

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE E AMBIENTALE

LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

Mappatura degli impianti fotovoltaici in Zona Industriale di Padova: stato attuale e prospettive future

LAUREANDO

Alessio Zanette

Matricola 1218890

RELATORE

Prof. Salvatore Pappalardo

Università di Padova

CORRELATORE

Dr. Carlo Zanetti

Università di Padova

ANNO ACCADEMICO 2023/2024
DATA DI LAUREA 20/03/2024

Abstract

Negli ultimi anni, l'attenzione e lo studio delle potenzialità delle risorse rinnovabili hanno acquisito una rilevanza senza precedenti su scala mondiale. Nonostante siano ampiamente riconosciuti i molteplici vantaggi e svantaggi di questo tipo di risorse, la valutazione precisa e tangibile dell'efficacia di tali impianti risulta spesso di difficile comprensione. Questa tesi analizza le opportunità e le prestazioni che possono emergere dall'implementazione di pannelli fotovoltaici, sui tetti inutilizzati all'interno di un contesto specifico: la zona industriale di Padova. Quest'area, caratterizzata da un limitato interesse artistico e storico e da ampie metrature, è un luogo adatto per l'applicazione di soluzioni nel campo delle energie rinnovabili, che sono note per essere caratterizzate da una bassa densità energetica, senza dover tenere in considerazione vincoli paesaggistici. L'obiettivo della tesi è dunque stimare in maniera accurata e dettagliata il potenziale di questa strategia, esplorando le possibilità di generazione energetica, le implicazioni ambientali e le sfide pratiche relative all'adozione su larga scala di impianti fotovoltaici. Si è dimostrato e quantificato, in seguito all'analisi del potenziale fotovoltaico, l'efficacia di questo tipo di fonti di energia, che potrebbero anche arrivare a toccare i 415 GWh di produzione annua solo nella zona di studio.

Indice

1	Fonti di energia rinnovabili	1
1.1	L'energia solare	2
1.1.1	Funzionamento di un pannello fotovoltaico	2
1.1.2	Parametri di campo	4
1.2	Principali tecnologie fotovoltaiche	5
1.3	I problemi del fotovoltaico	6
1.3.1	Il riciclo	6
1.3.2	Influenza sui microclimi	7
1.4	Stato dell'arte nelle rivalutazioni fotovoltaiche	7
2	Materiali e Metodi	11
2.1	Inquadramento geografico	11
2.2	Google Earth Pro	13
2.3	Mappatura	14
2.4	Tool: PVGIS	16
2.5	Dati	16
3	Risultati e discussione	19
3.1	Mappatura delle coperture a fotovoltaico	19
3.2	Analisi statistica sulla percentuale di copertura	21
3.3	Studio dell'inclinazione ottima	22
3.4	Risultati dell'ampliamento	24
3.5	Implicazioni economiche e ambientali	25
4	Conclusione	27

A Appendice: Cartografie di Dettaglio	29
Bibliografia	33

1

Fonti di energia rinnovabili

L'aumento della domanda globale di energia si presenta come una sfida sempre più pressante, soprattutto considerando l'imminenza delle scadenze fissate per il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile delineati nell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite. Allo stesso tempo, il quadro climatico globale richiede azioni decisive e tempestive per mantenere l'aumento medio della temperatura superficiale del pianeta al di sotto del limite critico dei 2°C, come stabilito nell'Accordo di Parigi sul cambiamento climatico. Questo obiettivo cruciale è stato definito alla luce delle crescenti preoccupazioni riguardanti gli impatti del riscaldamento globale sulle persone e sull'ambiente. Emerge con chiarezza la necessità di una transizione energetica rapida ed efficace, che punti alla riduzione delle emissioni di gas serra, all'adozione di fonti energetiche rinnovabili e alla promozione di pratiche di consumo più sostenibili e responsabili [1]. Questa transizione lontano dai combustibili fossili verso soluzioni a basso rilascio di carbonio svolge un ruolo essenziale nel settore energetico, poiché le emissioni di anidride carbonica legate all'energia rappresentano due terzi di tutti i gas serra [2]. Con queste premesse le energie rinnovabili rappresentano una delle opzioni più promettenti per raggiungere questi obiettivi e nel contrastare i cambiamenti climatici [3]. Il punto di forza di queste fonti di energia è che non si esauriscono nel tempo, in quanto derivano da risorse naturali; alcuni esempi sono l'energia idraulica, che sfrutta la potenza delle correnti d'acqua, l'energia solare, che trae energia dai raggi del sole, l'energia eolica, generata dal vento, e l'energia geotermica, che sfrutta il calore proveniente dal nucleo terrestre. Tuttavia data la loro natura non costante durante l'anno, la forte dipendenza dalla geografia del

