori Delta si distribuiscono in modo essenzialmente uniforme in una fascia orizzontale avente una larghezza (dispersione) pari a circa 20÷30 cm. I valori più lontani da questa fascia sono dovuti ad errori accidentali corrispondenti a situazioni anomale che disturbano la misura (alberi, siepi, ombre, fabbricati, ecc.) che possono essere eliminati, di cui si fornisce esempio di seguito:

Punto	est	nord	Z-cartografia	Z-LiDAR	delta	note	intensità
38	634860.96	5054981.14	631.88	631.22	-0.66	Siepe	4.6



6. Posizione del raggio laser corrispondente a situazione anomala che ne disturba la misura.

Il risultato finale del *test* è chiaro: le incertezze sulla rilevazione non dipendono dall'intensità rilevata del fascio laser e sono comprese in un intervallo (una deviazione standard) di circa 20÷30 cm. Si ribadisce quindi che la precisione non è influenzata direttamente dall'intensità del raggio riflesso, gli errori si distribuiscono in modo gaussiano indipendentemente dall'intensità misurata.

È evidente quindi, a meno di ulteriori riflessioni, che un'interessante ipotesi di lavoro è quella di sfruttare l'intensità del fascio laser riflesso per la classificazione dei materiali riflettenti (biomasse, amianto, ecc). Proprio la quantificazione e classificazione delle biomasse presenti sulla montagna veronese potrebbe essere uno dei settori sui quali il Consorzio B.I.M. Adige potrebbe orientare la propria attenzione, utilizzando il rilievo *laser scanning - LiDAR*, nell'immediato futuro.

Riferimenti bibliografici

(M. Fondelli, M. Gasperi, A. Floris 2010), "Analisi qualitativa del dato LiDAR nell'informazione territoriale ad alta risoluzione". Atti 14° Conferenza Nazionale ASITA. Brescia 9-12 novembre 2010.

(M. Kasser and Y. Egels 2002), "Digital Photogrammetry". Taylor & Francis Ltd. London, 2002.

(US Geological Service NGP 2010), "Lidar Guidelines and Base Specification". February 22, 2010.