

## **Estrazione di edifici da dati LiDAR a supporto di un applicativo per la stima della radiazione solare in ambito comunale**

Gabriele Bitelli (\*), Alessandro Lambertini (\*), Andrea Minghetti (\*\*)

(\* ) Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali - DICAM, Università di Bologna,  
Viale del Risorgimento 2, 40136 Bologna, (gabriele.bitelli, alessand.lambertini2)@unibo.it

(\*\*) Comune di Bologna – Sistemi Informativi Territoriali (SIT), Piazza Liber Paradisus 10,  
40129 Bologna, sitadmin@comune.bologna.it

### **Sommario**

La realizzazione di modelli 3D della città può avere molteplici valenze in applicazioni di diverso tipo, tra cui alcune in ambito energetico. Un esempio è quello della valutazione delle potenzialità nell'installazione di sistemi ad energia solare: individuare coperture idonee all'installazione di pannelli solari in area urbana è importante sia per i privati cittadini che per la pubblica amministrazione, a supporto dell'adozione di nuove strategie in campo energetico. Nella ricerca della localizzazione ottimale occorre considerare diversi fattori: dimensione della superficie dei tetti, orientamento, insolazione, ombreggiatura causata da ostacoli circostanti (altri edifici o alta vegetazione), presenza di oggetti che contribuiscono a rendere complessa la geometria delle coperture. Risulta quindi fondamentale la precisione dei dati disponibili sulle superfici analizzate, oltre al grado di dettaglio dei modelli geometrici 3D utilizzati per rappresentarle, in quanto la complessità che possono raggiungere i tetti a falda è piuttosto elevata. Il lavoro è dedicato a individuare una metodologia per elaborare dati LiDAR e ottenere, con una tecnica semi-automatica, la completa geometria di ogni parte del tetto, integrando i dati preesistenti all'interno di una cartografia numerica a grande scala; il caso di studio riguarda una porzione dell'area urbana della città di Bologna. L'Unità SIT del Comune di Bologna ha realizzato in ambiente WebGIS un applicativo per il calcolo speditivo della radiazione solare che potrebbe essere sfruttata per la produzione di energia. Tale valutazione può essere raffinata da una conoscenza della geometria 3D degli edifici più accurata di quella normalmente consentita dalla cartografia numerica. Per raggiungere il risultato sono state messe a punto alcune procedure sfruttando un modulo software di recente introduzione per l'estrazione automatica di caratteristiche da dati LiDAR. La sperimentazione effettuata, oltre a mettere in luce le potenzialità del metodo e le possibili problematiche che possono insorgere in casi particolari, ha confermato che, al fine di eseguire una modellazione accurata attraverso i dati LiDAR, è necessario disporre di una nuvola di punti a densità molto elevata.

### **Abstract**

The realization of 3D city models can be very valuable in different applications, including some regarding energy studies. An example is evaluating the potential installation of solar energy systems: identifying the right roofs to install solar panels in an urban area is important for both private citizens and the public administration, in order to support the adoption of new strategies in the energy field. In the research of the optimal location, several factors must be considered: area of roofs, orientation, insolation, shading due to surrounding obstacles (buildings or other high vegetation), presence of chimneys, or other items contributing in giving a complex geometry to the roof. It is essential to obtain data with great accuracy on the surfaces analyzed, to have good detail of the 3D geometric models used to represent them, since the complexity that pitched roofs can reach is quite high. The work is dedicated to identify a methodology for analyze LiDAR data and

obtain, with a semi-automatic technique, the complete geometry of each part of the roof, integrating existing data within a large-scale digital mapping: the case study covers a portion of the urban area of the city of Bologna. The SIT Unit of the Municipality of Bologna has developed a WebGIS environment useful for expeditious calculation of the solar radiation that could be used for the production of energy. This assessment can be refined from a knowledge of the 3D geometry of the buildings more accurate than that permitted by common digital cartography. To achieve the result some procedures have been developed, in particular by using software for the automatic extraction of features from LiDAR data. The experiment carried out confirmed that in order to perform accurate modeling, through LiDAR data, a high-density point cloud is needed.