luogo di applicazione e la bassa densità energetica che offrono, richiedono una pianificazione attenta e una gestione intelligente per massimizzarne l'efficacia. L'Italia si presenta come un paese con un potenziale significativo per lo sfruttamento di tutte le energie rinnovabili, favoreggiato dalla sua posizione geografica, dal clima mediterraneo e dalla presenza di caratteristiche naturali come montagne e territori vulcanici. Per questi motivi potrebbe rappresentare un modello per la transizione ecologica e raggiungere l'autosufficienza energetica. Attualmente, secondo gli ultimi rapporti pubblicati da TERNA, le energie rinnovabili in Italia hanno generato circa 80000 GWh [4], coprendo circa il 26% della domanda energetica.

Questa tesi si pone l'obiettivo di stimare quantitativamente l'efficacia dell'energia solare, verificandone la significatività in caso di applicazione su larga scala. È stato scelto come caso di studio la Zona Industriale di Padova (ZIP), una zona a basso interesse artistico e dotata di grandi tetti regolari che possono facilitare l'installazione di pannelli fotovoltaici.

1.1 L'ENERGIA SOLARE

Tra le fonti energetiche precedentemente citate, l'energia solare rappresenta un'opzione particolarmente interessante, poiché offre numerosi vantaggi. L'energia solare può essere sfruttata sia per produrre energia termica attraverso pannelli solari termici, utilizzati per scopi come il riscaldamento dell'acqua sanitaria o degli ambienti; sia per la produzione diretta di energia elettrica, mediante pannelli fotovoltaici. Le due tipologie di pannelli sfruttano tecnologie differenti per convertire l'irraggiamento solare in energia fruibile, ma sono accomunati dall'essere impianti di dimensione ridotte e facilmente installabili, a differenza dei grandi impianti richiesti per la produzione energetica sfruttando altre fonti rinnovabili. Bensì sia possibile una implementazione combinata delle due tecnologie, nei seguenti paragrafi, ci concentreremo principalmente sullo studio di pannelli fotovoltaici.

1.1.1 FUNZIONAMENTO DI UN PANNELLO FOTOVOLTAICO

I pannelli fotovoltaici sfruttano l'energia della luce per produrre direttamente elettricità. Per fare ciò, è necessario un materiale ricco di elettroni che possano essere eccitati dall'irraggiamento solare fino ad un livello energetico supe-

riore. Successivamente attraverso un canale esterno, gli elettroni si spostano dissipando l'energia in eccesso generando elettricità.

