

## **Analisi qualitativa del dato LiDAR nell'informazione territoriale ad alta risoluzione**

Mario Fondelli (\*), Mario Gasperi (\*\*), Antonio Floris (\*\*\*)

(\*). 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@3fconsulting.it

(\*\*). MG URBAN PLANNING, Via Seregnano, 50/A Loc. Civezzano - 38045 Trento, Tel. 0461 858860, e-mail: gasperimario@gmail.com

(\*\*\*). Consiglio per la Ricerca in Agricoltura, Unità per il Monitoraggio e la Pianificazione forestale (CRA - MPF), P.zza Nicolini, 6 Loc. Villazzano - 38100 Trento, Tel. 0461 381113, Fax. 0461 381131 e-mail: antonio.floris@entecra.it.

### **Abstract**

*This paper will focus on validation of accuracy and precision metric of LiDAR data being used for representation of 3D digital terrain model comparing to digital model obtained by processing total station surveys data. The latter represents the ground truth in data acquisition techniques and is obtained by celerimetry whose accuracy has consolidated in time. Differences between datasets obtained through LiDAR and the latter techniques will be investigated and so will any possibility of integration. Will the adoption of LIDAR techniques resolve in the substitution of consolidated topographic techniques rather than integrate with them? Moreover, is topographic land survey mapping still necessary when fair quality LiDAR data may be available? Are there inaccuracies and anomalies in models obtained by processing LiDAR capture data? And if any exist, where are they? Although remote sensing of land by means of traditional celerimetric methods and LiDAR laser scanning - whose accuracy is only statistical determined deeply differ in the way data stream is handled, will they nevertheless maintain information coherency? Some more theoretical concepts and historical background will complete this work.*

### **Introduzione**

Al progredire della domanda di informazioni territoriali ha offerto in questi ultimi tempi un contributo essenziale l'applicazione della tecnologia LiDAR. Contributo che pone il problema di un approfondimento delle possibilità e sinergie che questa tecnologia può offrire alla prospezione ed alla conoscenza delle risorse naturali ed ambientali. La ricerca descritta nella presente comunicazione scientifica ha come obiettivo primario la messa a punto di una metodologia di verifica del grado di accuratezza e precisione metrica dei geodati avionici LiDAR, fondata sul confronto con dataset di verità a terra acquisiti con levate topografiche regolari tramite stazione totale servoassistita. Verifica metrico-qualitativa per profili di sezione su direttrici critiche con un'analisi specifica per *breaklines*, zone vegetate, viabilità, antropizzato, completata da uno studio distribuito dei dati prodotti con le tecniche in parola. Lo studio geometrico dimensionale ha consentito di stilare una matrice delle risultanti RMSE lineari, scaturite dalle indagini condotte sulle varie tipologie di superfici presenti all'interno del poligono sperimentale; particolarmente interessante l'accuratezza generale del test, definita dal valore medio quadratico ponderato dell'unità di peso (*Average Weight Area Accuracy*) del contributo offerto dall'insieme di ciascun diverso elemento territoriale in ragione della sua estensione areale.

## Contestualizzazione ambientale

L'area test prescelta è localizzata nel Trentino meridionale, a ridosso dell'abitato di Sarche di Calavino, luogo ritenuto adatto ai fini della presente ricerca stante la sua particolare conformazione geografica e geomorfologia. Il poligono sperimentale è posto ad una quota di 245 m s.l.m., ha un'estensione complessiva prossima ai 25 ettari e vede al proprio interno la presenza di ostacoli sia naturali quali la vegetazione arborea a ceduo ed alto fusto, coltivazioni a vigneto e frutteto, rilevati con salti di quota, ambiti lacustri - vista l'adiacenza con il Lago di Toblino ed il Torrente Rimone - che elementi antropici quali l'edificato, strade - sia asfaltate che sterrate - e linee tecnologiche aeree. La ricerca si è estesa a caratteri morfologici diversificati ed eterogenei, non analizzando solo le risposte LiDAR rispetto a superfici con vegetazione ridotta o con modeste irregolarità delle stesse.

