

Tecniche di telerilevamento integrate e GIS a supporto della stima del potenziale fotovoltaico dei tetti nel comune di Avellino

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

(*) ENEA UTMEA, Unità Tecnica Modellistica Energetica ed Ambientale, C.R. Casaccia, Via Anguillarese 301,
00123 Roma, Tel. 06.3048.6042, Fax 06.3048.3362, e-mail flavio.borfecchia@enea.it
(**) PhD, Università dell'Aquila

Riassunto

Negli ultimi decreti legge (4° Conto Energia (C.E.) del Gennaio 2012 e successivi) del Governo Italiano relativi all'incentivazione del fotovoltaico (PV) c'è, tra l'altro, un chiaro orientamento teso a supportare e sviluppare maggiormente la diffusione degli impianti PV sui tetti degli edifici rispetto a quelli installati a terra, al fine di evitare la competizione con gli altri usi strategici dei suoli, come ad esempio quelli naturali ed agricoli. In questo contesto assume, quindi, un'importanza rilevante, in termini di pianificazione e controllo per il PV, la stima estensiva ed efficace della disponibilità e qualità di superficie utile in corrispondenza di coperture di strutture residenziali ed industriali esistenti. Tale tipologia di "land use" è densamente rappresentata, ovviamente, negli agglomerati urbani la cui notevole eterogeneità 3D ed in termini di albedo, torbidità atmosferica ed ombreggiature, influenza notevolmente l'irradianza solare locale e rende necessario tener conto in modo adeguato di tali fattori distribuiti con strumenti GIS e di modellistica avanzati per ottenere stime realistiche ed affidabili a livello dei tetti. In quest'ottica, sono state sviluppate metodologie basate su tecniche di *Remote Sensing* da piattaforme satellitari ed aeree per l'analisi estensiva dei parametri geometrici e tipologici degli edifici e delle loro coperture in aree urbane, a supporto della stima estensiva del potenziale PV locale e di una sua mappatura. Per la caratterizzazione delle specifiche aree urbanizzate selezionate nel territorio del Comune di Avellino, sono stati utilizzati in maniera integrata rilievi di tipo aerofotogrammetrico e LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) unitamente a dati multispettrali satellitari ed aerei. E' stata dapprima ottenuta una stima estensiva dei parametri geometrici e delle caratteristiche planimetriche tridimensionali delle coperture di ogni edificio nelle aree d'interesse attraverso il DSM (*Digital Surface Model*) derivato dai rilievi LIDAR sotto forma di nuvola di punti (*point cloud*). Successivamente per tener conto della componente diffusa e riflessa della radiazione solare, inclusa la copertura nuvolosa, ci si è avvalsi anche delle risorse GIS messe a disposizione, a livello Europeo, per lo specifico settore PV (PVGIS), integrandole opportunamente con elaborazioni derivate da rilievi satellitari. Infine, dopo la valutazione dell'albedo effettuata tramite tecniche di *Remote Sensing* passivo multispettrale e modellistica, tramite gli specifici applicativi, attualmente disponibili anche in ambienti open-source, sono state prodotte le mappe finali di radiazione solare ottimizzate per ciascun edificio nelle aree di interesse.

Abstract

The last rules approved by Italian government to financially support the solar Photovoltaic (PV) Energy production development (4° Conto Energia (C.E.) del Gennaio 2012 e successivi), include specific indications for exploiting to this end the roofs or covers of the buildings or other infrastructures where the PV installations are more favorably funded than those placed on ground in order to avoid the competition with other strategic land uses like those of agriculture or naturals. In this context it becomes important, for proper PV potential planning and monitoring, the

extensive mapping of the available surface corresponding to cover and properly assessing its 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 factor by means of GIS mapping and advanced modeling tools in order to provide realistic estimates of solar available radiance at roofs level. The implemented methodologies based on satellite/aircraft remote sensing techniques allowed us to estimate and map the global solar radiance over all the Avellino municipality's roofs starting from LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) data acquired on 2009. From these formers as point clouds the DSM (Digital Surface Model) of the entire area of interest (about 42 Km²) was firstly obtained then the 3d model of each building and related cover was derived. In order to account for the atmospheric transparency and the related time-dependent diffuse/direct radiation percentage on the area, we utilized the data and tools resources available at EU level for the specific PV sector(1) by integrating them with results obtained using remotely sensed data within "ad hoc" developed procedures. The final processing to obtain the solar radiance maps was finally carried out using specific applications available within sw commercially and/or open source environments.