## Introduzione

La ricerca di tecniche per la produzione e l'aggiornamento di *3D city model*, modelli tridimensionali di centri urbani, risulta sempre più importante nella gestione della città e nella pianificazione territoriale, sia per quanto riguarda lo sviluppo urbanistico, sia per le problematiche di carattere ambientale. I *3D city model* possono oggi venire realizzati attraverso differenti tecniche, e in particolare con la fotogrammetria digitale e con la scansione laser da piattaforme aeree; i prodotti che ne derivano sono in parte assimilabili ma si discostano sia per il grado di automazione del processo che per il prodotto finale disponibile. Tra le applicazioni che possono giovare della disponibilità di modelli tridimensionali dell'edificato, ne sono emerse di recente alcune che si rivolgono a problematiche di carattere energetico, ed in questo ambito si colloca la presente sperimentazione relativa ad un caso di studio sull'area urbana di Bologna.

Il Comune di Bologna può vantare una lunga esperienza nella gestione di Sistemi Informativi Territoriali basati su cartografia numerica di origine aerofotogrammetrica, costantemente aggiornata con dati provenienti da diverse fonti, tra le quali ortofoto aeree acquisite su base annuale e rilievi topografici eseguiti sul campo. Sfruttando le informazioni così ottenute, riportate all'interno della CTC (Carta Tecnica Comunale) in scala nominale 1:2000, è stato possibile creare un applicativo web per una stima speditiva dell'energia solare disponibile sulle coperture degli edifici. Tale applicativo, *Bologna Solar City*, è il risultato della radiazione solare, diretta e diffusa, calcolata tramite strumenti GIS utilizzando un modello 3D semplificato dell'urbanizzato, creato con i dati provenienti dalla CTC (Minghetti et al., 2010).

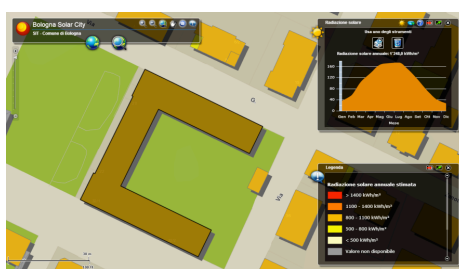


Figura 1. Applicativo WEB Bologna Solar City.

Il prodotto finale è una applicazione web gratuita tramite la quale il cittadino può interrogare un servizio GIS ed ottenere la stima della radiazione solare sul proprio edificio. I dati altimetrici a disposizione per creare il modello consistono in due valori medi per ogni struttura: la quota al piede e la quota a livello di gronda dell'edificio. Con tale informazione, peraltro comune in questo tipo di realizzazioni di cartografia numerica, le coperture degli edifici sono costituite in una rappresentazione tridimensionale da superfici piane orizzontali, senza tenere in conto la conformazione reale del tetto in falde. Nel calcolo della superficie netta del tetto, utilizzabile per la produzione di energia fotovoltaica o solare termica, viene quindi inserito in fase di lettura del dato un parametro che indica la percentuale di tetto utilizzabile. Con tale valore viene anche calcolata

direttamente la potenziale riduzione di CO<sub>2</sub> immessa nell'atmosfera in caso di realizzazione dell'impianto.

Avendo invece a disposizione il modello 3D degli edifici, insieme alla dimensione di ogni superficie analizzata, alla radiazione ricevuta, all'ombreggiamento dovuto alla topografia del territorio o a strutture adiacenti o ad alta vegetazione, sarebbe possibile valutare con maggiore accuratezza il contributo energetico dovuto all'irraggiamento solare valutando ognuna delle falde orientate favorevolmente. Questo tipo di analisi, dettagliata per ogni singolo edificio, può essere importante anche nell'applicazione di modelli energetici come quello sviluppato all'interno del progetto europeo *EnergyCity* (linea *Central Europe*), che utilizza termografie aeree per valutare le dispersioni energetiche e supportare le strategie degli enti locali per ridurre i consumi e le emissioni di CO<sub>2</sub> (Bitelli e Conte, 2011); in questo caso, per esempio, il rapporto volume/superficie di ogni edificio è un parametro di grande interesse.

