

TECNICHE INTEGRATE DI REMOTE SENSING E GIS A SUPPORTO DELLA STIMA DEL POTENZIALE FOTOVOLTAICO SU TETTI IN AREE URBANE

REMOTE SENSING AND GIS INTEGRATED TECHNIQUES TO SUPPORT THE ASSESSMENT OF ROOFS PHOTOVOLTAIC POTENTIAL IN URBAN AREAS

Flavio Borfecchia*, Maurizio Pollino*, Luigi De Cecco*, Sandro Martini*,
Luigi La Porta*, Alessandro Marucci**, Emanuela Caiaffa*

Riassunto

Le ultime linee guida approvate dal Governo Italiano per sostenere finanziariamente il fotovoltaico (PV) e lo sviluppo della produzione di energia solare (Quarto e Quinto Conto Energia, Gennaio 2012 e succ.), al fine di evitare il consumo di suolo in aree agricole o naturali, comprendono indicazioni specifiche che rendono più vantaggiosa l'installazione d'impianti su tetti o superfici di copertura di edifici. In questo contesto diventa importante, per una adeguata attività di pianificazione e monitoraggio del PV, la mappatura estensiva delle superfici a disposizione, coincidenti con i tetti e l'accurata valutazione del loro potenziale fotovoltaico. Dal momento che tali coperture si trovano soprattutto nelle aree urbane o industriali, in cui fattori come eterogeneità tridimensionale, albedo, torbidità atmosferica ed ombreggiamenti reciproci influenzano in modo significativo l'irraggiamento solare locale, è necessario tenere conto adeguatamente di questi elementi mediante una mappatura GIS tridimensionale ed avanzati strumenti di modellazione, in modo da stimare efficacemente la radianza solare disponibile a livello dei tetti. La metodologia implementata, basata su tecniche di telerilevamento e GIS, ha permesso di valutare e mappare la radiazione solare globale su tutti i tetti presenti nel territorio del Comune di Avellino. Partendo da dati di tipo LIDAR, è stato ottenuto in primo luogo il DSM di tutta l'area di interesse (~ 42 Km²), quindi il modello tridimensionale di ogni edificio da cui sono stati derivati i parametri geometrici di tutte le coperture. Per tenere conto della trasparenza atmosferica e della percentuale di radiazione solare (diffusa/diretta) sulle superfici di interesse, sono stati utilizzati i dati e gli strumenti applicativi presenti sul sito web PVGIS, sviluppato dalla UE. L'elaborazione finale, basata sull'utilizzo di strumenti GIS anche di tipo *open source*, ha permesso di ottenere le mappe di radianza solare e di potenziale PV per tutti i tetti presenti nell'area di studio.

Parole chiave: GIS, Telerilevamento, Fotovoltaico, Radiazione Solare, LIDAR

Abstract

The last guidelines approved by Italian government to financially support the solar Photovoltaic (PV) Energy production development (Fourth and Fifth feed-in-scheme, January 2012 and later),

* ENEA – Unità Tecnica Modellistica Energetica ed Ambientale (UTMEA), C.R. Casaccia, Via Anguillarese, 301 – 00123 Roma, e-mail: flavio.borfecchia@enea.it

** Abruzzo Ambiente Srl

in order to avoid soil consumption in agricultural or natural areas, include specific indications for more advantageously funding the installations exploiting roofs or covers surfaces. In this context it becomes important, for a suitable PV planning and monitoring, the extensive mapping of the available surfaces extent, usually corresponding to covers and properly assessing their quality in term of PV potential. Since the covers are mainly located in urban or industrial areas, whose 3D heterogeneity, albedo, atmospheric turbidity and casting shadows significantly influence the local solar irradiance, it is necessary to suitably account for these distributed factors by means of GIS mapping and advanced modeling tools in order to provide realistic estimates of solar available radiance at roofs level. The implemented methodology, based on remote sensing techniques, has allowed to estimate and map the global solar radiance over all the roofs within Avellino municipality. Starting from LIDAR data, DSM of the entire area of interest (~42 Km²) has been firstly obtained; then the 3D model of each building and related cover has been derived. To account for the atmospheric transparency and the related time-dependent diffuse/direct radiation percentage on the area, data and tools from EU PVGIS web application have been also used. The final processing to obtain the solar radiance maps has been carried out using specific software modules available within commercial and open-source GIS packages.

Keywords: GIS, Remote Sensing, Photovoltaic, Solar radiation, LIDAR

I. Introduzione

Con l'entrata in vigore del Decreto Legge del 5 maggio 2011 e successive modificazioni (c.d. "Decreto liberalizzazioni" del 24 gennaio 2012) le incentivazioni all'installazione d'impianti per la produzione di energia da fotovoltaico (PV) sono regolamentate dall'insieme delle disposizioni applicative contenute nel cosiddetto 4° Conto Energia (GSE, 2011), con il quale si è inteso continuare a sostenere la crescita nazionale del mercato fotovoltaico, seppure secondo un nuovo regime di riduzione progressiva delle tariffe incentivanti tendente ad eliminare alcune distorsioni.

Nel summenzionato decreto, infatti, c'è un chiaro orientamento teso a privilegiare e supportare maggiormente la diffusione degli impianti PV sui tetti degli edifici rispetto a quelli installati a terra, al fine di evitare il consumo di suolo, in special modo quello destinato ad uso agricolo (Murgante & Danese, 2011, pp. 16-28; Di Fazio et al., 2011, pp. 284-299; Fichera et al., 2012, pp. 1-18).

In termini di pianificazione e controllo (Murgante et al., 2011, pp. 1-15), pertanto, assume un'importanza rilevante poter effettuare una stima estensiva ed efficace della disponibilità e del potenziale PV della superficie utile, relativa alle coperture esistenti di strutture residenziali ed industriali. Ciò, ovviamente, riguarda direttamente e specificatamente gli agglomerati urbani, dove questo tipo di *Land Cover* (LC) è densamente rappresentato.

Al fine di una mappatura del potenziale PV in aree urbane è ormai consolidato l'uso di strumenti GIS (Caiaffa, 2003, pp.36-41; Huld et al., 2005; Šúri & Hofierka, 2004, pp. 175-190; Caiaffa et al., 2012, pp. 532-547), nel cui contesto sono state sviluppate metodologie basate sul calcolo della radianza solare, utilizzando i parametri di orientamento ed esposizione derivati dalle mappe di rilievo naturale come DEM (*Digital Elevation Model*) o DTM (*Digital Terrain Model*). Nel caso in cui, invece, si operi in ambiente urbano (Pellegrino et al., 2008; Cebeacauer et al., 2007, pp. 3553-3557; Balena et al., 2012, pp. 116-127), per ottenere una stima maggiormente realistica diviene necessario tener conto in modo più dettagliato delle superfici di copertura e dei relativi parametri geometrici (superficie ed assetto) e radiometrici (rifletanza ambientale).