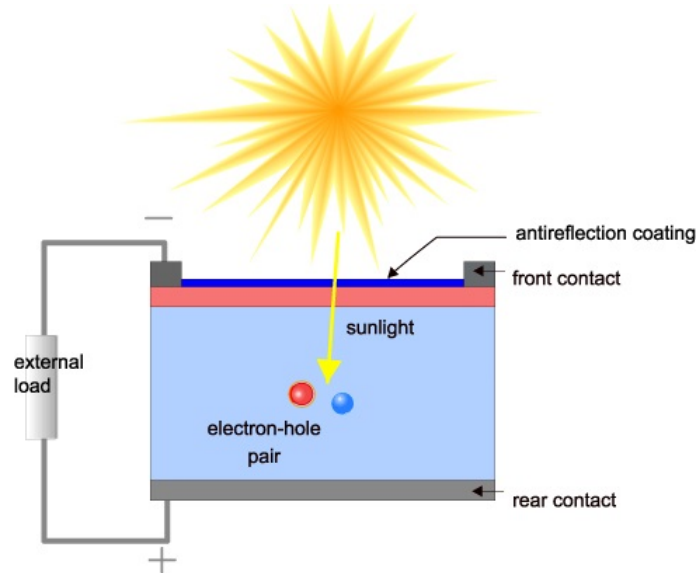


Figura 1.1: Schema semplificato di un pannello fotovoltaico

Quando si parla di energia, una delle cose più importanti da valutare, sia in fase di progettazione che in fase di montaggio, è l'efficienza. Per i pannelli fotovoltaici l'efficienza è definita come il rapporto tra l'energia prodotta e l'energia che arriva dal sole:

$$\eta = \frac{V \cdot i \cdot FF}{P_{in}} \quad (1.1)$$

- V è il potenziale del pannello fotovoltaico a circuito aperto
- i è la corrente generata quando il voltaggio è nullo
- FF è il valore che lega i due parametri precedenti ed è necessario per trovare il punto di massimo lavoro, in quanto, se calcolassimo la potenza generata nei punti precedenti non ricaveremmo nulla

Questi valori vengono decisi, o ricavati, nella fase di progettazione del pannello fotovoltaico e ne definiscono le specifiche tecniche. Durante la fase di posizionamento e installazione del pannello, altri parametri come l'esposizione solare e l'inclinazione, sono da tenere in considerazione e scegliere adeguatamente, al fine di massimizzare l'efficienza dell'impianto.

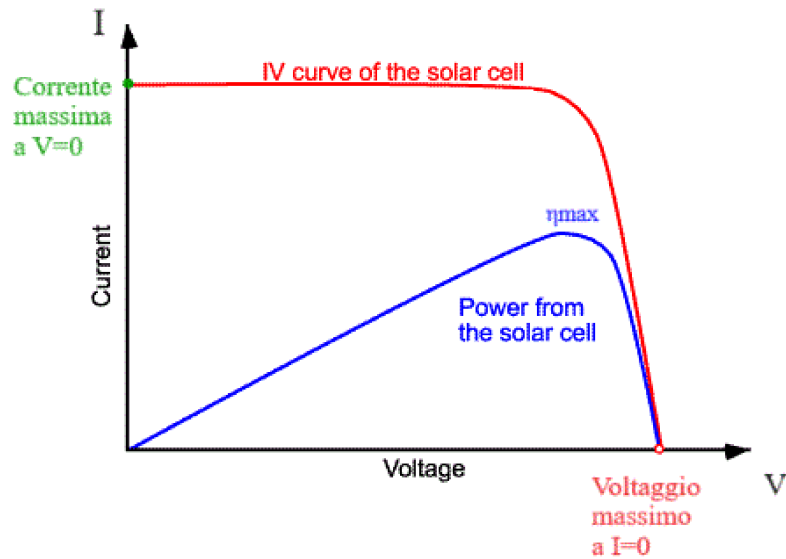


Figura 1.2: Grafico efficienza in relazione ai suoi parametri

1.1.2 PARAMETRI DI CAMPO

Con il termine parametri di campo si intendono i parametri che influenzano l'efficienza del pannello fotovoltaico indipendentemente dalle sue specifiche tecniche. Questi parametri possono essere definiti durante la fase di posizionamento, ad esempio l'inclinazione del pannello, o vanno valutati durante l'utilizzo del pannello, come la temperatura del pannello stesso.

Inclinazione Un parametro rilevante, che viene deciso prima di procedere all'installazione, è l'inclinazione a cui vengono montati i pannelli fotovoltaici. Allo scopo di massimizzare la produzione energetica, l'inclinazione del pannello può essere scelta in modo da massimizzare l'irraggiamento solare durante la giornata minimizzando la riflessione. Per mantenere una produzione ottimale durante il corso dell'anno, è necessario però considerare anche le variazioni stagionali nell'angolo d'incidenza del sole rispetto alla Terra. Alla nostra latitudine, l'inclinazione ideale è tra i 30 e i 40 gradi. Al giorno d'oggi, è possibile anche installare pannelli che seguono automaticamente l'andamento del Sole. Questa tecnica aumenta di molto l'esposizione e la produzione di energia, ma oltre a risultare più costosa, implica anche impianti ausiliari da alimentare e a cui fare manutenzione.