Introduzione

Con l'entrata in vigore del Dec. 5 maggio 2011 e successivi (Dec. liberalizzazioni del 24 gennaio 2012) le incentivazioni al PV sono normate attualmente dall'insieme delle disposizioni applicative contenute nel cosiddetto 4° Conto Energia (C.E.) con cui 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 decreto, infatti, c'è un chiaro orientamento teso a supportare e sviluppare maggiormente la diffusione degli impianti PV sui tetti degli edifici rispetto a quelli installati a terra al fine di evitare la competizione con gli altri usi dei suoli, tipicamente quelli agricoli, che potrebbe avere implicazioni relative al settore alimentare, strategico nel prossimo futuro.

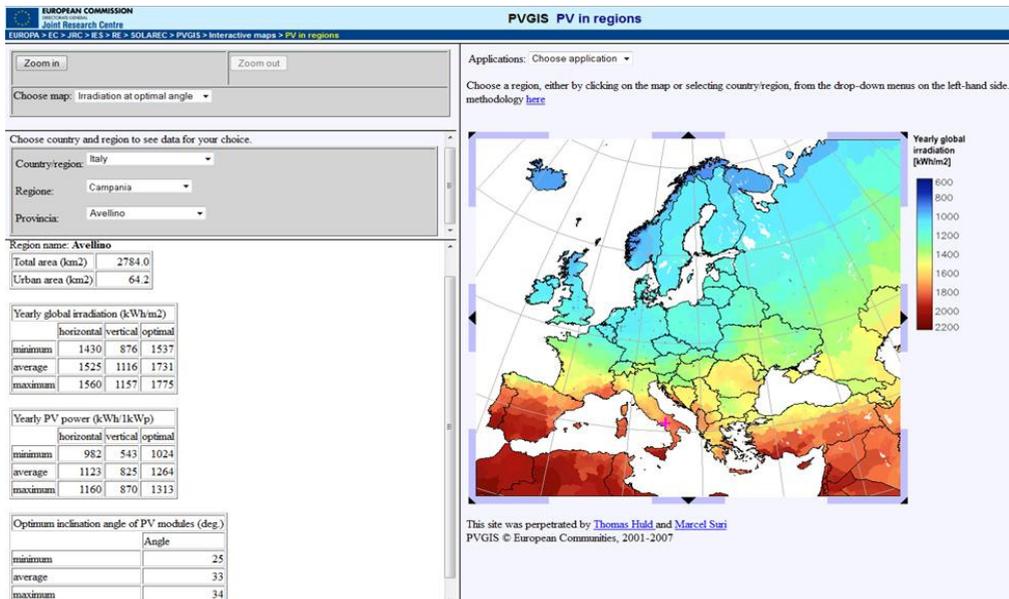


Figura 1. Mappa di radiazione solare media annuale su superficie inclinata in modo ottimale (destra) e stima per l'area urbana di Avellino unitamente alla produzione elettrica ottenibile.

In questo contesto assume quindi un'importanza rilevante per il PV, in termini di pianificazione e controllo, la stima estensiva ed efficace della disponibilità di superficie utile relativa alle coperture di strutture residenziali ed industriali esistenti, ivi incluse quelle degli agglomerati urbani, dove questo tipo di "land cover" è densamente rappresentato. Se, quindi, al fine di una mappatura del potenziale PV nella realtà italiana, utilizzando strumenti GIS (Caiaffa et al., 2012), sinora si è operato calcolando la radianza solare sulla base dei parametri di orientamento ed esposizione derivati dalle mappe di rilievo naturale denominate DEM (*Digital Elevation Model*) o DTM (*Digital Terrain Model*), attualmente per pervenire ad una stima maggiormente realistica, specialmente in ambiente urbano, è necessario tener conto delle superfici di copertura e dei loro parametri geometrici e radiometrici in modo più dettagliato.

In Figura 1 è riportato un output ottenuto utilizzando gli strumenti attualmente disponibili presso il sito PVGIS (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>), supportato dall'UE per lo sviluppo del fotovoltaico Europeo, in particolare a destra c'è la mappa europea di radiazione media annuale per angolo d'inclinazione ottimale mentre a sinistra sono riportati i valori di radiazione e della potenziale produzione elettrica relativa per l'area urbana della provincia di Avellino derivata dalla mappa *Corine Land Cover* (CLC) 2006 di utilizzo del suolo ottenuta da dati satellitari telerilevati.