## Materiali, metodi e strumenti

Gli acronimi LiDAR (*Light Detection and Ranging*) o ALS (*Airborne Laserscanner Data*), identificano un sistema a scansione aviotrasportato che consente di acquisire per punti il modello matematico della superficie indagata. Trattasi di una raffinata tecnica attiva di telerilevamento del territorio e/o di opere antropiche che consente di rilevare le coordinate geocentriche tridimensionali, la forma, le dimensioni e le caratteristiche di oggetti naturali - e/o artificiali - tramite la determinazione di un elevato numero di punti afferenti le superfici illuminate. I dati di base, utilizzati per lo svolgimento dei test all'interno del poligono sperimentale, sono rappresentati da:

1) Rilevamento laser altimetrico LiDAR "LID07", reso disponibile dalla Provincia Autonoma di Trento - Assessorato all'Urbanistica e Ambiente / Sistema Informativo e Territorio su richiesta dell'Università I.U.A.V. di Venezia - Facoltà di Pianificazione del Territorio - per finalità didattiche e/o di ricerca, prodotto da BLOM C.G.R. S.p.A. su progetto promosso dal Dipartimento di Protezione Civile e Tutela del Territorio. Il dataset in parola è strutturato in: DSM (*first pulse*) e DTM (*last pulse*), grigliati regolari di passo 1x1 m, ottenuti dall'elaborazione dei dati grezzi del rilevamento, filtrati e selezionati. Metadati e caratteristiche generali della ripresa:

- Piattaforma OPTECH - ALTM 3033/3100<sup>1</sup> con sensore inerziale Applanix 510 e ricevitore multicostellazione GNSS di classe geodetica per la rilevazione dei relativi parametri angolari e della posizione assoluta dell'aeromobile istante per istante durante il volo; registrazione contemporanea di minime due risposte per ogni impulso emesso<sup>2</sup> (*first & last pulse*). Densità media dei punti a terra: 1-3 punti/m<sup>2</sup>; quota di volo: 1.600-1.700 m *Above Ground Level*; accuratezza altimetrica (1 $\sigma$ ):  $\pm 20$  cm; accuratezza planimetrica (1 $\sigma$ ): migliore di 1/2000 della quota di volo, max.  $\leq 1,00$  m; sovrapposizione fra le singole strisciate  $\geq 25\%$ .

Per il posizionamento differenziale, il dataset LiDAR ha beneficiato dell'appoggio alla rete di stazioni permanenti della P.A.T. Le coordinate planimetriche sono riferite al sistema cartografico U.T.M. - ETRF89 / datum WGS84, quote ortometriche riferite al geode ITALGEO derivate da quelle ellissoidiche, espresse nel sistema geocentrico, tramite la procedura Verto ed i relativi dati geodetici complementari su reticoli prodotti dall'Istituto Geografico Militare. Il *survey* sul poligono di ricerca ha avuto luogo il giorno 19/02/2007 in condizioni favorevoli rispetto alla qualità del segnale GNSS, allo stato vegetativo (minima densità fogliare) e in condizioni atmosferiche idonee alla tecnologia adottata.

2) Rilevamento celerimetrico di "verità a terra" frutto di apposite levate topografiche regolari effettuate utilizzando una stazione totale servo assistita Leica Geosystems TPS.TCRP.1203 - R.300<sup>3</sup> dotata di controllo remoto RX.1220. Trattasi di uno strumento ottico di ultima generazione per la misura di angoli azimutali, zenitali e distanze in grado di lavorare sia in modo tradizionale con

---

<sup>1</sup> L'attestazione che viene fornita dalla casa costruttrice del sensore è tipicamente in termini di "percentuale di misure che stanno all'interno di una certa tolleranza" (1 $\sigma$  afferente una distribuzione normale gaussiana che corrisponde al 68,3% del totale dei punti).

<sup>2</sup> Impulsi laser modulati nella lunghezza d'onda dell'infrarosso vicino ( $\lambda = 1063$  nm).