Temperatura Come tutti gli altri dispositivi a semiconduttore, le celle solari sono sensibili alla temperatura. Aumenti di temperatura riducono la larghezza della banda di un semiconduttore, influenzando così la maggior parte dei parametri del materiale. Questo processo può essere paragonato all'aumento dell'energia media degli elettroni nel materiale, il che significa che per raggiungere lo stato eccitato necessiteranno di meno energia, causando una riduzione dell'efficienza complessiva del dispositivo fotovoltaico. Per garantire un'efficienza ottimale dei pannelli fotovoltaici, è fondamentale mantenere la loro temperatura operativa il più bassa possibile, idealmente alle condizioni standard di 25°C. Pertanto, il raffreddamento dei sistemi fotovoltaici per mantenere la loro efficienza è sempre più importante [5]. A tale scopo, si stanno sviluppando numerose nuove tecniche per limitare le temperature dei pannelli. Queste tecniche, la cui efficacia è relazionata al clima in cui vengono applicate, si dividono in attive, passive e miste. Nelle prime viene collegato al pannello un dispositivo esterno che consuma energia operativa per far circolare solitamente aria o fluidi che fungono da refrigeranti; questa tecnica ha senso quando il rapporto tra l'energia guadagnata e consumata è vantaggioso. Le tecniche passive sono solitamente meno efficienti, ma hanno il vantaggio di non consumare energia e solitamente sono di più economica installazione.

1.2 PRINCIPALI TECNOLOGIE FOTOVOLTAICHE

In commercio sono presenti diversi tipi di pannelli fotovoltaici ognuno con caratteristiche proprie.

- Pannelli fotovoltaici monocristallini (CIGS): sono i pannelli più moderni e performanti, raggiungono un'efficienza del 23%, ma anche se rappresentano la tecnologia di riferimento per il fotovoltaico, questi moduli hanno un prezzo maggiore legato soprattutto all'elevata purezza del silicio utilizzato per la loro realizzazione
- Pannelli fotovoltaici policristallini (CdTe): sono comparsi sul mercato a partire dagli anni '80, perciò sono una tecnologia collaudata e molto affidabile. Questi pannelli hanno un rendimento intermedio di circa il 21 %, ma reagendo bene alle elevate temperature e grazie al costo di produzione contenuto, mantengono una fetta del mercato considerevole.
- Pannelli fotovoltaici Silicio Amorfo (a-Si): sono pannelli con un rendimento piuttosto basso, attorno al 13-14%, ma risultano piuttosto versatili, infatti i moduli consentono di creare superfici flessibili usate in diverse applicazioni edilizie e architettoniche

Grazie allo studio [6] è possibile confrontare, in condizioni standardizzate, le performance delle tre tipologie di pannelli fotovoltaici in relazione al fenomeno del surriscaldamento menzionato precedentemente.