In tali approcci alternativi, mirati alla migliore caratterizzazione delle aree urbane, ovviamente, si tende a sovrastimare eccessivamente tali valori in quanto le aree di copertura sfruttabili entro quelle urbanizzate sono una frazione di quelle complessive. Inoltre, esse solitamente hanno parametri di inclinazione ed orientamento diversi da quelli della superficie naturale sottostante (DTM) e ben diversi da quelli ottimali. Come si vede, in definitiva, per migliorare le valutazioni estensive del potenziale fotovoltaico dei tetti è necessario tener conto in modo maggiormente dettagliato della reale superficie disponibile nonché della sua orientazione ed inclinazione. In quest'ottica l'individuazione delle coperture potenzialmente sfruttabili per impianti fotovoltaici presuppone quella dell'edificio o infrastruttura relativa, sintetizzata nel modello tridimensionale reale della superficie terrestre, includente sia le altimetrie naturali che gli oggetti artificiali come le strutture residenziali ed industriali. Un tale prodotto denominato DSM (*Digital Surface Model*), differente dal DTM, può essere derivato dai rilievi LIDAR sotto forma di nuvola di punti (*point cloud*) ad adeguata risoluzione e convenientemente sfruttato per una caratterizzazione più efficace dell'ambiente urbano anche ai fini di una migliore stima del potenziale fotovoltaico delle coperture. In quest'ottica, tenendo conto della struttura tridimensionale e dell'eterogeneità dell'ambiente urbano in termini di albedo, torbidità atmosferica ed ombreggiature che influenzano notevolmente l'irradianza solare locale, fonte primaria per la produzione fotovoltaica, è necessario considerare in modo più adeguato anche ulteriori fattori attinenti alla trasparenza atmosferica ed al contributo d'irradianza riflessa sull'intero spettro (albedo) dovuto alle superfici circostanti quella potenzialmente sfruttabile per il PV. Per la torbidità atmosferica, stimata sistematicamente sulla base di misure a terra o aerospaziali, sono disponibili serie storiche delle sue distribuzioni anche sotto forma di mappe tematiche da utilizzare per valutare le componenti diretta e diffusa corrispondenti ad una certa locazione geografica. Per la componente dovuta all'albedo locale, oltre che la riflettanza e la posizione dei singoli oggetti nello spazio tridimensionale circostante la superficie PV, assume importanza anche la loro forma derivabile dal DSM. Tenendo conto di queste esigenze sono state sviluppate metodologie e strumenti innovativi basati su dati aerospaziali, per l'analisi estensiva dei parametri geometrici e tipologici degli edifici in aree urbane del comune di Avellino a supporto della stima estensiva del potenziale PV locale ed una sua mappatura. Le metodologie sviluppate si basano sull'uso integrato di dati aerospaziali per la caratterizzazione di aree urbanizzate mediante rilievi di tipo LIDAR unitamente a dati multispettrali satellitari ed aerei. E' stata dapprima ottenuta una stima estensiva dei parametri geometrici e delle caratteristiche planimetriche tridimensionali delle coperture di ogni edificio nelle aree d'interesse attraverso il DSM derivato dai rilievi LIDAR rilevati nel 2008. Successivamente, per tener conto della componente diffusa e riflessa della radiazione solare, inclusa la copertura nuvolosa, ci si è avvalsi anche dei prodotti e funzionalità messi a disposizione dal sistema GIS Europeo PVGIS.

Irradianza solare

La radiazione solare che arriva sulla terra fuori dall'atmosfera su un piano perpendicolare ai raggi, ammonta mediamente a 1360 W/m^2 , con variazioni sino a circa il 7% dipendenti principalmente da quelle della 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 dal sole. Nell'attraversare l'atmosfera, una parte dell'energia incidente si perde nelle varie interazioni sino ad arrivare ad una disponibilità media al suolo di circa $900\text{-}1000 \text{ W/m}^2$ con un andamento stagionale dipendente dall'altezza del sole e conseguentemente dalla latitudine. 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 definito come il rapporto tra l'attenuazione attuale dell'atmosfera e quella corrispondente ad una situazione di "clear-sky" sull'intero spettro.