<sup>3</sup> Precisione delle misure angolari 3" (1 mgon) con metodo assoluto, continuo e diametrale.

prisma riflettente che in modalità *reflectorless*, opzione molto utile per l’acquisizione di punti inaccessibili. Levate topografiche regolari ancorate ad un’esistente rete di controllo locale georiferita nel sistema cartografico coerente U.T.M., di proprietà privata, che si compone di n°23 vertici, 4 dei quali coincidenti con i punti fiduciali della rete e sottorete regionale, nel dettaglio i P.F.01/0010/0052 (rete), P.F.06/0010/0052, P.F.07/0010/0052 e P.F.25/0010/0052 (sottorete), tutti nel Comune Catastale di Calavino. Il rilevamento ha avuto luogo nel periodo luglio 2008 – novembre 2009, in condizioni idonee a garantire la buona qualità dell’operato. 984 le acquisizioni puntuali, tutte le battute sui punti di controllo e sulle stazioni sono state reiterate effettuando letture di angoli e distanze a cannocchiale sia diritto che capovolto. Nella fase di progetto della levata topografica si è posta cura nel posizionare le stazioni con passo adatto ad operare sia planimetricamente che altimetricamente all’interno del campo topografico di Puisseux - Weingartner.

Si è fatto uso dei seguenti prodotti software:

- Meridiana 2008® Geopro di GeoTop, applicativo topografico e GIS di elezione per le procedure di elaborazione ed analisi dei dati all’interno del poligono sperimentale;
- ACad (Computer Aided Design) LT2004® applicativo grafico di Autodesk;
- Microsoft Office Pro 2003®;
- ESRI ArcGIS® 9.2: applicativo GIS per le procedure di elaborazione ed analisi distribuita dei dati LiDAR all’interno del poligono sperimentale.

Dati ancillari di supporto alla ricerca sono l’Ortofoto “OFD06” IT2006 - area 059120, la Carta Tecnica Regionale Numerica vettoriale “CTP00” e la Cartografia catastale vettoriale, tutti georiferiti nello stesso sistema cartografico congruente U.T.M. – ETRF89 / datum WGS84.

### Elaborazioni

Per effettuare il controllo qualitativo sull’accuratezza altimetrica si sono eseguiti due profili di sezione su altrettante direttrici critiche, scelte in virtù delle loro caratteristiche ritenute paradigmatiche per mettere alla prova i dati LiDAR, con un’analisi specifica sulle *breaklines*, sulle zone vegetate, sulla viabilità e sull’antropizzato.

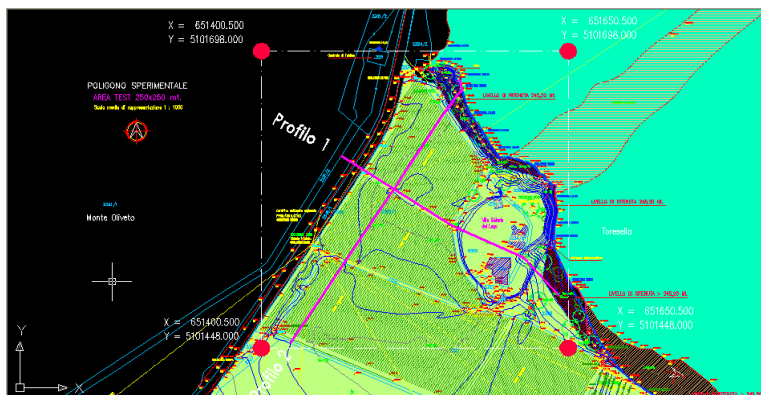


Figura 1 – contestualizzazione generale.

Il confronto metrico-qualitativo è stato effettuato sia fra misure dirette (punti celerimetrici e omologhi punti LiDAR) che fra i due DTM indipendenti, generati - con opportuni algoritmi - rispettivamente da scansioni LiDAR e dalle levate topografiche tradizionali dirette a terra. Ha completato l’analisi altimetrica un controllo qualitativo per comparazione distribuita dei dataset prodotti con le tecniche in esame. L’analisi delle accurattezze altimetriche e planimetriche è partita dall’assunto che lo scarto massimo in quota non dovesse eccedere i  $\pm 0,20$  m e quello in planimetria fosse  $\leq 1,00$  m per il 68,3% dei dati presi in considerazione.



Figura 2 – Alcuni esempi di tracce di profilo.