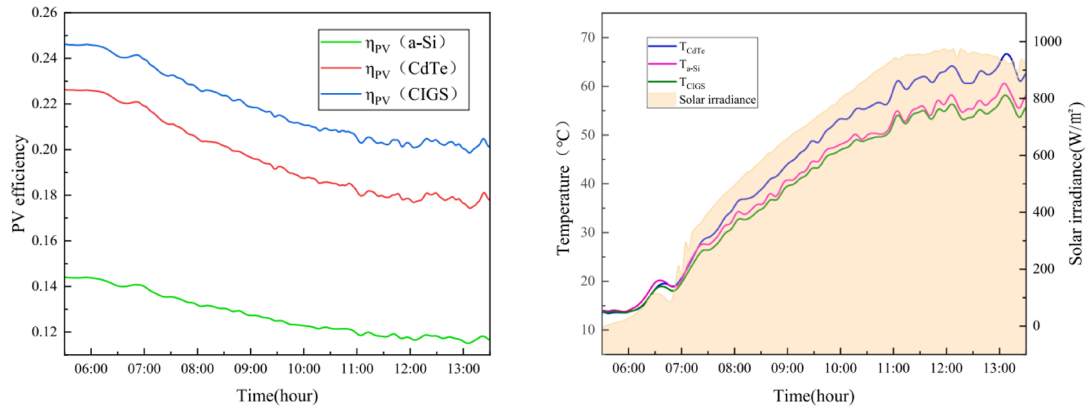


Figura 1.3: Andamento del rendimento dei pannelli in funzione della temperatura a sinistra e temperatura giornaliera dei vari pannelli a destra

1.3 I PROBLEMI DEL FOTOVOLTAICO

1.3.1 IL RICICLO

Uno degli aspetti sfavorevoli associati ai pannelli fotovoltaici, riguarda il loro ciclo di vita, in particolare, la gestione e lo smaltimento dei materiali utilizzati durante la loro produzione e il riciclo del pannello stesso. Il periodo di attività di un pannello fotovoltaico solitamente dura circa 25-30 anni e si conclude quando il pannello inizia a produrre solo l'80% della sua potenza iniziale. Tuttavia, un'analisi del ciclo di vita (LCA) [7] suggerisce che il timore dello smaltimento potrebbe essere eccessivo, poiché la maggior parte delle emissioni si verifica durante la produzione e l'estrazione delle risorse. Nuove tecniche in continuo sviluppo per il riciclo dei pannelli a fine vita potrebbero limitare gli impatti negativi, fornendo, secondo i principi dell'economia circolare, nuove materie prime seconde. Questo approccio potrebbe contribuire parzialmente ad alleviare il carico ambientale causato dall'estrazione delle risorse primarie [8].

1.3.2 INFLUENZA SUI MICROCLIMI

Un aspetto meno conosciuto, ma di notevole rilevanza, è l'effetto dei campi fotovoltaici sui microclimi a loro adiacenti. Il funzionamento dei pannelli fotovoltaici è strettamente legato alla loro capacità di assorbire i raggi solari, questa loro peculiarità li rende soggetti però a surriscaldamento che, oltre ad abbassarne l'efficienza, influisce sulla zona circostante. Un campo fotovoltaico di grandi dimensioni può generare effetti di isola di calore. L'analisi dei cambiamenti nel microclima locale prima e dopo la costruzione di impianti fotovoltaici, insieme all'impatto della loro copertura, rivela un aumento dell'escursione termica giornaliera. Nel caso del *Red Rock Photovoltaic Plant* (USA) [9], un aumento del 15% della copertura fotovoltaica ha determinato un aumento di $0,55^{\circ}\text{C}$ della differenza di temperatura dell'aria e ha ridotto la temperatura del suolo di $3,6^{\circ}\text{C}$ durante il giorno e di $1,1^{\circ}\text{C}$ di notte. Numerosi casi di studio indicano che possono verificarsi differenze significative negli effetti sul microclima tra diversi impianti fotovoltaici. Pertanto, sarebbe importante considerare un modello completo di bilancio energetico nella fase di progettazione di impianto fotovoltaico su vasta scala. Tuttavia, al momento, i modelli di progettazione e valutazione esistenti non affrontano pienamente la tematica di variazione dei microclimi, ma sono utilizzati principalmente in contesti con condizioni climatiche specifiche, come i deserti. Con l'integrazione di modelli più evoluti e la conseguente possibilità di prevedere gli impatti dei campi fotovoltaici, in una gamma più ampia di ambienti e condizioni meteorologiche, la progettazione di campi fotovoltaici diventerebbe più consapevole e meno impattante sui microclimi adiacenti.