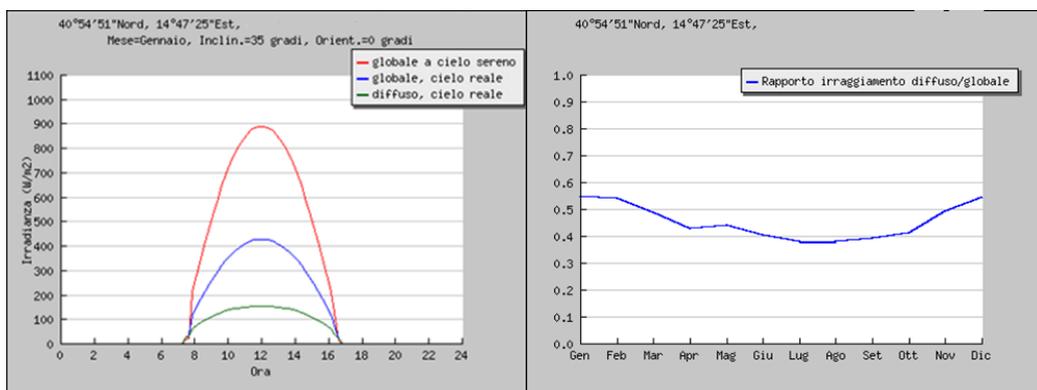


Figura 2. Irradianza solare oraria e percentuale di diffusa media mensile nell'area di Avellino in Gennaio sulla base della torbidità atmosferica media mensile derivata dalla serie storica registrata

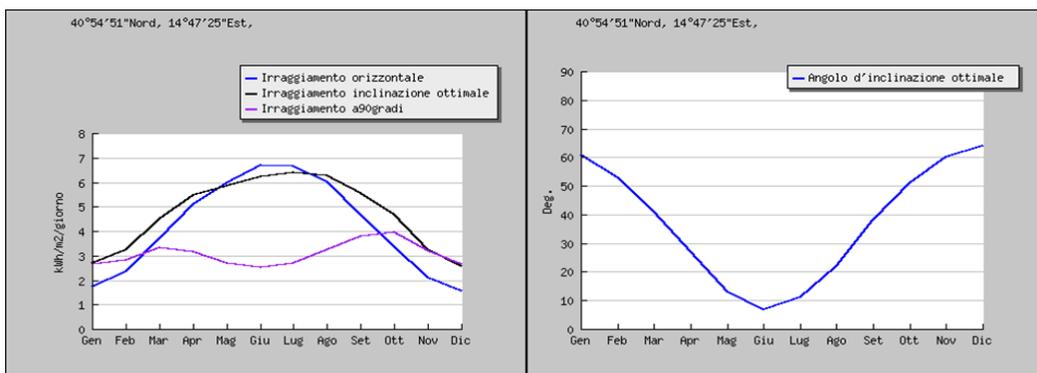


Figura 3. Stima dell'irradianza su superfici a diversa inclinazione ed orientamento a sud (sinistra) ed inclinazione ottimale (destra) per la locazione del Comune di Avellino.

In Figura 2, 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 calcolati sulla base della torbidità atmosferica media locale del mese di Gennaio derivata dalla serie storica utilizzando i tools messi a disposizione sul sito PVGIS. Nello stesso grafico è riportata altresì l'irradianza diretta in situazione di "clear sky". A destra è riportato l'andamento medio mensile della frazione diffusa per lo stesso sito. Come si vede 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 possibile perpendicolare ai raggi solari per massimizzare l'irraggiamento globale.

Dai grafici in Figura 3 ottenuti dalle utilities messe a disposizione dall'UE a supporto dello sviluppo del fotovoltaico (1) si evidenzia come per il sito di Avellino ed orientamento a sud, l'angolo d'inclinazione ottimale vari durante l'anno con l'altezza del sole, ma per impianti fissi la selezione ricade su un valore di circa 33° che corrisponde all'andamento dell'irradianza totale della curva in nero nel grafico di sinistra che comporta un valore massimo cumulato annuale. Sebbene in generale il potenziale fotovoltaico si valuti estensivamente con tecniche GIS in base all'irradianza stimata al suolo considerando i parametri di assetto ottenuti dalla mappa delle altimetrie naturali (Forni et al., 2011) sotto forma di DEM, quest'ultimi risultano generalmente differenti da quelli delle coperture degli edifici che insistono sulla stessa area eventualmente sfruttabili per la produzione fotovoltaica in linea con la nuova normativa. In quest'ottica un DSM ottenuto tramite rilevamenti LIDAR e consistente in un prodotto simile al DEM ma con una risoluzione notevolmente più spinta ed includente anche la mappatura 3D delle infrastrutture e degli edifici, è utilizzabile più proficuamente sia per l'individuazione delle coperture che per una loro caratterizzazione in termini di superficie utile e relativi parametri di assetto necessari per una stima realistica del potenziale fotovoltaico. Inoltre la ricostruzione 3D, così ottenuta unitamente ad una mappa dell'albedo a larga banda, 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 risultano importanti le pendenze e soprattutto l'orientamento delle coperture potenzialmente sfruttabili per impianti fotovoltaici, tenendo conto anche che tali parametri sono solitamente variabili per le diverse falde che compongono i tetti. Infatti, specialmente la componente diretta dell'irradianza solare I_s su una superficie ha una dipendenza direzionale:

$$I_s = I_{0s} \cos \phi$$

dove I_{0s} esprime il valore che si ha su una superficie perpendicolare ($\phi = 0^\circ$) e ϕ è l'angolo tra la normale alla superficie ed il raggio solare. In quest'ottica dai rilievi LIDAR è possibile ricavare una caratterizzazione tridimensionale dell'ambiente urbano inclusiva degli edifici e delle coperture con l'individuazione delle superfici delle falde con i relativi parametri di assetto tramite procedure semiautomatiche utilizzando software dedicati, disponibili anche commercialmente (Esri ArcGIS).

LIDAR e DSM

La ricostruzione 3D 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, 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 Optech, con frequenza di acquisizione di 100 kHz ed altezza di volo di circa 1000 m, al fine di rendere praticabile un piano di volo adeguato a ricoprire l'intero territorio Comunale con possibilità di delineazione ottimale delle aree urbanizzate. L'informazione di ampiezza del dato laser (4 impulsi di ritorno) è stata calibrata radiometricamente in maniera da poter essere impiegata nelle successive analisi spaziali.

La nuvola di punti acquisita è tale che, in seguito al pre-processing operato subito dopo l'acquisizione, i modelli digitali risultanti contengono non meno di quattro misure/punti per metro

quadrato, con accuratezza verticale decimetrica. I dati in formato interoperabile sono caratterizzati dai seguenti parametri: Incertezza $H_{Max} \leq 40\text{cm}$; Incertezza $V_{Max} \leq 2 H_{Max}$; Densità DSM/DTM ≥ 4 punti al m^2 ; Formato: ID, X, Y, Z, I. L'acquisizione è avvenuta mediante elicottero ad una quota media di 900÷1000 metri rispetto al suolo e con una velocità compatibile con la risoluzione prevista. 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* (formato *.las*) per un totale di 48 tavole di 1 km x 1 km, corrispondenti ad una estensione superficiale complessiva di circa 42 Km^2 dell'intero comune. In corrispondenza di ogni tavola sono state effettuate almeno 2 delle 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 strumentali. 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: 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. Dall'elaborazione e mosaicatura dei dati LIDAR, sotto forma di *point cloud*, sono stati ottenuti DTM e DSM (Borfecchia et al., 2009). Tali modelli digitali descrivono la conformazione altimetrica naturale, comprensiva delle caratteristiche collinari (circa 300 m a.s.l.), dei bacini idrologici e delle strutture antropiche viarie (e.g., l'Autostrada A16) e residenziali. Per quest'ultime è stata implementata una procedura opportunamente calibrata sulle aree d'interesse che ci ha permesso di ricavare estensivamente il modello 3D di ogni edificio (Borfecchia et al., 2010) incluse le relative coperture con i corrispettivi parametri di superficie, orientamento ed inclinazione che sono stati poi utilizzati per la realizzazione della mappa d'irradiazione estesa a tutto il comune.

Radiazione e coperture

Per la stima della radiazione solare sulle coperture degli edifici dell'intero comune di Avellino si è partiti quindi dal DSM precedentemente ottenuto, ed utilizzando una procedura disponibile su software commerciale (Esri ArcGIS) è stata dapprima valutata la radiazione cumulata in Wh/m^2 relativamente ai mesi di giugno e luglio che forniscono il maggior contributo annuale. Con tale procedura sono state calcolate sia la componente diretta che diffusa sulla base di un valore di trasmittività atmosferica e di percentuale di diffusione per i mesi di riferimento derivati dalle stime effettuate per l'area di Avellino sulla base delle serie storiche disponibili sul sito PVGIS. Per la diffusione atmosferica è stato adottato un modello anisotropico di *scattering* con il flusso della radiazione incidente variabile con l'angolo zenitale locale, che risulta maggiormente adeguato a tener conto dell'eterogeneità del tessuto urbano.