Il primo controllo qualitativo sull'accuratezza altimetrica si è sostanziato tramite un'analisi grafica globale dell'andamento dei profili di sezione e attraverso uno specifico studio numerico statistico dei valori in output dal software Meridiana GeoPro 2008 con il quale sono stati generati. Trattasi di un'analisi lineare, basata sullo studio delle differenze puntuali tra i valori rilevati con le due metodologie in esame. Condizione essenziale, onde poter attuare questo test numerico, è il confronto di valori con certezza di posizione per ambedue i dataset; nella fattispecie si è operato tramite un confronto diretto dove vi era comunione di dato rilevato e per interpolazione lineare nel caso di valori incogniti (non direttamente rilevati), sia per l'una che per l'altra tecnica.

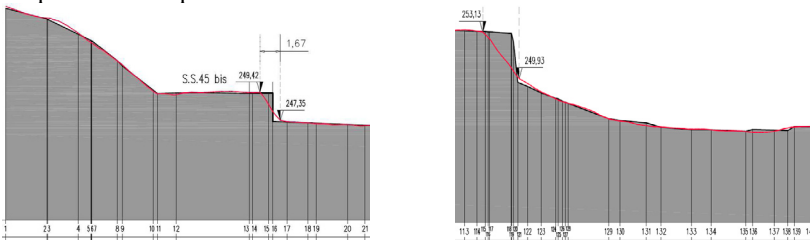


Figura 3 – Alcune contestualizzazioni settoriali afferenti il profilo di sezione n°1, la polilinea in rosso rappresenta il dato LiDAR, quella in nero la levata topografica celerimetrica, ambedue generate in Meridiana GeoPro 2008 sulle medesime tracce di profilo.

L'accuratezza, definita come il grado di corrispondenza del valore misurato rispetto al valore "reale" o di riferimento, viene determinata mediante comparazione tra le osservazioni acquisite per via celerimetrica (accreditate di un'accuratezza intrinseca ritenuta più vicina alla realtà) e quelle LiDAR oggetto di verifica. Il valore dell'accuratezza viene espresso mediante l'RMSE (*Root Mean Square Error*) o Errore Quadratico Medio:

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{i\_Topog} - Z_{i\_LiDAR})^2}{n}}$$

dove:

- $n$  è il numero delle osservazioni di riferimento;
- $Z_{i\_Topog}$  sono le osservazioni topografiche di riferimento;
- $Z_{i\_LiDAR}$  sono le osservazioni da verificare.

| PROFILO 1 COMPLEX.   |                | Δz       |          |                  |
|----------------------|----------------|----------|----------|------------------|
| Tolleranza ±0,20 mt. |                | Positivi | Negativi | Fuori Tolleranza |
| Dati complessivi     | Minimo         | -0,200   |          | -0,758           |
|                      | Massimo        | 0,200    |          | 2,395            |
|                      | Media rel.     | 0,051    | -0,062   | 0,168            |
|                      | Mediana        | 0,046    | -0,051   | -0,249           |
|                      | Media complex. |          | 0,033    |                  |
|                      | DEV. STD.      |          | 0,222    |                  |
|                      | RMSE           |          | 0,225    |                  |

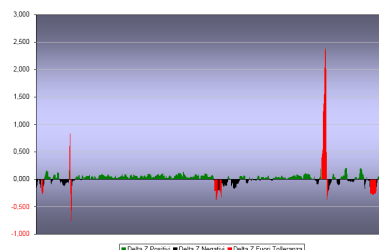


Figura 4 – Statistiche descrittive del profilo 1.