L'obiettivo di questo lavoro è dunque di sperimentare una metodologia innovativa per generare modelli 3D di edifici, a partire da dati LiDAR, ottenendo il preciso orientamento nello spazio delle falde di copertura; il dato iniziale è una nuvola di punti indifferenziata dalla quale è possibile riconoscere le singole strutture.

Sono stati sviluppati recentemente diversi algoritmi in grado di estrarre da tale dato la forma degli edifici in modo automatico.

Una possibilità consiste nell'interpolare la nuvola di punti ottenendo il DSM (*Digital Surface Model*), che include tutte le strutture e infrastrutture sopra il livello del suolo. Tramite tecniche di filtraggio si passa al DTM (*Digital Terrain Model*) ottenendo la nuda superficie del suolo: tale superficie potrà avere un livello di *smoothing* più o meno elevato a seconda dei parametri impostati. Sottraendo il DTM dal DSM ed impostando delle soglie di altezza si identifica la zona nella quale sono contenute le strutture. Tramite appositi algoritmi ed operazioni morfologiche vengono precisamente definite le regioni di punti che appartengono ad edifici effettuando quindi una classificazione. Su tali punti, tramite tecniche di segmentazione, si creano inizialmente dei piccoli gruppi di punti in regioni appartenenti ad un piano, che contribuiscono a creare i primi modelli di edifici. Si raggruppano quindi i modelli verificando la congruenza tra piani adiacenti ed ottenendo in conclusione i modelli tridimensionali. (Rottensteiner, Briese, 2002).

Algoritmi più recenti si occupano di elaborare direttamente la nuvola di punti, evitando il passaggio attraverso prodotti *raster* intermedi. Occorre preventivamente classificare i punti della nuvola distinguendo quelli appartenenti all'edificato da quelli relativi al terreno o alla vegetazione. Una successiva possibilità di analisi consiste, in seguito ad un processo di segmentazione, nello sfruttare le relazioni di adiacenza tra triangoli di strutture TIN (*Triangulated Irregular Network*), raggruppandoli mediante l'analisi di alcune proprietà per identificare le singole falde dei tetti che vengono approssimati da piani (Ackermann et al., 2007). Infine, sono in sviluppo nuovi studi per sfruttare metodologie ereditate dalla *Computer Vision*, utilizzando formulazioni statistiche adattate localmente alla nuvola di punti, sostituendo così le ricostruzioni dell'edificato basate sulla ricerca di modelli e geometrie primitive che perdono di efficienza all'aumentare della densità del dato LiDAR (Rottensteiner, 2012). Ulteriori tecniche sfruttano un approccio ibrido, utilizzando primitive tridimensionali per le coperture più semplici, unitamente a porzioni di *mesh* per rappresentare le parti più irregolari (Lafarge, Mallet, 2011).

Un software di recente introduzione che svolge tale funzione, *ENVI LiDAR*, è stato testato con il *dataset* a disposizione. Viene effettuata innanzitutto una classificazione della nuvola di punti: tramite analisi spaziali, geometriche e sull'intensità dell'impulso laser, è possibile differenziare automaticamente i punti che appartengono a coperture di fabbricati da quelli appartenenti a vegetazione o terreno. Se la nuvola di punti risulta sufficientemente densa diviene possibile estrarre la geometria delle catenarie dei cavi dell'alta tensione e posizionarne i pali. Successivamente viene seguito un flusso semiautomatico di analisi per estrarre *feature* dagli elementi precedentemente classificati creando superfici vettoriali. Si può operare, attraverso un processo iterativo, con strumenti di analisi spaziale ed editing manuale per rifinire al meglio i vettori ove sia necessario. A

tale scopo sono a disposizione diversi strumenti software; uno di essi è per esempio il *Cross Section Tool* per evidenziare in planimetria una sezione dove sia necessario modificare manualmente i vertici di alcune *feature* per rendere le superfici congruenti tra loro ed adattarle al meglio alla nuvola locale di punti.