Il caso di studio qui descritto è localizzato nel territorio del Comune di Avellino (348 m s.l.m., distante circa 60 km da Napoli, 56.368 abitanti nel 2010). La città di Avellino è situata al centro di una pianura denominata "Conca di Avellino", circondata a NO dai monti del Massiccio del Partenio

(Monti di Avella, Montevergine e Pizzo d'Alvano) e a SE dai Monti Picentini. La zona di Avellino fu duramente colpita dal disastroso terremoto dell'Irpinia del 23 novembre 1980 (intensità pari a 6,9 nella scala Richter), che provocò quasi 3.000 vittime, più di 80.000 feriti e lasciò 280.000 persone senzatetto. Per la ricostruzione delle aree distrutte o danneggiate dal sisma lo Stato Italiano ha speso negli ultimi trent'anni circa 30 miliardi di Euro. Inoltre, al fine di governare la ricostruzione, sono stati emanati numerosi strumenti legislativi (leggi, decreti, ordinanze): tra questi va menzionata la Legge n. 219/81, che assegnò a ciascun Comune terremotato la gestione degli strumenti urbanistici, sotto il coordinamento della Regione Campania. Dal 2006, la pianificazione territoriale di Avellino e dei Comuni limitrofi è regolata da due strumenti urbanistici: il P.I.C.A. (Progetto Integrato Città di Avellino) ed il P.U.C. (Piano Urbanistico Comunale).

2. Metodologia

2.1 L'approccio proposto

In Figura 1 è riportato un output ottenuto utilizzando l'applicazione web disponibile sul sito "Photovoltaic Geographical Information System GIS" – PVGIS (JRC-IET, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>), sviluppato dall'UE a supporto degli studi e delle analisi relative all'uso del fotovoltaico nel territorio Europeo (Šúri et al, 2005, pp. 55-67; Šúri et al, 2007, pp. 1295-1305). In particolare, per l'area urbana della provincia di Avellino, la figura riporta nella parte destra la mappa di radiazione media annuale (ricavata da DTM); a sinistra, invece, sono riportati i valori della radiazione e del relativo potenziale PV per la produzione elettrica (per angolo d'inclinazione ottimale e non). Per la discriminazione di tipologie di uso del suolo (urbano, rurale, naturale, ecc...), l'approccio metodologico su cui si basa l'applicazione PVGIS fa riferimento ai dati del *Corine Land Cover* (CLC) 2006.

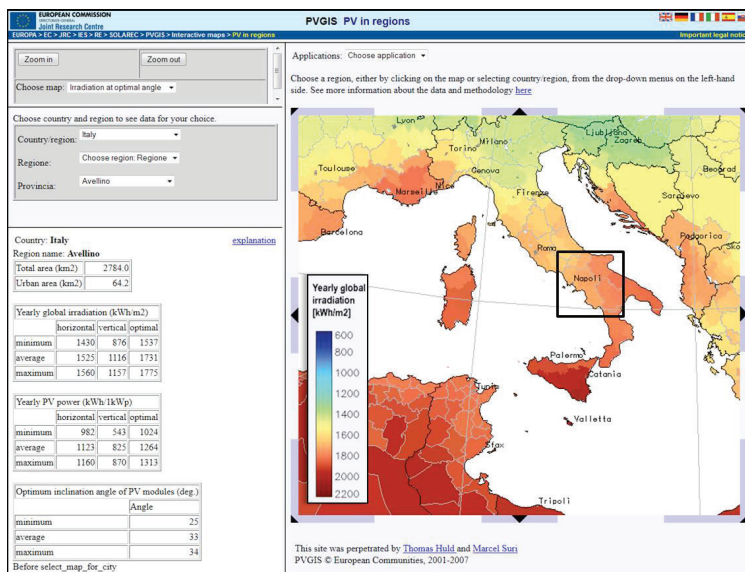


Fig. 1 – Mappa di radiazione solare media annuale su superficie inclinata in modo ottimale (destra) e stima per l'area urbana di Avellino unitamente alla produzione elettrica ottenibile. Fonte: "Photovoltaic Geographical Information System GIS" – PVGIS, realizzato da JRC-IET, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>.

Occorre tuttavia osservare che, in approcci simili al summenzionato la stima della radiazione disponibile per lo sfruttamento mediante PV delle aree urbane si basa solo su DTM (pendenze/esposizioni naturali) e classi di CLC, per cui la caratterizzazione di tali ambiti risente fortemente della limitata accuratezza delle informazioni di partenza. Di conseguenza, si tende a sovrastimare eccessivamente i valori di produzione potenziale, poiché in realtà le aree di copertura effettivamente sfruttabili in aree urbanizzate sono solo una frazione di quelle complessivamente misurate sulla base del solo CLC. Inoltre, le superfici dei tetti hanno solitamente parametri di inclinazione ed orientamento diversi da quelli della superficie naturale sottostante (ricavati, come detto, da DTM) e, quindi, ben diversi da quelli ottimali per il sito di interesse.

Pertanto, al fine di migliorare le valutazioni estensive del potenziale fotovoltaico dei tetti, è necessario ricorrere ad un approccio metodologico basato su una migliore caratterizzazione delle aree urbane, che tenga conto con maggiore dettaglio della reale superficie disponibile dei tetti nonché della loro orientazione ed inclinazione.

In quest'ottica, l'individuazione delle coperture potenzialmente sfruttabili per impianti fotovoltaici presuppone la descrizione geometrica dell'edificio o dell'infrastruttura, espressa sotto forma di un modello tridimensionale reale della superficie. Tale modello deve essere comprensivo sia delle altimetrie naturali sia delle altezze dei manufatti, come le strutture residenziali ed industriali. Per ottenere simile modello è possibile ricorrere ai rilievi LIDAR (*Light Detection and Ranging*), da quali si ricava il modello digitale tridimensionale denominato DSM (*Digital Surface Model*), sotto forma di nuvola di punti (*point cloud*). Il DSM, dotato di adeguata risoluzione spaziale, può essere convenientemente sfruttato per una caratterizzazione più efficace dell'ambiente urbano (Ackermann, 1996, pp. 24-25), anche ai fini di una migliore stima del potenziale fotovoltaico delle coperture.

Oltre alla struttura tridimensionale dell'ambiente urbano, occorre anche tenere conto della sua eterogeneità in termini di potere riflettente delle superfici ed ombreggiature reciproche. Tali fattori influenzano notevolmente l'irradianza solare locale, quale fonte primaria per la produzione fotovoltaica. Pertanto, nel definire un più dettagliato approccio metodologico è necessario tenere conto dell'effetto attenuativo dell'atmosfera e valutare adeguatamente anche fattori quali l'albedo¹ e la torbidità atmosferica (dovuta alla presenza di aerosol). Per la stima di quest'ultima sono disponibili serie storiche sotto forma di mappe tematiche (ricavate da misure a terra o aerospaziali). Inoltre, oltre che la riflettanza e la posizione dei singoli oggetti nello spazio tridimensionale circostante le superfici di interesse, assume importanza anche la loro forma derivabile – ad esempio – dal DSM.

Tenendo conto di queste esigenze, l'approccio seguito nell'ambito delle attività di ricerca descritte nel presente articolo si basa su metodologie e strumenti innovativi incentrati su dati aerospaziali, al fine di ottenere la stima estensiva dei parametri geometrici e tipologici degli edifici nell'area urbana del Comune di Avellino, in modo da supportare una valutazione maggiormente accurata del potenziale PV locale.

