

## **TECNICHE LIDAR ED AEROFOTOGRAMMETRICHE PER LA STIMA DI PARAMETRI GEOMETRICI DI EDIFICI IN AREE URBANIZZATE SOGGETTE A RISCHIO SISMICO**

F. BORFECCHIA (\*), A.B. DELLA ROCCA (\*), M. POLLINO (\*), A. LUGARI (\*),  
L. DE CECCO (\*), S. MARTINI (\*), S. MONACCIARI (\*), C. PASCALE (\*\*)

(\* ) ENEA - Dipartimento ACS - Unità Osservazione della Terra e Sistemi Informativi Territoriali

C.R. Casaccia, Via Anguillarese 301 - 00123 Roma

Tel.: 06.3048.6042 - Fax: 06.3048.6038 - e-mail: borfecchia@casaccia.enea.it

(\*\*) Consorzio T.R.E – Tecnologie innovative per il recupero edilizio

Via D. Giustino 3/a - 80125 Napoli

Tel.: 081.7256215- Fax.: 081.7256306 - e-mail: carmine.pascale@consorziotre.it

### **Riassunto**

Le attività di ricerca qui descritte riguardano lo sviluppo di metodologie e strumenti innovativi basati su dati aerospaziali, per l'analisi ed il monitoraggio dell'ambiente urbano, con particolare riferimento agli edifici ed alla loro vulnerabilità a sollecitazioni dinamiche di tipo sismico. In questo ambito, è importante mettere a punto efficaci strumenti per analisi estensive, tempestive e ripetitive del tessuto urbano esistente in modo da ricavarne i parametri più significativi che, uniti a quelli dei suoli, permettano di stimare la vulnerabilità degli edifici e forniscano un supporto nella pianificazione di interventi di prevenzione e/o di minimizzazione dei danni. Le metodologie sviluppate si fondano sull'uso di dati aerospaziali per la caratterizzazione di aree urbanizzate scelte nel comune di Avellino sulla base della loro rappresentatività per quanto riguarda il rischio sismico. Si è fatto uso di rilievi da piattaforma aerea (aereo ed elicottero) di tipo aerofotogrammetrico e LIDAR. Grazie a queste innovative tecniche LIDAR, utilizzate in modo integrato e complementare con quelle di stereo restituzione digitale, è stata ottenuta una stima estensiva dei parametri geometrici e delle caratteristiche di ogni edificio nelle aree d'interesse, nonché l'andamento del suolo. Tali risultati, integrati con rilevamenti campionari *in situ* e con altri dati aerospaziali, sono stati utilizzati per una zonizzazione mirata delle aree d'interesse, in cui sono riportati, per ogni singolo edificio appartenente all'area di indagine, tutti i parametri d'interesse.

### **Abstract**

*This paper describes the methodologies implemented to support the 3-D characterisation of selected urban areas of Avellino (Southern Italy), using different data remotely acquired by means of aero spatial platforms. The activities have been based on integration of digital aerofotogrammetry and laser ranging (LIDAR) techniques. 3-D reconstruction (containing buildings geometrical parameters) of test areas has been used in order to support a better estimation of seismic vulnerability at urban level. In this framework, data acquired by LIDAR sensor have allowed to obtain both the ground DEM and the buildings heights over entire administrative area of municipality of Avellino. Then, LIDAR data have been integrated with those derived from digital aerophotogrammetric techniques on areas previously selected. The integrated use of various information, coming from different techniques, has allowed to produce, for each building within the test areas, useful information about vulnerability.*