1.4 STATO DELL'ARTE NELLE RIVALUTAZIONI FOTOVOLTAICHE

La maggior parte dei progetti di implementazione di pannelli fotovoltaici su grande scala riguarda la conversione di campi agricoli in campi fotovoltaici, in questo modo però, accresce un problema molto acceso negli ultimi tempi, il cambio di uso di suolo.

Per questo motivo, negli ultimi decenni, si è cercato di incentivare l'installazione di impianti fotovoltaici di grandi dimensioni in zone urbane, quantificandone il potenziale fotovoltaico.

Nello specifico, dalla letteratura, emerge che molti studi si impegnano a definire il potenziale fotovoltaico come una funzione dei seguenti elementi [10]

- Potenziale delle risorse necessarie al funzionamento dei pannelli fotovoltaici: irraggiamento solare in relazione a parametri ambientali rilevanti, come la temperatura ambiente, e al clima
- Potenziale tecnico: superficie disponibile idonea, prestazioni tecniche del sistema, criteri di sostenibilità se applicabili
- Potenziale economico: costi tecnologici, costi di fornitura e installazione e previsione dei risparmi futuri

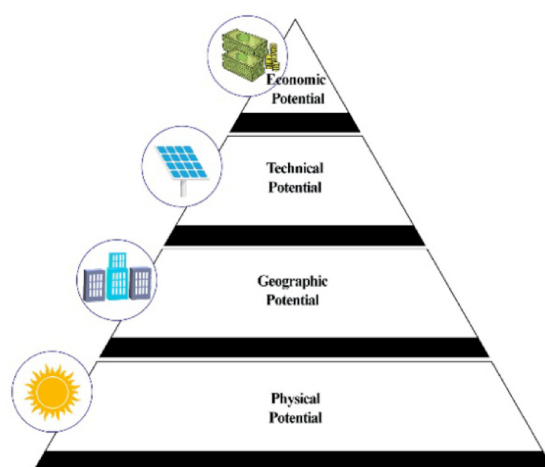


Figura 1.4: Parametri del potenziale fotovoltaico

La parte più delicata e soggetta a errore è il potenziale tecnico; i metodi che ne permettono il calcolo sono stati classificati in [11] secondo la loro precisione, e conseguente complessità:

- I Low-level methods sono metodi che sfruttano tecniche puramente statistiche quindi risultano i più semplici. Esempi includono i metodi che utilizzano la densità di popolazione come sostituto per l'area edificabile/-tetto. Tali metodi presuppongono un'omogeneità dei dati in tutta l'area analizzata, con conseguenti stime di limitata affidabilità.
- I Medium-level methods combinano dati statistici, come i precedenti, con informazioni spaziali derivate da sistemi informativi geografici (GIS) e metodi di rilevamento ottico e laser (LiDAR)
- Gli High-level methods integrano i precedenti metodi con tecniche avanzate per la digitalizzazione dei tetti e per l'analisi dettagliata delle informazioni spaziali e dell'irraggiamento solare. Tali metodi tipicamente incorporano strumenti sofisticati per stimare il ruolo dell'inclinazione del tetto, l'aspetto e l'ombreggiatura degli edifici.

Per le applicazioni pratiche di questi metodi sono presenti numerosi esempi, accomunati dall'interesse del calcolo del potenziale fotovoltaico di grandi aree urbane. Per esempio in Spagna [12] è stato condotto questo tipo di studio usando come dati mappe vettoriali GIS, rappresentative dal punto di vista statistico, e dati come l'uso del suolo e le densità edilizie. Nei Paesi Bassi [13] invece è stato utilizzato un metodo di scansione rapida per ricostruire parte dei tetti in 3D ed è successivamente stato sviluppato un algoritmo per determinarne il potenziale fotovoltaico. In Piemonte [14] invece sono state utilizzate mappe raster e mappe tecniche regionali come dati in input, e sono state poi analizzate da ArcGIS® e processate in MATLAB®. In questo caso la particolarità interessante è che la topologia dei tetti è stata presupposta a doppia pendenza e viene considerata solo una delle due pendenze per l'installazione del modulo e quindi il calcolo del potenziale fotovoltaico. Di questi esempi se ne possono trovare molti tra cui Germania [15], Canada [16], USA [17], India [18] etc. È importante notare che, nonostante la differenza nella qualità dei dati di partenza, l'interesse di trovare un metodo unificato per il calcolo del potenziale fotovoltaico è ripartito globalmente.