In particolare, per la caratterizzazione dell'urbanizzato si è fatto ricorso all'uso integrato di dati aerospaziali provenienti sia da rilievi di tipo LIDAR (DSM per la ricostruzione tridimensionale delle coperture di ogni edificio), sia da immagini satellitari multispettrali (Baltsavias, 1999, pp. 83-94; Axelson, 1999, pp. 138-147). Inoltre, per tener conto delle componenti diffusa e riflessa della radiazione solare, inclusa la copertura nuvolosa, ci si è avvalsi dei prodotti e delle funzionalità messi a disposizione dall'applicazione web PVGIS.

¹ Per albedo di una superficie si indica la frazione di radiazione incidente (in questo caso quella solare) che viene riflessa in tutte le direzioni dello spazio. L'albedo, pertanto, è la riflettanza emisferica spettralmente integrata.

2.1. Irradianza solare

La radiazione solare (Zaksek et al., 2005, pp. 233-240) che arriva sulla Terra (G_0) ammonta mediamente a 1360 W/m^2 , con variazioni sino a circa il 7% dipendenti principalmente dalla distanza Terra-Sole. La sua distribuzione spettrale è approssimativamente quella di un corpo nero a circa 6000 C° , con massimo nell'intervallo del visibile e linee d'assorbimento dovute ai vari elementi diffusi nello spazio percorso dalla radiazione solare (Figura 2).

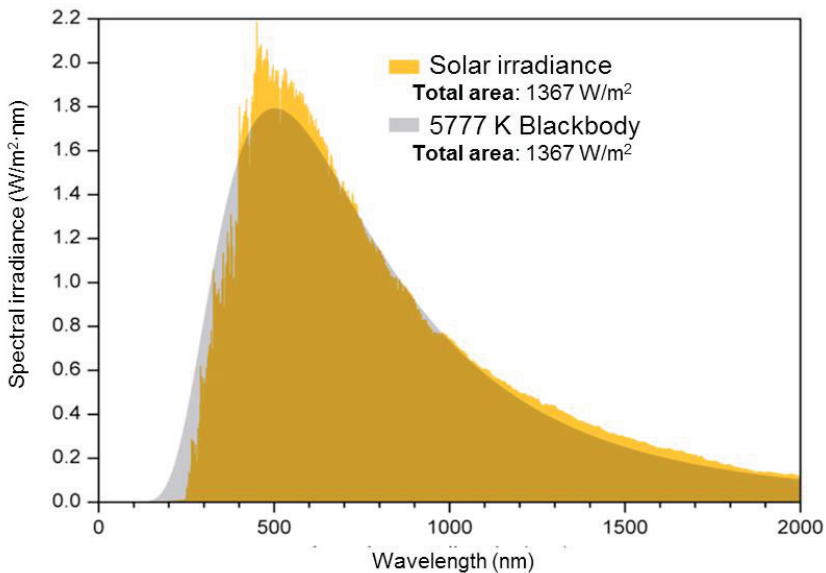


Fig. 2 – Distribuzione spettrale dell'irradianza solare.

Nell'attraversare l'atmosfera, una parte dell'energia incidente si perde per effetto di varie interazioni, sino ad arrivare ad una disponibilità media al suolo di circa $900\text{-}1000 \text{ W/m}^2$ ed il cui andamento stagionale dipende dall'altezza del sole e dalla latitudine (Duffie & Beckman, 1991). Questo valore è dato dal contributo di diverse componenti, la cui entità varia in funzione della trasparenza atmosferica locale, dell'assetto geometrico della superficie d'incidenza, nonché della sua collocazione e delle proprietà di riflettanza (albedo) dell'ambiente tridimensionale circostante. Dal valore di trasparenza/torbidità atmosferica dipende la percentuale di radianza che arriva direttamente dal sole (*beam radiation*) a cui si aggiunge la componente indiretta (*diffuse radiation*), proveniente dalle varie direzioni dell'emisfero atmosferico sovrastante. Quest'ultima cresce con il diminuire della trasparenza atmosferica, che riduce parallelamente la componente diretta ed è caratterizzata dal fattore di torbidità atmosferica di Linke (*Linke turbidity factor*, T_{LK} , Linke, 1922, pp. 91-103), definito come il rapporto tra l'attenuazione attuale dell'atmosfera e quella corrispondente ad una situazione di "clear-sky" sull'intero spettro. La componente diffusa della radiazione solare su una superficie orizzontale dipende da T_{LK} e dall'angolo di elevazione solare oraria (Scharmer & Greif, 2000). In tal modo è possibile calcolare un valore teorico dell'irradianza diffusa su una superficie orizzontale, in funzione del fattore di torbidità di Linke della massa d'aria, distinguendo tra superfici soleggiate, potenzialmente soleggiate e ombreggiate (Muneer, 1990, pp. 153-163).

In Figura 3, ad esempio, sono riportati gli andamenti giornalieri (sinistra) dell'irradianza diretta e diffusa su una superficie inclinata di 35° ed orientata a sud (0°) per il sito di Avellino. Essi sono stati calcolati sulla base della torbidità atmosferica media locale del mese di Giugno, derivata dalla serie storica disponibile tramite l'applicazione PVGIS. Nello stesso grafico è riportata, altresì, l'irradianza diretta in situazione di "clear sky" per lo stesso sito. Nella parte destra di Figura 3, invece, è riportato l'andamento medio mensile della frazione diffusa per lo stesso sito. Come è possibile osservare, la percentuale diffusa risulta rilevante e può arrivare a circa 35-55% del totale, con massimi nei mesi invernali. L'altro fattore che incide notevolmente sull'energia solare intercettata da una superficie è il suo assetto geometrico, in termini di pendenza ed esposizione, che richiede di essere mantenuto quanto più possibile perpendicolare ai raggi solari per massimizzare l'irraggiamento globale.

Dai grafici in Figura 4, ottenuti sempre mediante l'applicativo PVGIS, si evidenzia come l'angolo d'inclinazione ottimale vari durante l'anno con l'altezza del sole; per impianti fissi la selezione ricade su un valore di circa 33° (andamento dell'irradianza totale, curva di colore nero nel grafico di sinistra di Figura 4).

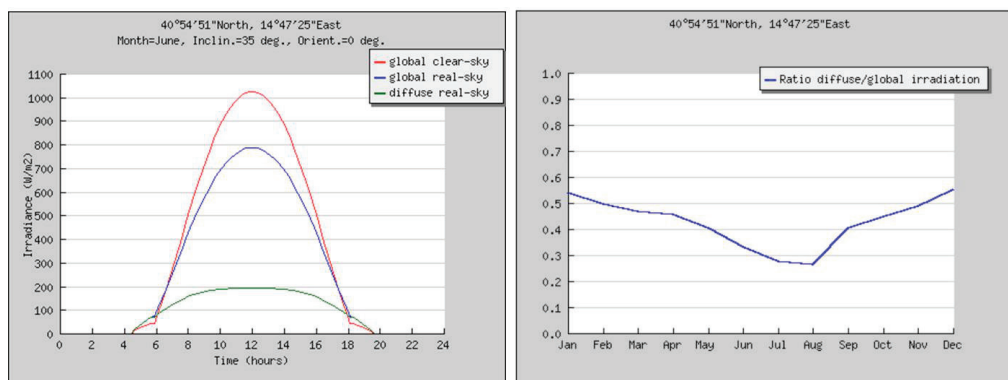


Fig. 3 – Grafici di: a) irradianza solare oraria (periodo: Giugno) e b) rapporto tra i valori di irradianza diffusa e globale mensile.