## Introduzione

La stima della vulnerabilità del costruito esistente è un problema di particolare evidenza per il territorio italiano, sul quale la percentuale di abitazioni in edifici progettati e realizzati in assenza di prescrizioni sismiche adeguate supera di larga misura il 50%. La vulnerabilità dei singoli edifici è stata sintetizzata in un indice  $I_v$  definito tramite l'analisi statistica dei danni sull'edificato inventariati a seguito dei vari eventi sismici avvenuti (Giovinazzi, Lagomarsino, 2001). Tale indice si basa in primis sulla tipologia delle costruzioni, divise in macro-gruppi, tra i quali quelli maggiormente rappresentativi sono costituiti dal cemento armato e dalla muratura. Per la situazione in esame, nell'ambito degli edifici in muratura risultano più importanti quelli realizzati in mattoni pieni e quelli in muratura non armata con solai in c.a., mentre per le realizzazioni completamente in c.a. è necessario distinguere quelle costruite con specifiche antisismiche dopo il 2000 dalle altre. L'indice  $I_v$  risulta maggiore per le strutture più deboli e suscettibili di essere maggiormente danneggiate ed ha un intervallo che può andare da -50 a 60. Oltre che alla tipologie edilizie,  $I_v$  è legato anche ad altri parametri degli edifici, soprattutto a quelli geometrici che ne determinano le modalità di risposta all'onda sismica.





	Epoca Costruzione	$I_v$	Manutenzione	N° Piani			Agglomerato
				1-2	3-4-5	6+	
Muratura	 Dal 1946 al 1971	30	6		5	10	6
	 Dopo il 1971	20			5	10	6
Cemento Armato	 Prima della classificazione sismica (<2000)	20		-6		6	6
	 Dopo la classificazione sismica (>2000)	0		-6		6	

Tabella 1 – Indici di vulnerabilità e modificatori per le tipologie presenti nella zona d'interesse

Nella Tabella 1 sono riportate, per le due tipologie prevalenti nella zona d'interesse, gli indici di vulnerabilità medi ( $I_v$ ) per epoca di costruzione ed i relativi modificatori, dipendenti dal livello di manutenzione, dall'altezza (espressa in numero di piani) e dall'appartenenza o meno ad agglomerati. Oltre a questi parametri, altri modificatori proposti riguardano la simmetria in elevazione ed in pianta della struttura e le caratteristiche dei suoli sottostanti.

In definitiva, eseguire un'analisi di vulnerabilità significa valutare la consistenza del costruito diffuso in una data area, sia in termini quantitativi che qualitativi, ed in particolare stimare la sua propensione ad essere danneggiato dal sisma. Da questo punto di vista è importante mettere a punto strumenti efficaci che permettano analisi estensive del tessuto urbano esistente, sviluppatosi spesso senza i dovuti controlli, in modo da ricavarne i parametri più significativi per la stima del rischio e della vulnerabilità degli edifici. Ciò può rappresentare un valido supporto nella pianificazione d'interventi mirati alla minimizzazione dei danni od alla loro prevenzione in occasione di eventi sismici, i quali spesso hanno un impatto rilevante in termini di danni materiali e perdita di vite umane. Oltre alle informazioni relative alla tipologia ed allo stato della costruzione, risulta importante avere anche informazioni su altezza superficie e forma degli edifici presenti nel tessuto urbano di interesse, da cui derivare i parametri modificatori geometrici sulla Tabella 1.

Tenendo conto che nel nostro Paese esistono numerose zone fortemente esposte a rischi legati a sollecitazioni dinamiche di origine sismica e di dissesto idrogeologico, e per far sì che le conoscenze acquisite nel corso della presente ricerca trovino la massima applicazione nella pratica costruttiva nazionale, sono state previste attività di dimostrazione e applicazione su due aree del comune di Avellino, scelte sulla base della loro rappresentatività, per quanto riguarda il rischio sismico (Figura 1).