2

Materiali e Metodi

2.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La zona industriale di Padova nasce nel 1958, in seguito all'approvazione del piano regolatore del 1957, con lo scopo di promuovere e curare lo studio e l'esecuzione delle opere pubbliche necessarie per l'insediamento delle aziende industriali e artigianali. Dal momento della sua fondazione e fino al raggiungimento della sua superficie attuale di oltre 10 milioni di m^2 , il "Consorzio Zona Industriale e Porto Fluviale" di Padova risulta essere una delle più vaste aree industriali del Nordest.

Come anticipato, le cosiddette zone industriali, potrebbero essere le zone ideali per iniziare ad applicare su grande scala campi fotovoltaici sfruttando la superficie dei tetti. Infatti, essendo caratterizzate da grandi capannoni di scarso interesse artistico, non sono soggette a vincoli paesaggistici (Dr.Lg. 42/04, Codice dei Beni Culturali), inoltre i tetti ampi e tendenzialmente piani, risultano facilmente agibili ed il montaggio appare più semplice e conveniente rispetto ai classici tetti in tegole. Uno dei motivi per cui l'Italia, in generale, è un territorio adatto all'applicazione di campi fotovoltaici è la sua latitudine, oltre che al clima mediterraneo che gioca un ruolo importante. Padova si trova a una latitudine di circa 45 gradi nord, il che significa che i raggi solari incidono principalmente da sud durante tutto l'anno.



Figura 2.1: Area della ZIP considerata nello studio

2.2 GOOGLE EARTH PRO

Google Earth Pro rappresenta una piattaforma versatile che offre una vasta gamma di funzioni per esplorare il nostro pianeta. Oltre all'esplorazione, Google Earth Pro offre strumenti avanzati per misurare, calcolare aree e analizzare terreni, rendendolo un valido strumento per le analisi territoriali. Caratteristiche peculiari di Google Earth Pro sono la grande compatibilità con dati GIS e la possibilità di usufruire di database storici per viaggiare nel tempo. La prima versione di Google Earth è stata rilasciata da Google nel 2001, la sua versione Pro è stata resa gratuita a partire dal 2015. Uno strumento con queste caratteristiche, era già stato idealizzato e presentato da Al Gore nel suo discorso del 1998 [19], dalle sue parole emerge l'importanza di avere a disposizione una rappresentazione digitale e interattiva del nostro pianeta, che consenta agli utenti di esplorarne e comprenderne meglio le sue dinamiche, al fine di aumentare la consapevolezza ambientale e affrontare le sfide globali legate all'ambiente. Per mantenere una fonte robusta e aggiornata di dati, Google Earth Pro utilizza immagini satellitari ed immagini aeree fornite da enti affidabili tra cui le missioni spaziali Landsat e Sentinel, fornitori commerciali, modelli di elevazione digitale (DEM) e dati Lidar. La semplicità, la precisione e l'aggiornamento frequente dei dati hanno reso questo software uno strumento efficace per la mappatura.