I punti fuori tolleranza sono 49 su 735 che rappresentano il 6,67% sul totale del profilo di sez. n.1

| PROFILO 2 COMPLEX    |                | Δz       |          |                  |
|----------------------|----------------|----------|----------|------------------|
| Tolleranza ±0,20 mt. |                | Positivi | Negativi | Fuori Tolleranza |
| Dati complessivi     | Minimo         | -0,123   |          | -0,353           |
|                      | Massimo        | 0,196    |          | 0,222            |
|                      | Media rel.     | 0,043    | -0,019   | -0,202           |
|                      | Mediana        | 0,041    | -0,012   | -0,243           |
|                      | Media complex. | 0,026    |          |                  |
|                      | DEV. STD.      | 0,065    |          |                  |
| RMSE                 |                | 0,070    |          |                  |

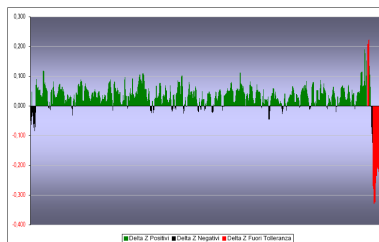


Figura 5 – Statistiche descrittive del profilo 2.

I punti fuori tolleranza sono 32 su 818 che rappresentano il 3,91% sul totale del profilo di sez. n.2.

Nel seguente quadro delle risultanze, vengono riassunti i valori RMSE lineari scaturiti dalle indagini condotte sulle specifiche tipologie di superficie indagate su un'areale di 6,25 ettari:

| QUADRO DELLE RISULTANZE                    |                      |                                     |
|--|----------------------|-------------------------------------|
| Tipologia di superficie illuminata         | Ostruzioni           | Valore RMSE                         |
| 1) Muro di sostegno a paramento verticale; | Nessuna              | 0,414                               |
| 2) Muro di sostegno a paramento inclinato; | Sottochioma          | 0,858                               |
| 3) Bosco di pino a medio fusto             | Vegetato             | 0,113                               |
| 4) Bosco di latifoglie ad alto fusto       | Brullo <sup>42</sup> | 0,112 – 0,117 – 0,163 (media 0,130) |
| 5) Vigneto con filari a "guyot"            | Nessuna              | 0,045                               |
| 6) Manto bituminoso 0/30                   | Parziale             | 0,082                               |
| 7) Manto in ghiaio lavato                  | Nessuna              | 0,054                               |

Figura 6 – Quadro delle risultanze RMSE lineari.

Presupponendo che nel poligono sperimentale la stessa tipologia di superficie indagata abbia errori costanti, se ne fornisce una loro particolarizzazione quadratica. Stante l'instabilità nel tempo delle quote di battente dell'invaso idroelettrico se ne è esclusa aprioristicamente la relativa trattazione.

| ACCURATEZZA MEDIA QUADRATICA              |               |                   |  |       |                                    |
|---|---------------|-------------------|--|-------|------------------------------------|
| Tipologia                                 | RMSE lineare  | RMSE <sup>2</sup> | Superficie relativa                    | %     | RMSE <sup>2</sup> x m <sup>2</sup> |
| 1) Muro di sostegno a paramento verticale | 0,414         | 0,1714            | 543,00 m <sup>2</sup>                  | 1,03  | 93,0702                            |
| 2) Muro di sostegno a paramento scaricato | 0,858         | 0,7362            | 145,00 m <sup>2</sup>                  | 0,28  | 106,7490                           |
| 3) Bosco di pino a medio fusto            | 0,113         | 0,0128            | 12.897,00 m <sup>2</sup>               | 24,17 | 162,5218                           |
| 4) Bosco di latifoglie ad alto fusto      | 0,130 (medio) | 0,0169            | 9.084,00 m <sup>2</sup>                | 17,29 | 153,5196                           |
| 5) Vigneto con filari a "guyot"           | 0,045         | 0,0020            | 24.431,00 m <sup>2</sup>               | 48,50 | 48,8620                            |
| 6) Manto bituminoso 0/30                  | 0,082         | 0,0067            | 1.785,00 m <sup>2</sup>                | 3,40  | 11,9565                            |
| 7) Manto in ghiaio lavato                 | 0,054         | 0,0029            | 3.850,00 m <sup>2</sup>                | 7,33  | 11,1650                            |
| TOTALE                                    |               |                   | <sup>42</sup> 52.535,00 m <sup>2</sup> | 100   | 587,8469                           |

Figura 7 – traduzione quadratica dell'RMSE lineare.

$$RMSE^2 \text{ media} = \frac{\sum RMSE^2 \times m^2}{\text{Totale Sup.}} = 587,8469 / 52.535,00 = 0,011$$

$$\text{Accuratezza media quadratica dell'unità di peso}^4 = \sqrt{RMSE^2 \text{ media}} = \sqrt{0,0112} = 0,106 \text{ m}$$

o AWAA (Average Weight Area Accuracy).