### Tecnologie e dati utilizzati

Le attività qui descritte hanno principalmente riguardato lo sviluppo di metodi di elaborazione di riprese aeree stereoscopiche digitali e LIDAR (Borfecchia et al., 2007), al fine di ottenere, con un elevato livello di automatismo, i parametri geometrici tridimensionali degli edifici presenti nelle aree urbane di test individuate nel Comune di Avellino. In particolare, nell'ambito di un accordo quadro stipulato con l'Amministrazione Comunale di Avellino, sono state acquisite varie cartografie comunali e coperture aerofotogrammetriche relative alle aree di test. Le cartografie vettoriali ottenute sono a scala 1:2000 ed 1:5000 e si riferiscono a 3 diversi anni: 1997, 2003 e 2005. La copertura aerofotogrammetrica utilizzata risale alla fine del 1997, acquisita con volo ad un'altezza media di 1700 m, a scala fotografica 1:7500 e con camera RC10.

Nell'autunno del 2007, invece, è stato effettuato appositamente un rilievo su tutto il territorio comunale tramite LIDAR *Optech ALTM 3100*, installato su elicottero e caratterizzato da una copertura omogenea di almeno 4 punti per metro quadrato.

Sebbene l'utilizzo di tecniche di fotogrammetria digitale abbia raggiunto ormai una notevole accuratezza unitamente ad un livello di automatismo ed economicità significativi, sulle aree urbane sono anche emersi i limiti di tale approccio: la presenza di ombre, di occlusioni, di oggetti in movimento (automobili) e di strutture ripetute (tetti, strisce pedonali), portano inevitabilmente a diminuire l'accuratezza del risultato finale, senza contare l'impossibilità di utilizzare coperture più recenti del 1997, poiché non disponibili presso il Comune di Avellino.

La tecnologia LIDAR, invece, non è influenzata da ombre né da strutture ripetute e si limita eventualmente a rilevare oggetti in movimento senza venire influenzata dalla loro velocità e direzione. Per contro, risulta anch'essa influenzata in una certa misura da occlusioni e presenta un costo di acquisizione sensibilmente superiore al rilievo aerofotogrammetrico.

### Metodologie sviluppate per la ricostruzione 3D della struttura urbana

A partire da aerofotogrammi stereo sono stati stimati in maniera automatica i parametri geometrici degli edifici appartenenti alle aree test, utilizzando algoritmi di stereo-correlazione e *software* specifici, che con un'ottimizzazione mirata, consentono di ottenere risultati adeguati anche in ambienti complessi come quello urbano. Quest'ambito risulta problematico per la presenza delle strutture civili che, causando occlusioni, impediscono la correlazione. Inoltre, il tessuto urbano è normalmente caratterizzato da una certa varietà: ad esempio, una zona più antica (caratterizzata da edifici di piccole dimensioni densamente distribuiti) può trovarsi adiacente ad una costituita da edifici più moderni (meno densamente distribuiti, caratterizzati da forti elevazioni e riuniti in grandi isolati).

Queste problematiche sono state affrontate e risolte in modo soddisfacente solo tramite l'elaborazione di specifiche "strategie", elaborando appositamente un insieme di parametri e di algoritmi per la stereo-correlazione automatica, e finalizzandoli alla produzione del modello digitale 3D delle elevazioni (*Digital Elevation Model*, DEM) in particolare degli edifici presenti negli specifici ambienti urbani in cui sono collocate le aree di test scelte per il progetto (Pollino et al., 2005). Nella fattispecie, l'interesse prevalente era nei confronti dell'altezza degli edifici rispetto al suolo, per cui sono stati prodotti due differenti modelli 3D: uno relativo al suolo ed uno relativo agli edifici, in modo da poter successivamente stimare, per differenza, il parametro richiesto.