### La sperimentazione effettuata

Per valutare le potenzialità del dato LiDAR per la creazione, con un elevato processo di automazione, di un *3D City Model* in ambito urbano, si aveva a disposizione un dataset derivante da un rilievo laser a scansione effettuato nel 2009 sull'area di Bologna; tale dataset copre solo parzialmente il territorio della città ed offre una densità media di un punto per m<sup>2</sup>, che è comune per questi tipi di rilievi ma che, considerato l'obiettivo del lavoro, risulta modesta per rappresentare al meglio i piani di falda e le relazioni che intercorrono tra loro (Creati et al., 2007). Per testare al meglio la metodologia, si è quindi operato in particolare nell'area di sovrapposizione fra strisciate adiacenti, laddove quindi la densità dei punti risulta più elevata, fino a 4 o 5 punti al metro quadrato. La quota relativa di volo durante l'acquisizione della nuvola di punti, avvenuta con uno strumento *Optech ALTM 3033* ad una frequenza di 33 kHz, è stata mantenuta a circa 1250 metri sopra il terreno. Tra i parametri di acquisizione delle strisciate aeree vi è un FOV (*Field Of View*) di +/- 11 gradi ed una distanza media tra gli assi delle strisciate adiacenti di circa 320 metri. Di ogni impulso laser è stato registrato il primo e l'ultimo ritorno. Si ha una buona accuratezza sulla componente altimetrica, pari circa a 20 cm, mentre l'accuratezza planimetrica dei punti rilevati risulta essere intorno ai 60 cm. Tale parametro risulta fondamentale per una buona mappatura degli edifici sul territorio, e può essere valutato con precisione confrontando le linee di colmo degli edifici presenti su strisciate aeree adiacenti (Vosselman, 2008).

L'esempio riportato in Figura 2 si riferisce alla geometria di un generico edificio estratto con il software *ENVI LiDAR*. Si può notare come la densità dei punti rilevati su ogni singola falda non sia particolarmente elevata e presenti un andamento irregolare: risulta più elevata nella direzione trasversale alla linea di volo, mentre la distanza tra una riga di acquisizione e la successiva è maggiore e può comportare, in alcuni casi limite, una discontinuità locale nell'estrazione automatica dell'edificio.

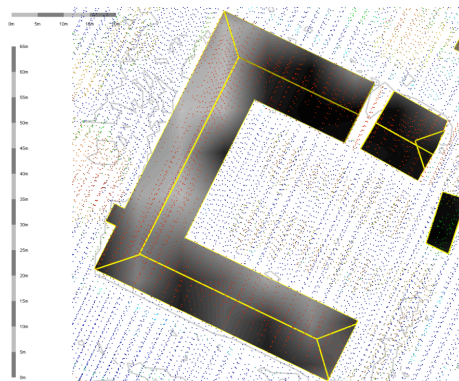


Figura 2. Prima ricostruzione automatica di un edificio di esempio.

Dopo la prima ricostruzione della forma degli edifici si può procedere ad una fase di *Quality Assurance*, procedura manuale attraverso la quale è possibile modificare ogni *feature* estratta, selezionando la singola falda di copertura e modificandone i nodi trasladoli nel piano su cui giacciono i punti laser scanner (Figura 3), semplificando le geometrie o rendendole congruenti allo stato di fatto, oppure inserendo manualmente nuove superfici che si adattino alla nuvola di punti nella zona in cui si sta operando.

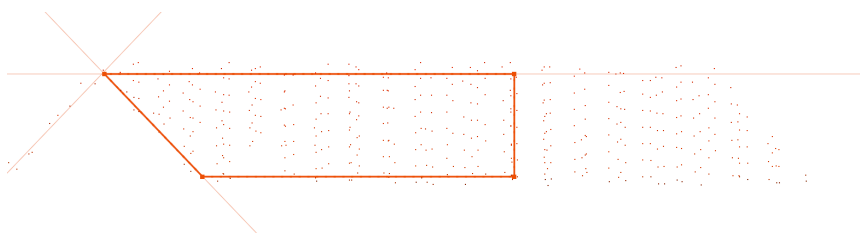


Figura 3. Sezione della falda interrotta.