<sup>4</sup> Facendo riferimento alla distribuzione di frequenza degli errori di osservazione nelle condizioni sperimentate, l'errore massimo temibile delle determinazioni altimetriche, quello avente cioè la probabilità dello 0,997 di non essere superato, equivalente al triplo dell'errore quadratico medio, sarebbe dell'ordine di circa ±30 cm.

Quello così ottenuto è un valore medio di accuratezza quadratica valevole per l'areale del poligono sperimentale; ovviamente la stessa analisi in una localizzazione ambientale differente comporta risultati differenti. Lo studio distribuito delle differenze altimetriche tra il DTM frutto del rilevamento strumentale (considerato sempre come riferimento più vicino alla realtà) e il corrispondente modello tridimensionale LiDAR è stato affrontato attraverso gli algoritmi presenti nel modulo *Spatial Analyst* del software ESRI ArcGIS® 9.2. Una verifica, condotta tramite operazioni di sottrazione algebrica per punti e celle corrispondenti sul campione dei punti ricadenti all'interno dello stesso poligono, evidenzia un sistematismo nei valori delle quote medie che, nel caso del LiDAR, risultano attestate sui 248,110 m, a fronte dei 248,225 m del dato celerimetrico, con una differenza di +0,12 m di quest'ultimo. La deviazione standard risulta leggermente più accentuata nel dataset LiDAR.

### **Presentazione dei risultati**

L'elaborazione analitica svolta sulle due tracce prescelte testimonia una percentuale di punti con errori entro la tolleranza ( $\pm 0,20$  m) rispettivamente del 93,32% (profilo 1) e del 96,10% (profilo 2). Per quanto concerne l'analisi distribuita via software GIS, il 59,2% degli errori altimetrici è compreso entro un range di 0,20 m con quasi il 90% compreso entro i 0,40 m. Più del 45% presentano scostamenti contenuti nei 0,10 m. Gli errori  $> 0,40$  m sono concentrati soprattutto in corrispondenza delle *breaklines*, con alcune limitate eccezioni.

### **Osservazioni analitiche sui risultati ottenuti**

I risultati conseguiti nella ricerca sperimentale, hanno consentito dunque di ottenere conferma che i dati raccolti dalla scansione laser attraverso il LiDAR, oltre a fornire una indicazione geometrica delle superfici esplorate ne forniscono anche una risposta di natura eminentemente fisica, funzione delle caratteristiche morfologiche e materiche del poligono sperimentale indagato. Le discrepanze rilevate in altimetria, come già è stato rilevato, oscillano dagli 0,05 m agli 0,86 m a seconda della tipologia fisica della porzione di superficie illuminata. Pressoché trascurabili nei manti in ghiaio lavato (0,05 m) e bituminoso 0/30 (0,08 m), a valori più marcati nei boschi di latifoglie e di pino (0,11÷0,16 m), a valori massimi nei muri di sostegno a paramento inclinato e verticale (0,85 m). Il tutto con una accuratezza media quadratica ponderata areale dell'unità di peso (*Average Weight Area Accuracy*) pari a 0,11 m esprime il contributo finale offerto dall'insieme di ciascun diverso elemento fisico territoriale omogeneo, esplorato appunto in ragione della sua estensione areale. Motivo per cui, appare intuitivamente evidente che, nel bilancio energetico fra energia laser emessa ed energia laser assorbita e riflessa, maggiore risulta l'assorbimento energetico operato dall'oggetto illuminato, minore risulta l'energia da esso riflessa, e pariteticamente minore risulta anche la relativa precisione di misura del sistema. Proseguendo, minore risulta invece l'assorbimento, maggiore risulta la luminanza dell'energia laser riflessa, ed in conseguenza maggiore la precisione della misura dell'entità osservata. Ragione per cui, effettuata una generica prospezione, si potrebbe risalire, valutando a posteriori la luminanza del raggio riflesso dall'oggetto illuminato di ritorno alla sorgente laser emittente, all'approssimazione conseguita nella misura metrica effettuata ed alle caratteristiche fisico-chimiche della materia costituente gli oggetti di volta in volta illuminati. Appare tuttavia evidente che la variazione della luminanza, al variare della natura fisica degli oggetti medesimi, non possa da sola costituire un reale approfondimento delle proprietà fisico-chimiche intrinseche dei singoli materiali costruttivi, od oggetti illuminati, ma possa invece fornire degli indizi utili all'esame analitico della variazione delle loro caratteristiche fisiche. Ne consegue dunque che la risposta spettrale degli oggetti illuminati dal LiDAR, nel bilancio energetico generale fra emissione dell'irradiazione, suo assorbimento e sua riflessione, presenta caratteristiche analoghe alle metodologie passive, pur se alquanto differenziate.