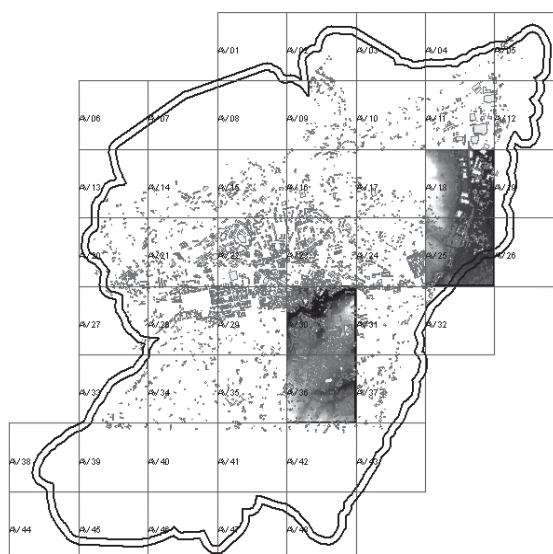


Figura 1 – Confini del Comune di Avellino con distribuzione dell'edificato e quadro d'azione dei rilievi LIDAR. Per le aree di test è visualizzato in toni di grigio il DSM.

Come detto in precedenza, è stato effettuato un rilievo LIDAR su tutto il territorio comunale. I dati, aventi una risoluzione minima di 4 punti al m<sup>2</sup> ed una gestione d'impulsi di ritorno sino a 4, sono stati pre-elaborati per la ripulitura e l'inquadramento cartografico con il raggruppamento in 48 tavole (Figura 1), che ricoprono l'intero territorio comunale e corrispondono ad altrettanti *file* in formato LAS, contenenti i dati sotto forma di nuvole di punti associati alla relativa intensità (Crosilla et al., 2007).

Tramite opportune tecniche di filtraggio, dai dati LIDAR sono stati ottenuti un modello digitale del suolo nudo (DTM) ed un modello digitale complessivo delle elevazioni (DSM), comparabili direttamente con i DEM ottenuti dai predetti metodi aero-fotogrammetrici. Grazie alla possibilità di escludere la vegetazione, tramite la gestione degli impulsi di ritorno multipli, ed alla maggiore quantità di punti direttamente misurati e non interpolati, la descrizione 3D ottenuta dai dati LIDAR risulta maggiormente dettagliata rispetto a quella ottenuta dall'approccio aerofotogrammetrico, specialmente in corrispondenza delle zone densamente urbanizzate. Sfruttando queste caratteristiche del dato LIDAR sono state successivamente effettuate elaborazioni per l'estrazione diretta e con alto livello di automazione dei seguenti Layer:

1. Modello digitale complessivo della superficie: DSM (Digital Surface Model, raster)
2. Modello digitale del suolo nudo (DTM o DEM suolo, raster)
3. Vettoriale degli edifici con relativi attributi di:
  - a. altezza (min., max , med) dal suolo;
  - b. tipologia copertura (piana, semplice o complessa)
  - c. altri parametri geometrici (lunghezza, larghezza, orientamento,...)
4. Vettoriale della vegetazione (centroide della chioma degli alberi e limiti vettoriali boschivi).

In Figura 2 è riportato lo schema di elaborazione utilizzato a partire dai dati LIDAR pre-elaborati in formato di nuvola di punti quotati. Come per le metodologie aerofotogrammetriche, tali elaborazioni dei dati LIDAR hanno richiesto la messa a punto di opportune strategie di estrazione ottimizzate sulle specifiche aree di test, con la scelta di un adeguato set di parametri correlati alle caratteristiche 3D degli oggetti (edifici, alberi, suolo nudo,...) da ricavare dai dati preprocessati.

### Analisi dei risultati

Prima di procedere all'integrazione tra i risultati delle elaborazioni aerofotogrammetriche e di quelle LIDAR, è stato operato un confronto tra gli stessi. In particolare, per ciascun edificio delle aree di test, sulla base della relativa poligonale cartografica, sono stati estratti i valori statistici dell'altezza contenuta nel DEM aero-fotogrammetrico e nel DSM LIDAR. In tal modo, per ogni edificio si è ottenuto un set di parametri statistici di altezza dal suolo stimata con le due differenti tecniche. In aggiunta, ad ogni poligonale di edificio sono state associate - tramite funzioni GIS - gli stessi parametri statistici derivati dal DSM ma utilizzando la cartografia vettoriale ottenuta automaticamente per segmentazione degli stessi dati LIDAR, in modo da poter procedere ad una sua valutazione comparata.