Ulteriori problematiche possono insorgere nel caso di una erronea classificazione. Nel dettaglio, mostrato in Figura 4, l'alta vegetazione adiacente al tetto dell'edificio, rilevata dal laser scanner, può venire classificata non correttamente ed attribuita alla classe edificato. Di conseguenza, durante la modellazione delle falde di copertura, tale area viene integrata nella superficie del tetto. E' quindi opportuno modificare localmente la falda fino ad escludere tali punti, variando la classificazione ed attribuendoli alla categoria vegetazione.

La Figura 5 mostra il modello 3D dell'edificio dopo le correzioni apportate.

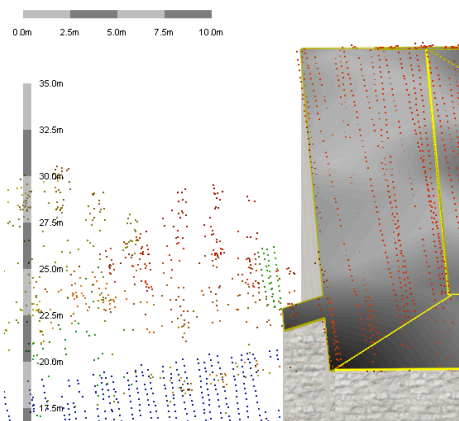


Figura 4. Correzione manuale da apportare in caso di classificazione erronea.

L'edificio estratto, utilizzato negli esempi precedenti, è stato confrontato con quello registrato all'interno della CTC, distribuita come Open Data dal Comune di Bologna. Vi è una buona corrispondenza tra i due dati ed un modesto allargamento della falda nella rappresentazione ottenuta da rilievo LiDAR. Questo fenomeno è dovuto alla dimensione a terra dello spot dell'impulso laser scanner, che avendo un diametro nominale linearmente crescente con la quota di volo, nonostante la bassa divergenza del fascio laser, riceve un eco del segnale anche da oggetti disposti ai margini. Essendo il sistema incapace di determinarne la posizione effettiva all'interno dello spot, assegna quella baricentrica (Beinat, Sepic, 2008) provocando quindi un effettivo offset nel caso di punti rilevati a cavallo della linea di gronda della falda. I dati rilevati tramite laser scanner aereo possiedono infatti una buona accuratezza sulla componente verticale, ma il posizionamento planimetrico dei punti della nuvola risulta essere generalmente peggiore di quello altimetrico (Maas, 2003). E' opportuno tenere conto di tale caratteristica durante il processo di estrazione delle geometrie dell'edificato.

E' possibile effettuare un confronto tra differenti dati in forma numerica, come nel caso dell'analisi tra la superficie dell'edificato riportata in Carta Tecnica e quella estratta con questa procedura dai dati LiDAR, utilizzando una matrice di confusione ed il *Kappa Index* (Shirowzhan, Lim, 2012).

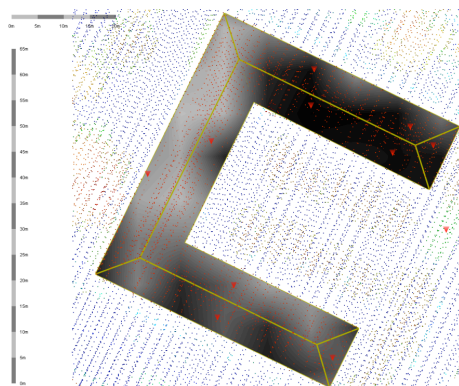


Figura 5. Risultato finale dopo le correzioni manuali.

Terminata la fase del *processing* e degli interventi correttivi manuali, si procede esportando i dati per elaborazioni successive. Con questi *dataset* in output ci sono molteplici possibilità per elaborare una stima della radiazione solare. E' possibile procedere con analisi in ambiente GIS sfruttando un algoritmo di *Solar Radiation Analysis*, che opera su dati *raster*, già utilizzato con successo per l'applicativo *Bologna Solar City*. Occorre quindi trasformare le superfici vettoriali in un grigliato e delimitarne tramite i propri perimetri l'area di analisi (Africani et al., 2013).