Nella Figura 4, unitamente ai confini comunali in viola, è riportata a sinistra la componente diretta restituita in tonalità di grigio con un massimo di 298 Kwh/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 3D, si nota anche nell'immagine della componente diffusa (a destra) che presenta un massimo di 85 Kwh/m^2 circa. Successivamente, la valutazione della radianza totale è stata effettuata esclusivamente sulle coperture degli edifici ed infrastrutture 3D preventivamente individuate utilizzando il DSM per ottenere una loro mappatura vettoriale plano-altimetrica.

Nella Figura 5 tale radianza totale incidente sulle coperture, stimata per i mesi di Giugno e Luglio 2012, è riportata a falsi colori con massimi sul rosso e minimi in blu in sovrapposizione ad un'immagine Quick-Bird (2,5 m. di risoluzione a terra) in *true color* per l'intero comune di Avellino.

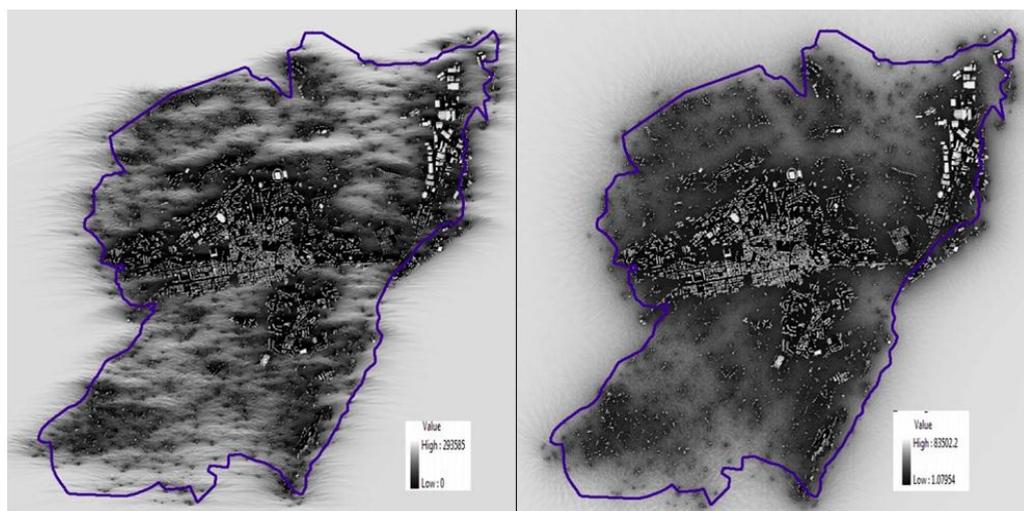


Figura 4. Mappe di distribuzione della radianza solare cumulata (Wh/m^2): componenti diretta (sinistra) e diffusa (destra), relative ai mesi di giugno e luglio 2012.

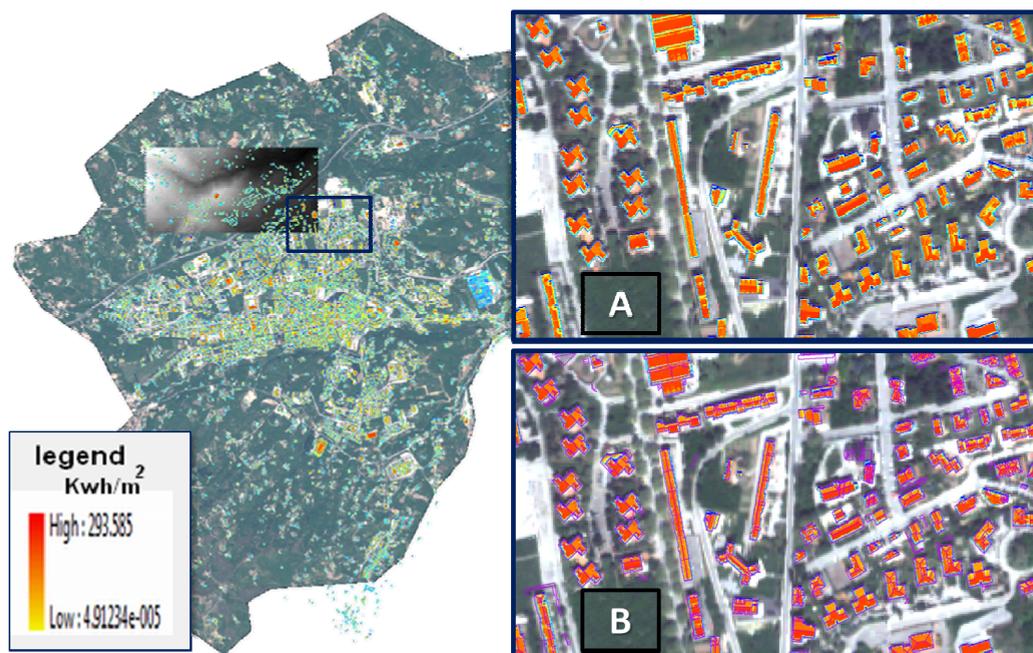


Figura 5. Radiazione solare totale in Kwh/m^2 calcolata per le coperture degli edifici ed infrastrutture del comune di Avellino e particolare.