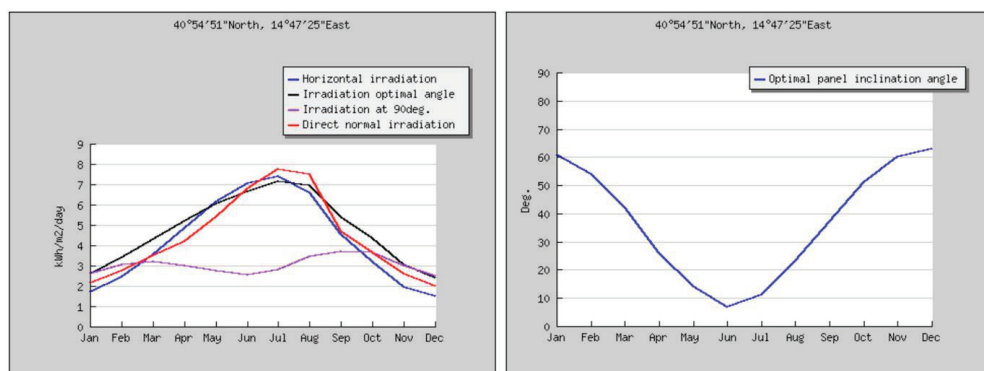


Fig. 4 – Stima dell'irradianza su superfici a diversa inclinazione ed orientamento a sud (sinistra) ed inclinazione ottimale (destra) per la locazione del Comune di Avellino.

2.2 Estrazione dei parametri tridimensionali

In generale, il potenziale fotovoltaico si valuta estensivamente con tecniche GIS sulla base dell'irradianza stimata al suolo, considerando i parametri di assetto ottenuti dalla mappa delle altimetrie naturali sotto forma di DTM (Caiaffa et al., 2012, pp. 532-547). Questi valori di elevazione, tuttavia, non coincidono con quelli effettivi delle coperture degli edifici che insistono sulla stessa area (realmente sfruttabili per la produzione fotovoltaica). In quest'ottica, è importante avere a disposizione una fonte di dati più dettagliata quale il DSM ottenuto tramite rilevamenti LIDAR. Esso, pur essendo formalmente un prodotto simile al DTM, possiede una risoluzione notevolmente più spinta, dal momento che include anche la mappatura tridimensionale dei manufatti e degli edifici. Pertanto, il DSM è più proficuamente utilizzabile sia per l'individuazione delle coperture, sia per la loro caratterizzazione in termini di superficie utile e relativi parametri di assetto, necessari per una stima realistica del potenziale fotovoltaico. Inoltre, la ricostruzione tridimensionale così ottenuta, unitamente ad una mappa dell'albedo, permette di stimare i rimanenti contributi d'irradianza in termini di ombreggiamento e di riflettanza da parte dell'ambiente circostante. In particolare, ai fini della massimizzazione dell'energia solare intercettata, è importante avere una misura delle pendenze e – soprattutto – dell'orientamento delle coperture potenzialmente sfruttabili, tenendo anche conto che tali parametri sono solitamente variabili per le diverse falde che compongono i tetti.

A tal fine, la ricostruzione tridimensionale del terreno e dell'edificato dell'area di interesse è stata ottenuta mediante il ricorso a tecniche e metodologie per l'elaborazione di dati LIDAR (Gabet et al., 1996, pp. 33-47), opportunamente acquisiti su tutto il territorio comunale di Avellino. Tenuto conto delle esigenze specifiche, il rilievo è stato condotto mediante un sistema LIDAR tipo ALTM3100 della canadese Optech², installato su un elicottero e con un piano di volo adeguato a ricoprire l'intero territorio comunale, per la delineazione ottimale delle aree urbanizzate. Il prodotto finale del rilievo, ottenuto da un processo di preelaborazione dei dati grezzi, è stato organizzato in *file* contenenti i dati sotto forma di *point cloud* ("nuvola di punti") per un totale di 48 elementi ("tavole") di 1 km x 1 km, corrispondenti all'estensione superficiale dell'intero Comune, pari a circa 42 Km². In corrispondenza di ogni tavola sono state effettuate almeno 2 linee di controllo acquisite normalmente alla direzione media delle strisciate principali. Queste acquisizioni definite come "*tie lines*" sono state eseguite ogni 10 km circa e servono da verifica al corretto funzionamento del sistema a scansione, nonché a determinare e correggere eventuali derive strumentali³.

Tramite opportune tecniche di filtraggio, dai dati LIDAR sotto forma di nuvola di punti sono stati ottenuti un modello digitale del suolo nudo (DTM) ed un modello digitale complessivo delle elevazioni (DSM). Grazie alla possibilità di escludere la vegetazione (il sensore laser gestisce impulsi di ritorno multipli) ed alla grande quantità di punti direttamente misurati e non interpolati, la descrizione 3D ottenuta dai dati LIDAR risulta assai definita dettagliata, specialmente in corrispondenza delle zone densamente urbanizzate (Borfecchia et al., 2010, pp. 129-141).

² Alcuni dati tecnici: frequenza di acquisizione di 100 kHz; altezza di volo di circa 1000 m; ampiezza e risoluzione del dato laser: 4 impulsi di ritorno; quattro misure/punti per metro quadrato, con accuratezza verticale decimetrica. I dati ottenuti in formato interoperabile sono caratterizzati dai seguenti parametri: Incertezza orizzontale $H_{Max} \leq 40\text{cm}$; Incertezza verticale $V_{Max} \leq 2 H_{Max}$; Densità DSM/DTM ≥ 4 punti al m².

³ Si è operato riducendo le distanze massime (inferiori ai 25 km) fra l'elicottero e la stazione GPS-Master a terra. I rilievi sono stati effettuati unicamente durante periodi della giornata durante i quali si sono verificate simultaneamente le seguenti condizioni: *Position Dilution Of Precision* (PDOP) < 3 e numero di satelliti > 6, con una maschera di elevazione di 15°. L'UTM-WGS84 è il Sistema geodetico di riferimento adottato. Infine, sono stati utilizzati come *Ground Reference Stations* (GRS) i capisaldi della rete IGM 95 per le tutte le operazioni di rilievo.

Il DTM e il DSM, così ottenuti, descrivono la conformazione altimetrica naturale, comprensiva delle caratteristiche collinari (circa 300 m a.s.l.), dei bacini idrologici, delle strutture viarie (e.g., l'Autostrada A16) e degli edifici (Figura 5). Per questi ultimi è stata implementata una procedura, opportunamente calibrata, che ha permesso di ricavare estensivamente il modello tridimensionale di ogni edificio (Ricci et al., 2011, pp. 109-124), incluso quello delle coperture con i corrispettivi parametri di superficie, orientamento ed inclinazione che sono stati poi utilizzati per la realizzazione della mappa di radianza estesa a tutto il Comune.