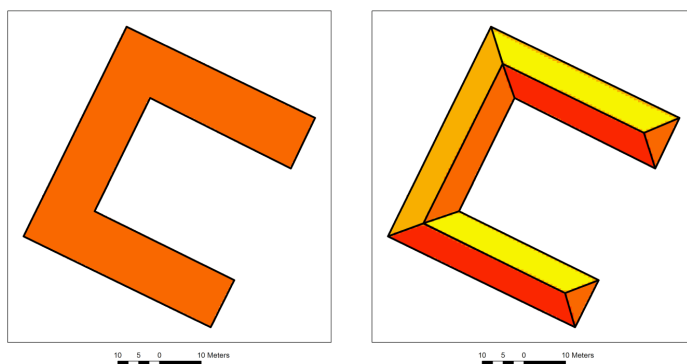


Figura 6. Analisi Solar Radiation su tetto piano (sinistra) e su tetto a falde (destra).

Attraverso tale procedura è possibile valutare la sola radiazione solare ricevuta dalle falde esposte favorevolmente, sulle quali risulterebbe quindi economicamente sostenibile l'installazione di pannelli solari o fotovoltaici. Nell'esempio mostrato, il contributo energetico ricevuto dalle sole superfici orientate a Sud del modello con tetto a falda, rappresentato a destra in Figura 6, è pari al 18,4% della radiazione ricevuta dal modello semplificato con l'intero tetto assunto piano, rappresentato a sinistra in Figura 6.

Un flusso di lavoro alternativo, percorribile senza trasformare in *raster* i dati ottenuti, è stato sviluppato in ambiente *IDL*, analizzando i dati vettoriali come *mesh*, e con un ulteriore codice scritto *ad hoc* per estrarre i versori normali ad ogni superficie del tetto (Figura 7). Da tali versori è noto l'orientamento nello spazio della falda di copertura, unitamente all'informazione dell'area a disposizione, ed è quindi possibile calcolare la radiazione solare complessiva per ogni singolo edificio, differenziando il contributo delle diverse superfici.



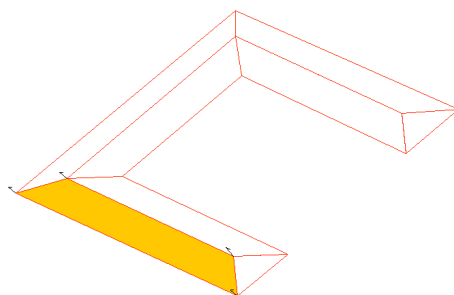


Figura 7. Vettori normali alla superficie nella falda evidenziata.

La disponibilità di un modello 3D di questo tipo rende anche possibile rapportare la superficie della copertura, o dell'intero edificio, al volume complessivo per compiere successive analisi dal punto di vista energetico.

L'applicazione di questa metodologia su vaste aree si può rivelare produttiva con tempi e costi di elaborazione direttamente collegati alla densità della nuvola di punti a disposizione; essa è certamente di notevole interesse, rispetto ad altre tecniche, per ottenere una realizzazione speditiva del modello urbano, anche per aree in cui non sia disponibile la cartografia numerica.

La Figura 8 mostra il risultato finale su un'area estesa, un *3D city model* fruibile per ulteriori valutazioni, sia qualitative (es. generazione di modelli tridimensionali interattivamente navigabili da parte degli utenti) che quantitative.



Figura 8. Vista panoramica dei modelli 3D degli edifici estratti dal software.

## Conclusioni

Dalla prima sperimentazione effettuata si è visto come, avendo a disposizione dati da laser scanner aereo, vi siano oggi tecniche promettenti per generare modelli tridimensionali ad alta fedeltà delle città. La maggiore criticità risiede nella densità di questi *dataset*: risulta quindi necessario prevedere specifici voli LiDAR con densità adeguate.

Avendo a disposizione una nuvola di punti 3D adeguata allo scopo è possibile ottenere un elevato dettaglio geometrico di rappresentazione, congruente con la realtà. E' stato utilizzato in tale senso un nuovo software, *ENVI LiDAR*, specifico per l'estrazione automatica di *feature*, che si è rivelato efficace in questo tipo di analisi; il processo inizia con una classificazione dei dati grezzi ottenuti dal volo e procede, con un elevato livello di automazione, all'estrazione di varie tipologie di entità come edifici, vegetazione e terreno.