Nella zona superiore a sinistra dell'immagine corrispondente a due tavole delle 48 totali, il sottofondo è costituito dal DSM in tonalità di grigio (le tonalità chiare rappresentano altimetrie maggiori). Su tale sub-area è stata messa a punto e testata la procedura, maggiormente efficace, descritta nel successivo paragrafo. La radiazione solare in Kwh/m^2 , relativa ai mesi di giugno e

luglio 2012, calcolata per le coperture nell'area d'interesse tenendo conto dei loro parametri di esposizione ed inclinazione derivati dal DSM, dà luogo evidentemente a valori diversi in corrispondenza dei diversi orientamenti e geometrie come si rileva dalle immagini di dettaglio riportate nel lato destro della Figura 5. Nella prima immagine di dettaglio (indicata con "A") si possono rilevare le variazioni di radianza cumulata calcolate per le singole falde di tetto con differenti orientazione ed inclinazione con valori uniformi per le coperture piane ed effetto delle ombreggiature per quelle con elementi strutturali 3D che si schermano reciprocamente. Nell'immagine di dettaglio "B" di Figura 5, invece, si evidenziano i diversi elementi geometrici delle falde ottenuti dal DSM per ognuno dei quali tramite tecniche GIS è stata stimata la radianza cumulata utilizzabile a fini della produzione fotovoltaica.

Diffusione ed albedo

Nelle valutazioni precedenti sono stati utilizzati i *tool* ed i dati disponibili sul sito PVGIS per stimare i parametri di torbidità atmosferica per i mesi di riferimento su base puntuale, da utilizzare per il calcolo della radiazione solare cumulata disponibile sulle varie coperture caratterizzate tramite il DSM. Inoltre, in una prima approssimazione non si è tenuto conto del contributo alla radiazione totale riflesso da parte delle superfici dell'intorno caratterizzate per quest'aspetto in base alle loro proprietà di riflettanza emisferica a larga banda usualmente denominate albedo.

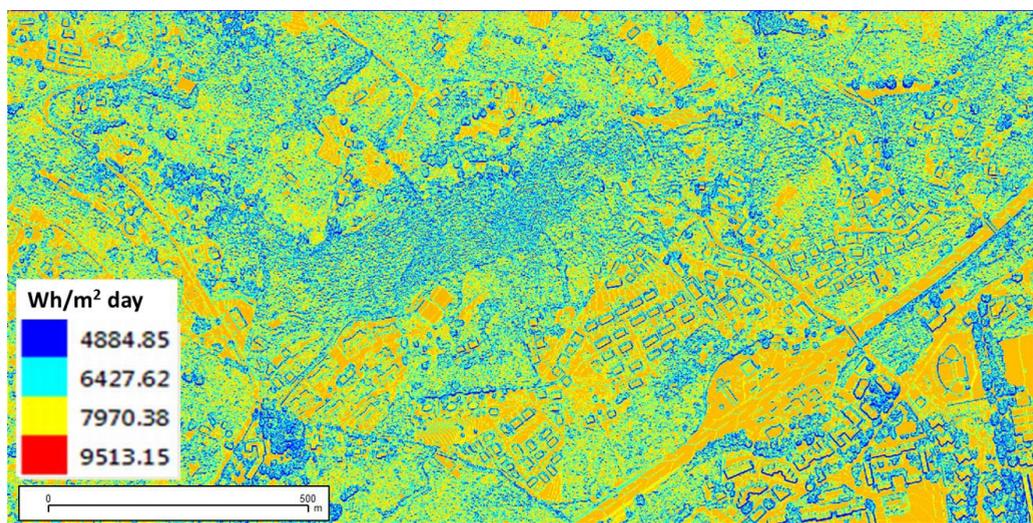


Figura 6. Mappa della radiazione solare globale stimata nel giorno 14-7-2012 per l'area evidenziata tramite il DSM in Figura 5.