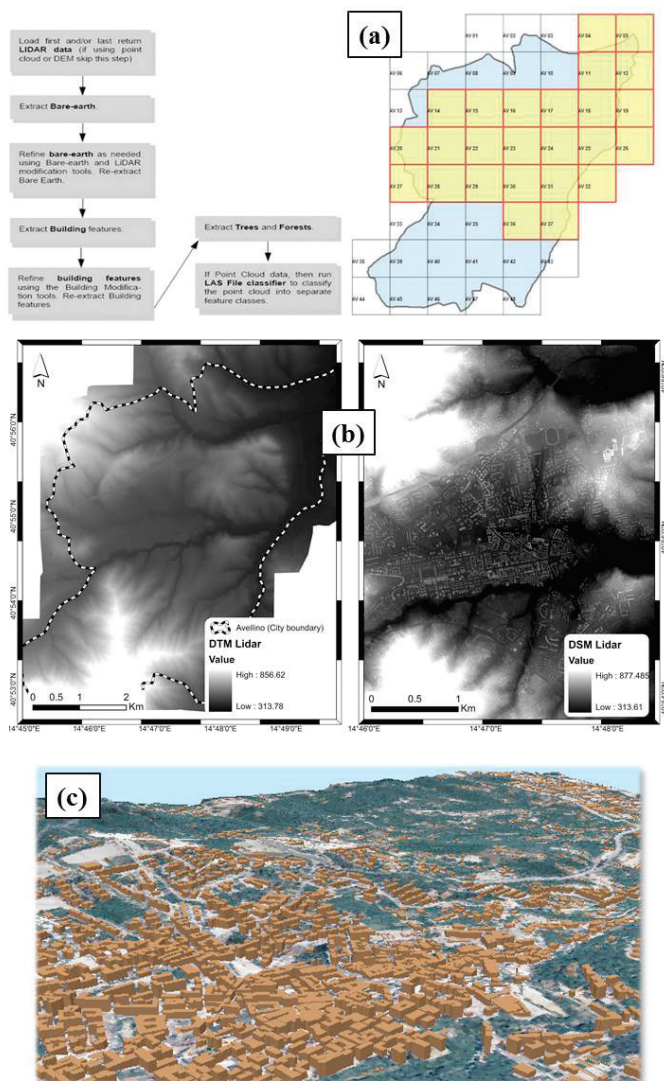


Fig. 5 – Elaborazione dei dati LIDAR: a) Suddivisione in quadranti (48, dimensione 1 km x 1 km, in giallo è evidenziata l'area più densamente urbanizzata); b) DTM e DSM; c) Modello tridimensionale degli edifici di Avellino.

2.3 Radiazione e coperture

Per la stima della radiazione solare sulle coperture degli edifici, si è partiti dalla ricostruzione tridimensionale derivante dal DSM precedentemente ottenuto, utilizzando l'apposito modulo *software* disponibile nella Suite Esri ArcGIS ("Solar radiation tool"). Dapprima, è stata valutata la radiazione cumulata in Wh/m^2 relativa ai mesi di giugno e luglio, i quali forniscono comunemente il maggior contributo annuale. In tal modo, sono state calcolate sia la componente diretta sia la diffusa, sulla base di un valore di trasmissività atmosferica e di percentuale di diffusione per i mesi di riferimento, derivandoli mediante l'applicazione PVGIS. Per la diffusione atmosferica è stato adottato un modello anisotropico di *scattering* (diffusione ottica o dispersione, in buona misura casuale), in cui il flusso della radiazione incidente varia con l'angolo zenitale locale, che a sua volta dipende dalla posizione della Terra relativamente al Sole ed è quindi funzione della latitudine e del tempo. Tale modello risulta maggiormente adeguato per tener conto dell'eterogeneità del tessuto urbano.

Nella Figura 6, unitamente ai confini comunali in viola, è riportata a sinistra la componente diretta restituita in tonalità di grigio con un massimo di $293585 \text{ Kwh}/\text{m}^2$ circa, nella quale si evidenziano gli effetti delle ombreggiature delle strutture tridimensionali degli edifici, sulla base del percorso solare, sotto forma di striature più scure. Un effetto meno accentuato e maggiormente concentrato sull'edificio o struttura tridimensionale, si nota anche nell'immagine della componente diffusa (a destra, in Figura 6) che presenta un massimo di $83502,2 \text{ Kwh}/\text{m}^2$ circa. Successivamente, la valutazione della radianza totale è stata effettuata esclusivamente sulle coperture degli edifici, individuati utilizzando il DSM per ottenere la loro mappatura plano-altimetrica.

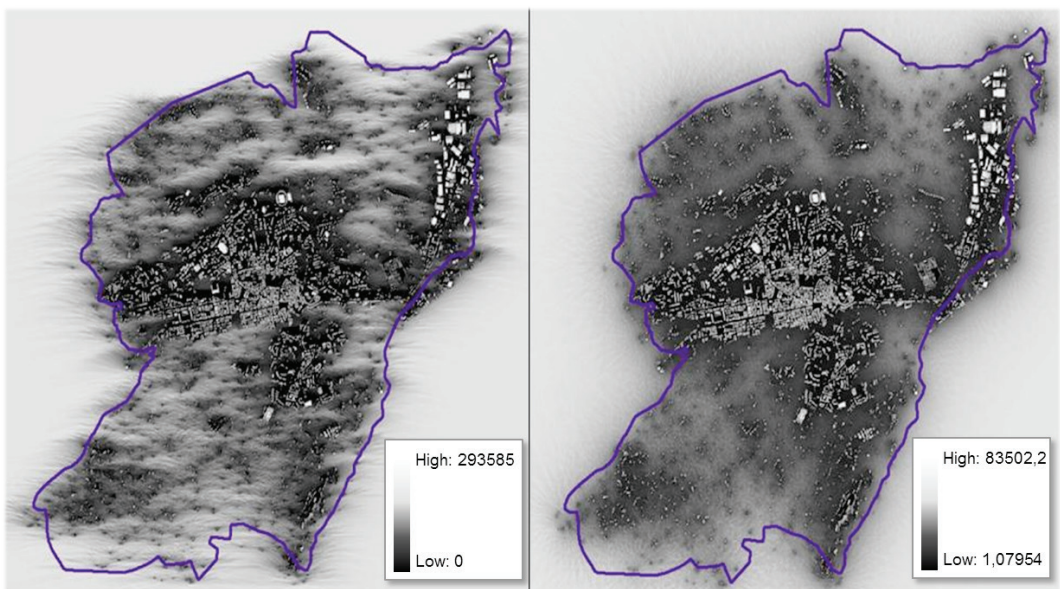


Fig. 6 – Mappe di distribuzione della radianza solare cumulata (valori espressi in Wh/m^2): componenti diretta (sinistra) e diffusa (destra), relative ai mesi di giugno e luglio 2012.