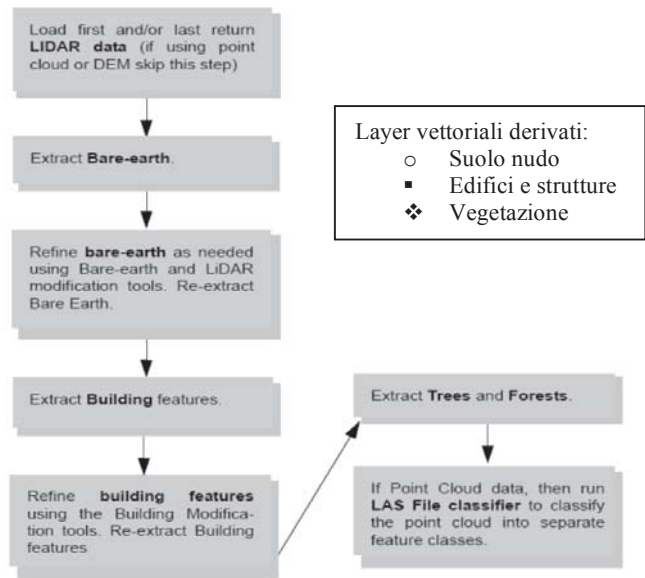


Figura 2 – Schema di elaborazione dei dati LIDAR per l'estrazione semiautomatica dei layer degli edifici, dell'andamento del suolo e della distribuzione della vegetazione.



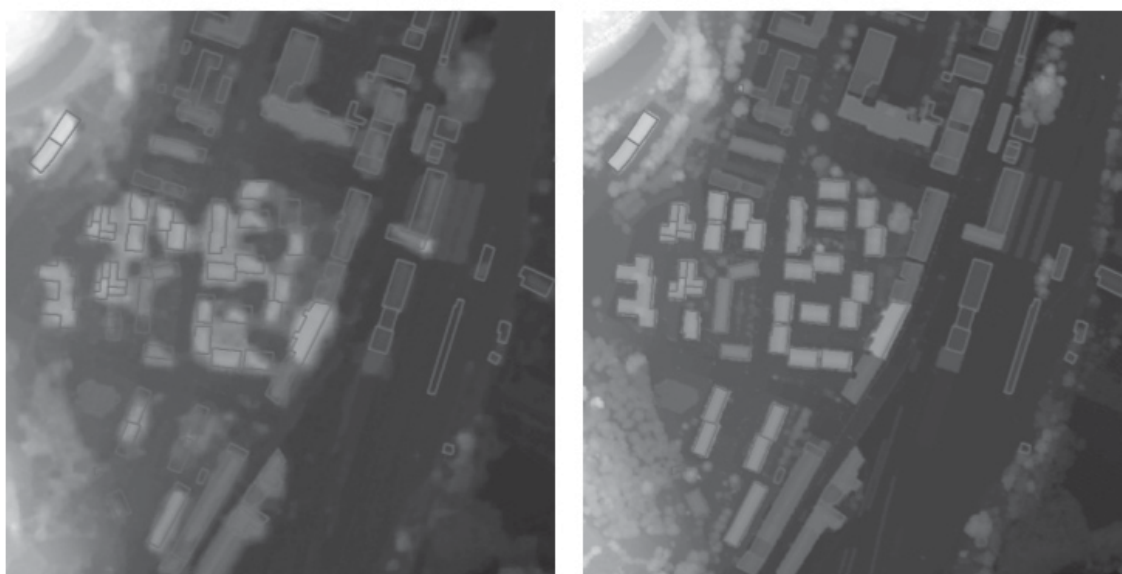


Figura 3 – Cartografia di riferimento in sovrapposizione al DEM aerofotogrammetrico (sinistra) ed al DSM LIDAR (destra)