Sebbene la torbidità media mensile in termini di "Linke turbidity" sia nel sito PVGIS fornita sotto forma di mappe con accuratezza di 1 Km, stimate a partire dall'atlante globale implementato inizialmente da Remund et al. (2003) e successivamente integrato ed aggiornato con dati rilevati dalle piattaforme satellitari (tipicamente geostazionarie) e dalle stazioni meteorologiche a terra, per la città di Avellino, su una superficie totale di circa 42 Km² con dimensioni di circa 6x6 km, si è ragionevolmente assunto che sia ben caratterizzata in termini di trasparenza atmosferica da valori puntuali. Per poter valutare l'effetto dell'albedo locale, è stata elaborata un'immagine multispettrale Landsat ETM+ dell'agosto 2012, utilizzando (Liang, 2000) le riflettanze nelle bande del visibile, NIR e SWIR, da questa derivate dopo una correzione atmosferica effettuata sulla base di valore di visibilità di 20 km.

La radiazione globale solare ($\text{Wh/m}^2 \text{ day}$) sull'area d'interesse (Figura 6) è stata stimata con un tool *software* disponibile in ambiente *open source* (GRASS), utilizzando le mappe del DSM e dell'albedo precedentemente ottenute, unitamente ai parametri di torbidità puntuali per il mese di giugno/luglio. La stima è stata effettuata per ciascuna delle 3 componenti: diretta, diffusa e riflessa. Quest'ultima, non considerata precedentemente perché minore delle altre due, è risultata comunque significativa e pari circa ad 1/3 della diffusa.

Risultati e conclusioni

Le metodologie implementate utilizzando in modo integrato le tecniche di rilevazione LIDAR ed aerospaziali satellitari con una serie di risorse sia *software* che di dati resi disponibili in ambito europeo hanno permesso di stimare efficacemente per l'intero Comune di Avellino la radianza solare disponibile a livello delle coperture per la produzione fotovoltaica sulla base delle componenti diretta e diffusa. Successivamente un ulteriore affinamento della procedura ha permesso di valutare in aggiunta anche la componente riflessa derivante dall'albedo locale preliminarmente mappata attraverso un'immagine multispettrale Landsat ETM+ corretta atmosfericamente.

Tenendo conto dell'alta eterogeneità dell'ambiente urbano con la forte presenza di contributi di origine antropica (trasporti, riscaldamento,...) alla trasparenza atmosferica sulla quale impattano anche fenomeni legati ai cambiamenti climatici, in prospettiva si mira ad utilizzare maggiormente i prodotti tematici operativi delle missioni satellitari di Osservazione della Terra (EO) attualmente o prossimamente disponibili per migliorare la caratterizzazione spaziale e temporale della torbidità a larga banda (Linke Turbidity) finalizzata specificamente al supporto della produzione fotovoltaica. In tale contesto, assume rilevanza anche la miglior stima dell'albedo tenendo conto degli effetti di riflessione tipicamente non lambertiani del tessuto urbano, eventualmente valutabili anche tramite i prodotti di EO attualmente disponibili (ex. BRDF/albedo MODIS products).

Bibliografia

- Borfecchia F., Pollino M., De Cecco L., Lugari A., Martini S., La Porta L., 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):129-141.
- Borfecchia F., De Cecco L., Pollino M., Lugari A., Martini S., La Porta L. (2009) "Tecniche aerospaziali attive (LIDAR) e passive (multi/iperspettrali) per la stima della vulnerabilità sismica del tessuto urbano", *Atti 13ª Conferenza Nazionale ASITA 2009*, 469-474.
- Caiaffa E., Marucci A., Pollino M. (2012), "Study of sustainability of renewable energy sources through GIS analysis techniques", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 7334 - Part II, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 532-547.
- Forni A., Colonna N., Del Cielo R., Disi A., Iaboni V., Mancuso E., Notaro C., Olivetti I., Torrez N., Vieri C. (2011), "Metodologia di Stima dei potenziali regionali da fonti rinnovabili e per l'efficienza energetica, e azioni per il raggiungimento degli obiettivi UE 20-20-20 al 2020". *Atti 15ª Conferenza Nazionale ASITA 2011*, 1060-1077.
- Liang S. (2000) "Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I – Algorithms", *Remote Sensing of Environment*, 76:213-238.
- PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System. Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology- Joint Research Centre – Institute for Energy and Transport, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis> (ultimo accesso Agosto 2012).
- Remund J., Wald L., Lefèvre M., Ranchin T., Page J. (2003) "Worldwide Linke turbidity information", *Proceedings of the ISES solar world congress 2003*, Göteborg, Sweden.