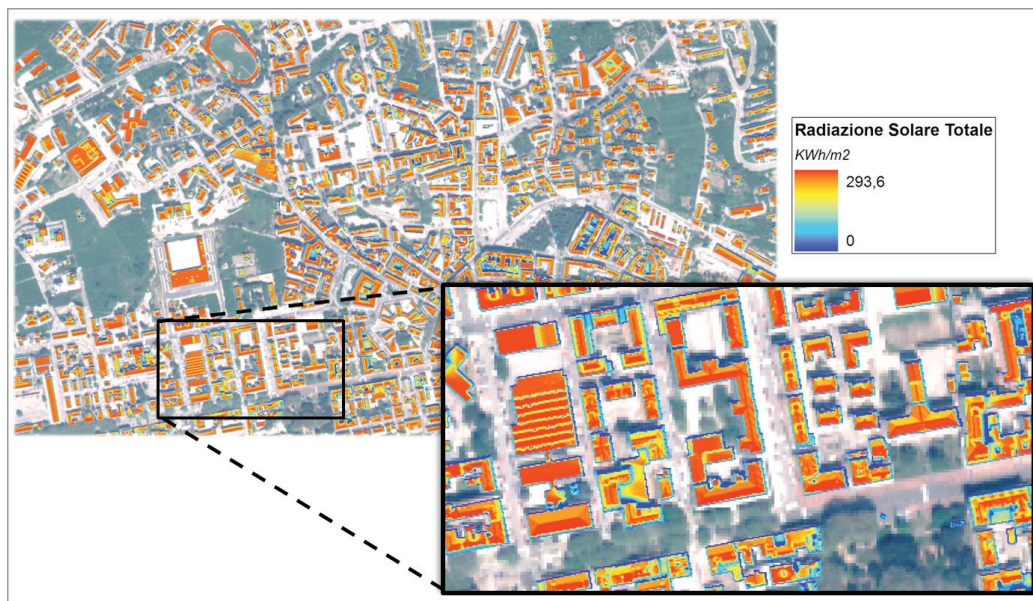


Fig. 7 – Radiazione solare totale in KWh/m^2 calcolata per le coperture degli edifici ed infrastrutture del comune di Avellino. A sinistra, elaborazioni di dettaglio per una sotto-area di studio.

La Figura 7 mostra la radianza totale incidente sulle coperture (in KWh/m^2), stimata per i mesi di Giugno e Luglio 2012 e mappata in falsi colori con massimi sul rosso e minimi in blu. La radiazione solare è stata calcolata per ciascuna copertura nell'area d'interesse, tenendo conto dei parametri di esposizione ed inclinazione delle superfici derivati dal DSM. Essa, come era atteso, dà luogo a valori diversi in corrispondenza dei diversi orientamenti e geometrie. È possibile rilevare ciò dall'immagine di dettaglio riportata nel box in basso a destra, sempre in Figura 7. Qui si possono notare le variazioni di radianza cumulata, calcolate per le singole falde di tetto con differenti orientazione ed inclinazione: i valori uniformi sono quelli tipici delle coperture piane, mentre è possibile osservare l'effetto delle ombreggiature laddove sono presenti elementi strutturali tridimensionali che si schermano reciprocamente. I diversi elementi geometrici delle falde ottenuti dal DSM sono stati, quindi, inseriti in un apposito GeoDatabase, in modo tale da gestire in ambiente GIS anche tali dati ed associare a ciascun edificio mappato i valori stimati di radianza cumulata utilizzabili a fini della produzione fotovoltaica.

In particolare,

2.4. Valutazione radiazione solare cumulata

La medesima zona urbana rappresentata in Figura 7 è stata scelta anche come sub-area campione nella quale mettere a punto e testare la seconda parte dell'approccio metodologico seguito, per una procedura di analisi più approfondita e maggiormente efficace.

Nella prima parte dell'approccio seguito, relativo a tutto il territorio comunale, sono state considerate le componenti principali (diretta e diffusa) della radiazione solare, mentre è stato trascurato il contributo derivante dalla radiazione riflessa dalle superfici circostanti. Per raffinare ulteriormente la valutazione radiazione solare cumulata, è stato pertanto stimato tale ulteriore contributo di riflettan-

za, facendo ancora una volta ricorso al modello tridimensionale ricavato dal DSM LIDAR, in modo da avere la descrizione geometrica delle superfici riflettenti sui tetti e degli oggetti circostanti.

Per derivare le proprietà di riflettanza degli oggetti presenti nell'area di studio è stata prodotta una mappa di albedo (Figura 8), ricavata da dati satellitari Landsat ETM+⁴. Nella stessa figura è possibile osservare che i valori più elevati si riscontrano in corrispondenza delle aree urbane e industriali (zona a Nord-Est del territorio comunale), mentre le aree densamente vegetate e le strade presentano bassi valori di riflettanza. La stima dell'irradianza riflessa per le superfici inclinate, in condizioni di *clear-sky*, è stata fatta assumendo per le stesse un comportamento isotropo. Tale irradianza, misurata in W/m^2 , è dipende dall'irradianza globale in assetto orizzontale (data come somma delle componenti diretta e diffusa), dal valore medio di albedo al suolo e dall'inclinazione della superficie rispetto al terreno su cui si considera l'irradianza (Muneer, 1990, pp. 153-163). Scharmer e Greif (2000) hanno descritto ed elencato i valori medi tipici per varie superfici al suolo. In generale, i valori prevalentemente usati sono 0,2 o 0,15.

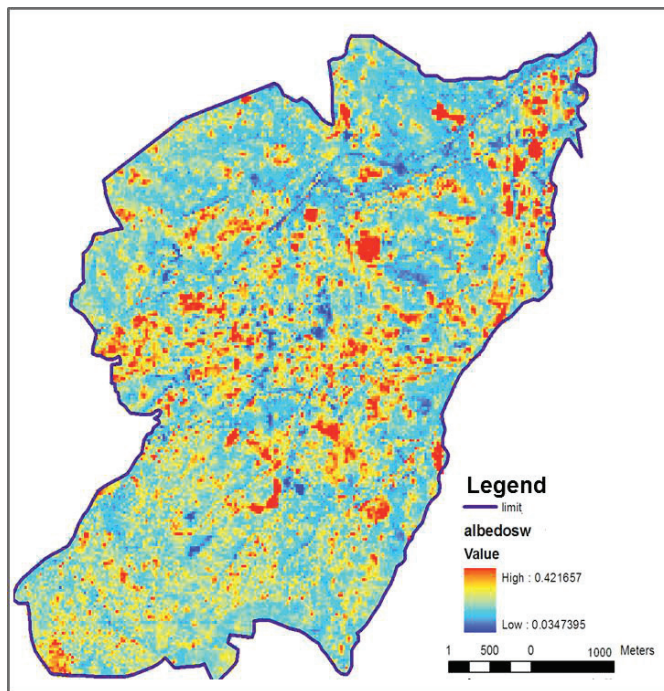


Fig. 8 – Mappa di albedo per l'area di Avellino.