In Figura 3, a titolo di esempio, nella parte sinistra è riportata la cartografia di riferimento (scala 1:2000) in sovrapposizione al DEM ottenuto dalle tecniche aerofotogrammetriche e nella parte sinistra al DSM ottenuto dalla nuvola di punti LIDAR. Nella Figura 4, invece, sono mostrati gli strati vettoriali di edifici, vegetazione ed alberi estratti automaticamente dal DSM LIDAR, ai quali è stata sovrapposta, come termine di paragone, la cartografia di riferimento in scala 1:2000. Come si può osservare, il vettoriale degli edifici ottenuto dal LIDAR risulta - con buona approssimazione - non solo simile alla cartografia di riferimento ma anche più aggiornato, comprendendo le nuove edificazioni intervenute.

Su queste basi, per un numero significativo di edifici nelle aree d'interesse, sono state messe a confronto le altezze stimate automaticamente con le corrispondenti misure effettuate manualmente per mezzo della fotointerpretazione stereoscopica manuale (FOT). Per la stima automatica sono state utilizzate sia le altezze ricavate da metodologie aerofotogrammetriche ottimizzate (DEMM) che dalle tecniche LIDAR (DSMM). Anche se la correlazione per le misurazione aerofotogrammetriche appare comunque significativa ( $R^2=0,531$ ), si osserva come il valore più alto si riscontri per le stime ottenute dai dati LIDAR ( $R^2=0,730$ ), che presentano anche un errore medio minore (RMSE=3,23). I risultati sono riportati in Figura 5.

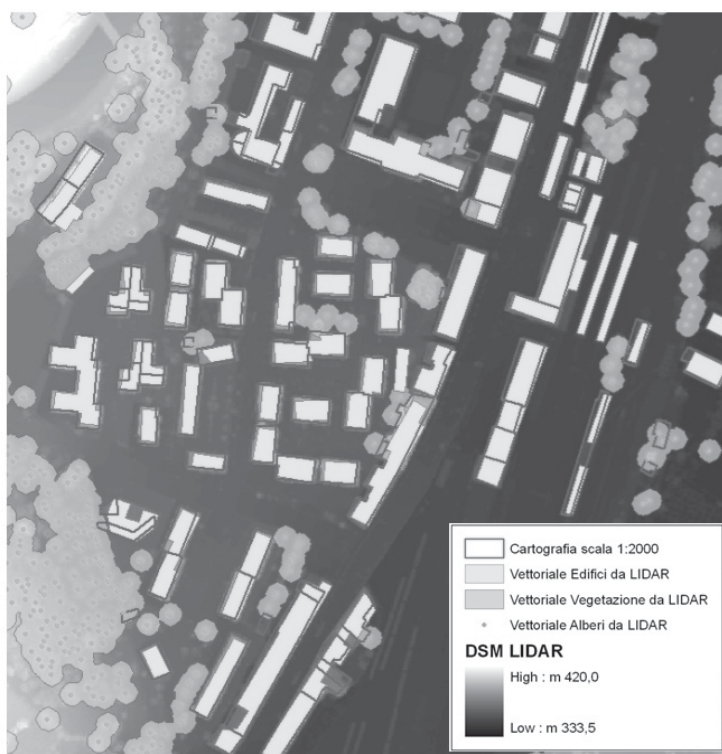


Figura 4 – Strati vettoriali (edifici, vegetazione, alberi) estratti automaticamente da LIDAR

Nella Figura 6, invece, è riportato il confronto tra le altezze stimate da dati LIDAR, quelle contenute nel vettoriale degli edifici ottenuto automaticamente dagli stessi dati LIDAR e le misure manuali FOT. Prendendo per ogni singolo edificio rispettivamente i valori medi (DSMAM) e massimi (DSMAMA), si osservano significativi livelli di correlazione.