## Conclusioni

Lo studio dimensionale per profili di sezione, nella sua semplicità concettuale, si è dimostrato molto efficace per mettere alla luce in maniera diretta pregi e difetti dei geodati LiDAR. Gli stessi profili si sono dimostrati utili anche nelle fasi transitorie di georeferenziazione del dato di “verità a terra” grazie alla possibilità resa in termini di immediata verifica visiva, esplorativa, dell’eventuale esistenza di sistematismi. La traduzione quadratica dei valori RMSE lineari sintetizza un ottimo valore di accuratezza media dell’unità di peso. L’analisi distribuita operata sulle differenze tra DTM si è dimostrata meno intuitiva; da una mera osservazione dei valori appare, in prima battuta, come il dataset oggetto di studio contenga delle criticità, ma va considerato il fatto che su questo tipo di verifica, peraltro quasi ciecamente affidata all’opera degli algoritmi di calcolo implementati nello specifico software, pesa l’alta incidenza dei valori (pochi) fuori tolleranza. Da segnalare la non banalità delle operazioni di georeferenziazione sia altimetrica che planimetrica del dato topografico di “verità a terra”, stante la delicatezza delle considerazioni analitiche che originano dallo stesso. Il significativo contributo che i dataset LiDAR possono offrire ad una corretta informazione territoriale ha trovato conferma negli esiti della sperimentazione condotta, pur dovendo segnalare le discrasie osservate in prossimità delle *breaklines*, dove si è notata una perdita di contenuto informativo settorialmente rilevante. Interessante sarebbe una verifica dei *raw data* dei quali però non si è in possesso. La regolarizzazione di passo al quale viene sottoposto il dato *matrix* fa discorso a sè, dall’esito piuttosto scontato. Quella LiDAR è quindi una risposta fisica, non solo geometrica, dove le problematiche legate al volo, alla sua quota, alla sua velocità, alle caratteristiche dei sensori, alle condizioni fisiche proprie della giornata nella quale si opera, alle caratteristiche morfologiche ed antropiche della zona indagata e gli angoli di presa giocano un ruolo determinante.

## Riferimenti bibliografici

- CAMPBELL J. B. (1996) - *Introduction to remote sensing*. Taylor & Francis Ltd. London.
- SURACE L., CAMICIOTTOLI F., REDINI M. (2005) - *Tecnologia laser - scanning e rischio idraulico*. Provincia di Arezzo – Servizio Difesa del Suolo. Pacini Editore Spa.
- DEQUAL S., CILLOCCU F., BROVELLI M., CRESPI M., LINGUA A. (2009) - *Ortoimmagini 1:10.000 e modelli altimetrici. Linee Guida*. C.I.S.I.S. - Centro Interregionale per i Sistemi informatici, geografici e statistici. Roma.
- BINI M., BATTINI C. (2007) - *Nuove immagini di monumenti fiorentini. Rilievi con tecnologia scanner laser 3D*. Alinea Editrice. Firenze.
- SHAN J., TOTH C. K. (2009) - *Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing*. CRC Press. London.
- GASPERI M. (2010) - *Analisi qualitativa del dato LiDAR nell’informazione territoriale ad alta risoluzione*. IUAV Venezia, 12 marzo 2010, *Tesi di laurea*.