Nella valutazione della radianza solare cumulata, quindi, sono stati utilizzati i dati e i *tool* disponibili sul sito web PVGIS, al fine di stimare la torbidità atmosferica di Linke per ciascun mese di riferimento. Tali valori di torbidità media mensile sono forniti dal PVGIS sotto forma di mappe aventi accuratezza

⁴ Landsat è una costellazione di satelliti per telerilevamento, attiva attraverso varie missioni da circa 40 anni, con l'obiettivo di studiare l'ambiente e i cambiamenti sulla superficie terrestre. L'ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) è il sensore montato a bordo del satellite Landsat 7, con una risoluzione geometrica di 30 m nelle bande del visibile, dell'infrarosso vicino e di quello medio; di 60 m nell'infrarosso termico; di 15 m nel pancromatico.

spaziale di 1 km, stimate a partire dall'atlante globale implementato da Remund et al. (2003), integrato e aggiornato con i dati raccolti dalle piattaforme satellitari (in genere su un'orbita geostazionaria) e da misurazioni terrestri acquisite da stazioni meteorologiche.

Per l'area di Avellino, avente una estensione totale di circa 42 Km², si è ragionevolmente assunto che essa possa essere ben caratterizzata, in termini di trasparenza atmosferica, da valori puntuali. Al fine di produrre la mappa albedo locale, è stata elaborata e processata un'immagine satellitare multispettrale Landsat ETM+ (Agosto 2012), utilizzando i suoi canali di riflettanza nel visibile, nel vicino infrarosso (NIR) e nel primo infrarosso medio (SWIR) (Liang, 2000, pp. 213-238). Prima di ricavare il dato sull'albedo, l'immagine è stata sottoposta al necessario processo di correzione atmosferica (Singh, 1989, pp. 989-1003), per la rimozione completa degli effetti di assorbimento e *scattering* e quindi l'ottenimento del parametro primario contenuto nell'immagine: la riflettanza. Infatti, l'effetto dell'atmosfera può interferire con la corretta interpretazione dell'immagine stessa. Tale correzione è stata effettuata sulla base di un fattore di visibilità in atmosfera di 30 km, in accordo con il parametro di torbidità atmosferica di Linke descritto al Paragrafo 2.1.

3. Risultati e conclusioni

Sulla base dei risultati ottenuti mediante le elaborazioni descritte nei paragrafi precedenti, si è proceduto al calcolo della radiazione solare cumulata (espressa in Wh/m²-day) disponibile sulle varie coperture individuate nell'area d'interesse (Figura 9). Essa è stata stimata mediante gli specifici moduli (*r.horizon* e *r.sun*) disponibili nella Suite *open source* GRASS (Hofierka & Šúri, 2002, pp. 1-19), utilizzando come dati di input il DSM, la mappa dell'albedo ed i parametri di torbidità puntuali per il mese di luglio. La stima (relativa al 14/07/2012) è stata effettuata per ciascuna delle 3 componenti: diretta, diffusa e riflessa. Quest'ultima è risultata significativa e pari circa ad 1/3 della diffusa.

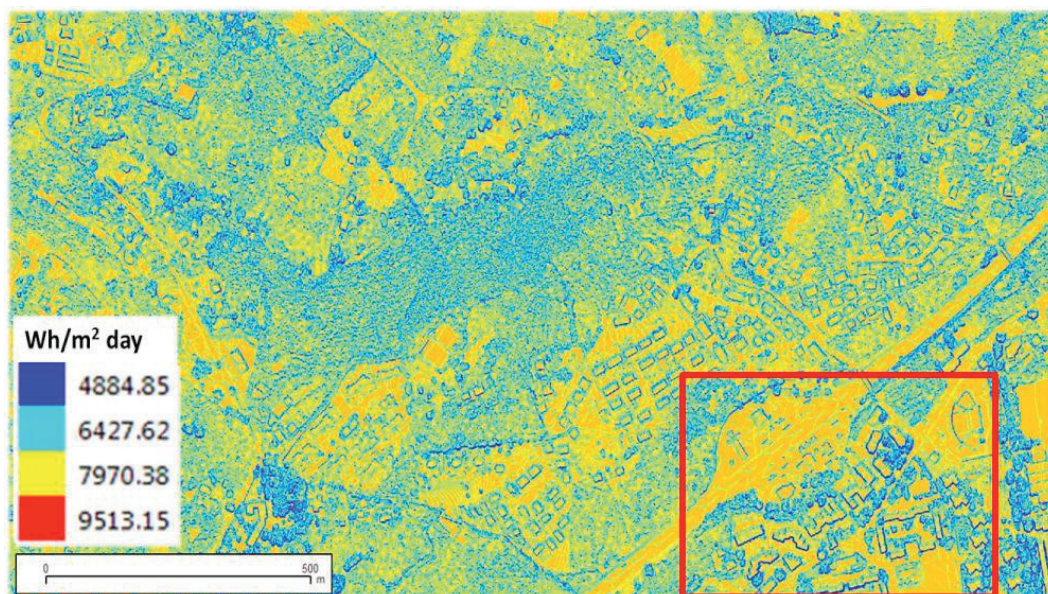


Fig. 9 – Mappa della radiazione solare globale stimata nel giorno 14-7-2012.

La Figura 10 mostra un esempio di prodotto finale, sotto forma di mappa tematica, ottenuto mediante la metodologia sviluppata e qui descritta. In esso tutte le superfici di copertura sono classificate in termini di radianza solare totale (diretta, diffusa e riflessa) disponibile. Tale mappa tematica può essere utilizzata, per esempio, nell'ambito di una specifica applicazione WebGIS, congiuntamente con i dati catastali dell'area urbana di interesse, quale efficace supporto alle attività di censimento, monitoraggio e pianificazione degli impianti PV su tetti.



Fig. 10 – Mappa dettagliata riportante il valore cumulato di radianza solare specifica per un giorno di luglio (valori in $Wh/m^2 \cdot day$) per ogni tetto estratto dal DSM e caratterizzato in ambiente GIS.

La metodologia implementata si basa sia sull'integrazione di tecniche di rilievo LIDAR ed elaborazione di dati satellitari, sia sull'utilizzo di dati ed applicazioni software disponibili in rete. Essa ha permesso di stimare efficacemente per l'intero territorio del Comune di Avellino la radianza solare disponibile a livello delle coperture dei tetti, per la produzione fotovoltaica sulla base della stima dell'irradianza solare e di un modello tridimensionale prodotto ad hoc.

Successivamente, un ulteriore affinamento della procedura ha permesso di valutare anche la componente riflessa della radiazione solare, derivandola dalla misura dell'albedo locale mappata attraverso un'immagine multispettrale Landsat ETM+ corretta atmosfericamente. In questo modo, la stima di irradianza globale nelle tre componenti (diretta, diffusa e riflessa) perviene a risultati più affidabili ed utilizzabili come base per la valutazione più accurata del potenziale PV disponibile su ogni tetto dell'area urbana di interesse.