Un *dataset* ad alta densità consentirebbe certamente di ottenere una maggiore accuratezza nella modellazione delle falde di copertura e minimizzare gli interventi manuali per correggere i punti critici, evidenziati in questo lavoro.

Un flusso di lavoro di questo tipo, in gran parte automatizzato e con tempi e costi di elaborazione contenuti, consente di realizzare diverse applicazioni ambientali, anche per aree e situazioni in cui non sia disponibile la cartografia numerica del territorio.

In ambito energetico, il modello che si può ottenere da una nuvola di punti ad adeguata risoluzione fornisce una più accurata stima della radiazione solare e consente di compiere analisi più approfondite, tenendo per esempio in considerazione l'ombreggiamento che l'alta vegetazione adiacente gli edifici può causare sulle falde di copertura. Si potrebbero inoltre modellare anche le più piccole discontinuità presenti sul tetto che, entrando in conflitto col posizionamento di pannelli solari o fotovoltaici, riducono la superficie utile installabile: comignoli, abbaini e finestrate.

I modelli energetici, che possono anche essere di supporto alle decisioni, potrebbero infine giovare di tali soluzioni fornendo risultati di maggiore accuratezza, potendo disporre per gli edifici di parametri geometrici più corretti nella quantificazione delle superfici e dei volumi in gioco.

### **Bibliografia**

Ackermann S, Miele D, Rizzardi M, Troisi S. (2007) "3D modelling da dati LiDAR", *Atti 11a Conferenza Nazionale ASITA*

Africani P, Bitelli G, Lambertini A, Minghetti A, Paselli E. (2013) "Integration of LIDAR data into a municipal GIS to study solar radiation", *ISPRS Archives*, XL-1/W1: 1-6

Beinat A, Sepic F. (2008) "Verifica planimetrica di rilievi lidar da aeromobile tramite elementi lineari: Metodo e sperimentazione", *Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA*, 323-328

Bitelli G, Conte P. (2011) "Techniques, tools and workflow for remote sensed roof temperature mapping in some cities across Central Europe", *Proceedings 17th International Conference Building Services, Mechanical and Building Industry Days - Urban Energy Conference*, Debrecen, 49-56

Creata N, Sterzai P, Coren F. (2007) "Estrazione e ricostruzione 3D automatica di edifici da dati laser a scansione", *Atti 11a Conferenza Nazionale ASITA*

Lafarge F, Mallet C. (2011) "Building Large Urban Environments From Unstructured Point Data", *International Conference on Computer Vision*, 1068-1075

Maas H. (2003) "Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: User requirements and system performance", *Proceedings of Photogrammetric Week 49*, 117-125

Minghetti A, Africani P, Lorenzini L, Paselli E. (2010) "Bologna Solar City, una web application per l'analisi dell'energia potenziale: dalla stima della radiazione solare alla realizzazione dell'applicazione", *Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA*, 1345-1350

Rottensteiner F. (2012) "Advanced methods for automated object extraction from LiDAR in urban areas", *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 5402-5405

Rottensteiner F, Briese C. (2002) "A New Method for Building Extraction in Urban Areas from High-Resolution LIDAR Data", *ISPRS Commission III WGIII/3 XXXIV(3)*, 295-301

Shirowzhan S, Lim S. (2012) "Extraction of polygon footprints from lidar data in an urban environment", *ICSDEC*, 246-251

Vosselman G. (2008) "Analysis of Planimetric Accuracy of Airborne Laser Scanning Surveys", *ISPRS Commission III, WG III/3 XXXVII(3A)*, 99-104

### **Ringraziamenti**

Si ringraziano Paola Africani ed Elisa Paselli dell'Unità SIT del Comune di Bologna. I dati LiDAR sono stati acquisiti da Blom CGR S.p.a. Parte della sperimentazione si è svolta nell'ambito del progetto europeo ENERGYCITY (EU CENTRAL EUROPE ID: 2CE126P3).