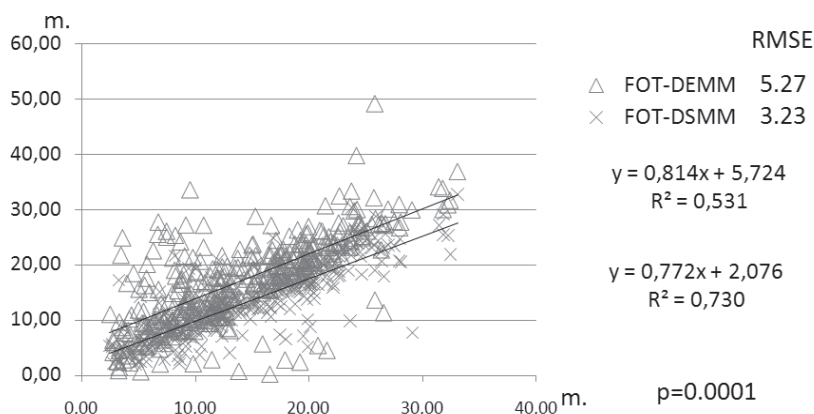


Figura. 5 – Confronto tra altezze degli edifici stimate automaticamente da DEM (DEMMA) e DSM (DSMM) mediante la cartografia vettoriale di riferimento e le misure manuali da fotointerpretazione stereoscopica.

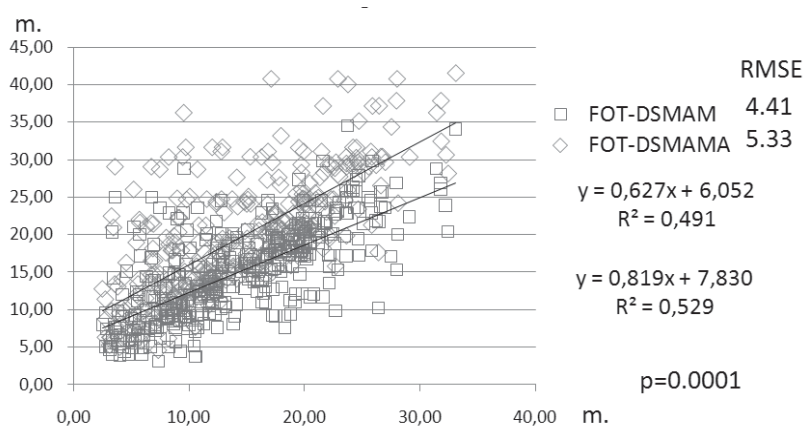


Figura. 6 – Confronto tra altezze stimate manualmente e da dati LIDAR

In definitiva, i risultati delle elaborazioni dei dati LIDAR, integrati con i risultati delle elaborazioni aerofotogrammetriche, hanno consentito migliorare la qualità e l'accuratezza sia del DEM finale del suolo che delle altimetrie in corrispondenza degli edifici. I dati LIDAR, inoltre, sono stati utilizzati anche per la caratterizzazione delle coperture e per l'individuazione della distribuzione della vegetazione nelle aree d'interesse.

## Bibliografia

- Borfecchia F., Della Rocca A.B., De Cecco L., Martini S., Pollino M., Pascale C., Coren F. (2007), "Applicazione di tecniche di rilievo LIDAR ed aerofotogrammetriche a supporto della stima della vulnerabilità sismica nelle aree urbanizzate", *ATTI 11<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA*
- Crosilla F., Visintini D., Prearo G., Fico B. (2007), "Esperienze di filtraggio, classificazione segmentazione e modellazione di dati spaziali da rilievo laser aereo", *Bollettino SIFET*, 1/05: 13-51
- Pollino M., Della Rocca A.B., Pierazzi M. (2005), "Aerofotogrammetria, DEM e realtà virtuale: ricostruzione fotorealistica tridimensionale di edifici in aree urbane", *Cartographica - Il notiziario dei dati geografici*, Ed. MondoGIS, n° 11: 7-10
- Giovinazzi S., Lagomarsino S. (2001), "Una metodologia per l'analisi di vulnerabilità sismica del costruito", *Atti X Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, Potenza-Matera