In questo specifico settore di applicazione del PV, l'obiettivo delle future attività di ricerca sarà quello di incrementare sia l'uso di prodotti tematici provenienti dalle piattaforme satellitari, sia l'uso di misure a terra specifiche, già disponibili/accessibili o da acquisire appositamente. Inoltre, sarà pos-

sibile tenere maggiormente in considerazione l'elevata eterogeneità dell'ambiente urbano (a causa delle comuni attività antropiche: i trasporti, il riscaldamento, ecc...), che unitamente a fattori legati al cambiamento climatico, sono in grado di influenzare la trasparenza atmosferica.

Questi prodotti tematici, già disponibili o ottenibili nel prossimo futuro, permetteranno di migliorare la caratterizzazione spaziale e temporale della torbidità a larga banda (*sensu* Linke), nonché offriranno un efficace supporto alla progettazione di nuovi impianti PV ed al monitoraggio della produzione esistente. In questo contesto, per avere una migliore stima dell'albedo, sarà fondamentale prendere in considerazione anche gli effetti di riflessione di tipo *non-Lambertiano*, un fenomeno tipico delle aree urbane, potenzialmente valutabile ricorrendo a prodotti derivati da osservazioni satellitari (ad esempio, BRDF/albedo da dati MODIS).

Bibliografia

- ACKERMANN, F. (1996), Airborne Laser Scanning for Elevation Models, "GIM – Geomatics Info Magazine", 10, pp. 24-25 .
- AXELSSON P. (1999), Processing of laser scanner data: algorithms and applications, "ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing", 54, pp. 138-147.
- BALENA, P., MANGIALARDI, G., TORRE, C.M. (2012), A BEP analysis of energy supply for sustainable urban microgrids, in Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7334 – Part II, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 116-127.
- BALTSAVIAS, E. (1999), A comparison between photogrammetry and laser scanning, "ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing", 54, pp. 83-94.
- BORFECCHIA F., DE CECCO L., POLLINO M., LA PORTA L., LUGARI A., MARTINI S., RISTORATORE E., PASCALE C. (2010), Active and passive remote sensing for supporting the evaluation of the urban seismic vulnerability, "European Journal of Remote Sensing", 42(3), pp. 129-141.
- CAIAFFA, E. (2003), Geographic Information Science in Planning and in Forecasting, in INSTITUTE FOR PROSPECTIVE TECHNOLOGICAL STUDIES in cooperation with the European S&T Observatory Network, The IPTS Report, vol. 76, European Commission JRC-Seville, pp.36-41.
- CAIAFFA, E., MARUCCI, A., POLLINO, M. (2012), Study of sustainability of renewable energy sources through GIS analysis techniques, in Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7334 – Part II, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 532-547.
- CEBECAUER T., HULD T., ŠÚRI M. (2007), Using high-resolution digital elevation model for improved PV yield estimates, in Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Italy, pp. 3553-3557.
- DI FAZIO, S., MODICA, G. , ZOCCALI, P. (2011), Evolution trends of land use/land cover in a Mediterranean forest landscape in Italy, in MURGANTE, B. ET AL., ICCSA 2011 – Lecture Notes in Computer Science, LNCS, Volume 6782, Part I, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 284-299.
- DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. (1991), Solar Engineering of Thermal processes, Second ed., John Wiley & Sons, USA
- ESRI ArcGIS Resource Center, <http://resources.arcgis.com/>, data ultima consultazione 22/11/2013.
- FICHERA, C., MODICA, G., POLLINO, M. (2012), Land Cover classification and change-detection analysis using multi-temporal remote sensed imagery and landscape metrics, "European Journal of Remote Sensing", 45, pp. 1-18.

- GABET L., GIRAUDON G., RENOUEAU L. (1996), Automatic generation of high resolution urban zone digital elevation models, "ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing", 52, pp. 33-47.
- GSE SPA, "GESTORE DEI SISTEMI ENERGETICI": 4° Conto Energia <http://www.gse.it/it/Conto%20Energia/Fotovoltaico/Quarto%20Conto/Pages/default.aspx>, data ultima consultazione 22/11/2013.
- JOINT RESEARCH CENTRE (JRC) – INSTITUTE FOR ENERGY AND TRANSPORT (IET): Photovoltaic Geo-graphical Information System – PVGIS <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, data ultima consultazione 22/11/2013.
- HOFIERKA, J., ŠŮRI, M. (2002), The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications, in Proceedings of the Open source GIS GRASS users conference, Italy, pp. 1-19.
- HULD, T.A. , ŠŮRI, M. , KENNY, R.P. (2005), Estimating PV performance over large geo-graphical regions, in Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference
- LIANG, S. (2000), Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I – Algorithms, "Remote Sensing of Environment", 76, pp. 213-238.
- LINKE, F. (1922), Transmissions-Koeffizient und Trübungsfaktor, "Beitraege zur Physik der Atmosphaere", 10, pp. 91-103.
- MUNEER, T. (1990), Solar radiation model for Europe, "Building services engineering research and technology", 11:4, pp. 153-163.
- MURGANTE, B., BORRUSO, G., LAPUCCI, A. (2011), Sustainable development: Concepts and methods for its application in urban and environmental planning, "Studies in Computational Intelligence", 348, pp. 1-15.
- MURGANTE, B., DANESE, M. (2011), Urban versus rural: The decrease of agricultural areas and the development of urban zones analyzed with spatial statistics, "International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems", 2:2, pp. 16-28.
- PELLEGRINO, M., CAIAFFA, E., GRASSI, A., POLLINO, M. (2008), GIS as a tool for solar urban planning, in Proceedings of 3rd International Solar Energy Society Conference-Asia Pacific Region (ISES-AP-08), Sydney, Australia, 25-28 November 2008.
- REMUND, J., WALD, L., LEFÈVRE, M., RANCHIN, T., PAGE, J. (2003), Worldwide Linke turbidity information, in Proceedings of the ISES solar world congress 2003, Göteborg, Sweden.
- RICCI, P., VERDERAME, G. M., MANFREDI, G., POLLINO, M., BORFECCHIA, F., DE CECCO, L., MARTINI, S., PASCALE, C., RISTORATORE, E., JAMES, V. (2011), Seismic Vulnerability Assessment Using Field Survey and Remote Sensing Techniques, in MURGANTE, B. ET AL., ICCSA 2011 – Lecture Notes in Computer Science, LNCS, Volume 6783, Part II, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 109-124.
- SCHARMER, K., GREIF, J. (2000), The European solar radiation atlas, Vol. 2, Database and exploitation software, Les Presses de l'École des Mines, Paris.
- SINGH, A. (1989), Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data, "International Journal of Remote Sensing", 10(6), 989-1003.
- ŠŮRI, M., HOFIERKA, J. (2004), A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments, "Transactions in GIS", 8 (2), pp. 175-190.
- ŠŮRI, M., HULD, T.A., DUNLOP, E.D. (2005), PV-GIS: A web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe, "International Journal of Sustainable Energy", 24 (2), pp. 55-67.

ŠÚRI, M., HULD T. A., DUNLOP E. D., OSSENBRINK, H. A. (2007), Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries, "Solar Energy", 81, 1295-1305.

ZAKSEK, K., PODOBNIKAR, T., OSTIR, K. (2005), Solar radiation modeling, "Computers & Geosciences", 31, 233-240.