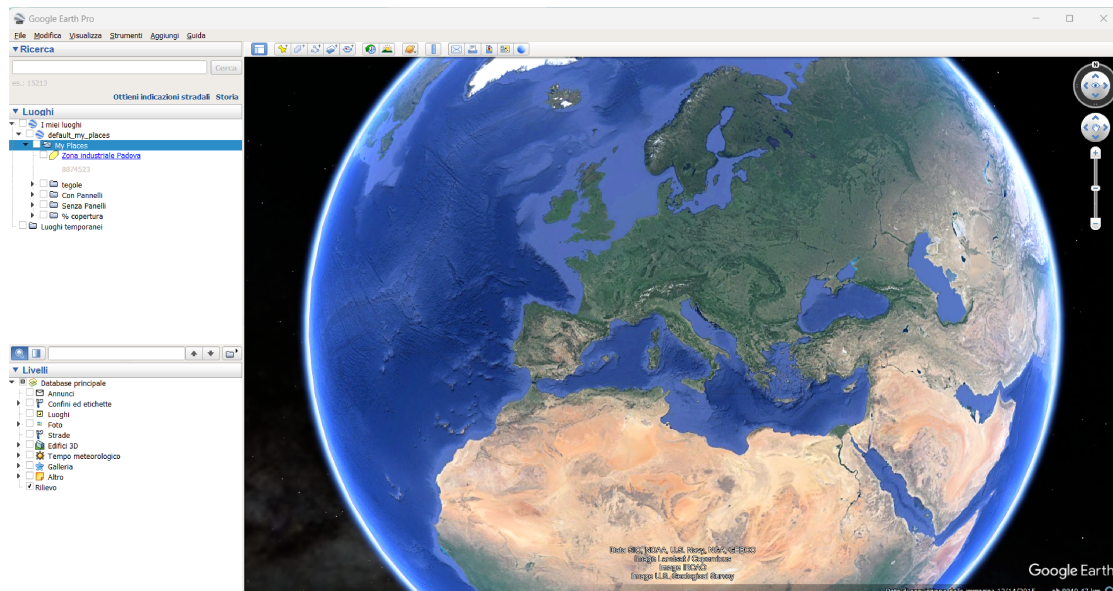


Figura 2.2: Google Earth Pro schermata iniziale

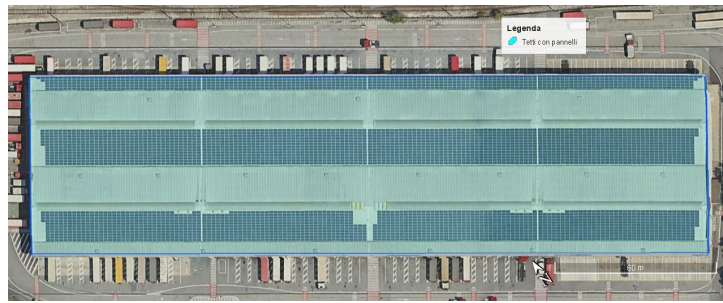
2.3 MAPPATURA

Per la mappatura è stata usata la funzione *poligono*. Questa funzione prevede la creazione manuale di poligoni semitrasparenti sulla zona interessata. Nel nostro caso, i dati di interesse sono le aree delimitate dai poligoni. Per esportare agevolmente questa serie di misurazioni, l'area associata ad ogni poligono è stata trascritta volta per volta nella descrizione del poligono stesso. In alcuni casi è stato necessario accertare la presenza di pannelli sul tetto in esame entrando nella modalità di visualizzazione 3D, nonostante la qualità sub-metrica delle immagini (30-40 cm) a disposizione, poter navigare tridimensionalmente ha permesso fornire misurazioni più precise e prive di errori. Durante la mappatura, i poligoni creati sono stati numerati in ordine crescente secondo la seguente classificazione:

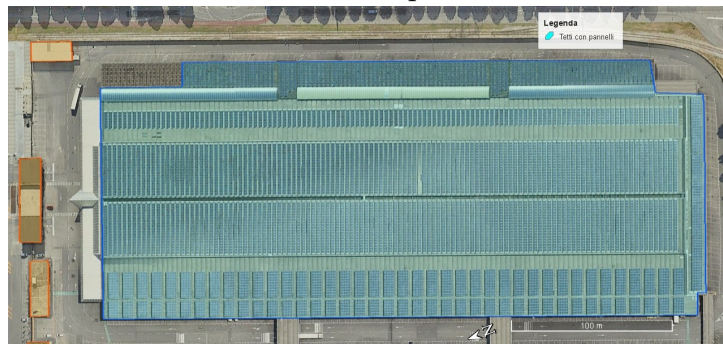
- tetti con pannelli
- tetti senza pannelli
- parcheggi con pannelli
- parcheggi senza pannelli
- tetti con tegole

L'obiettivo iniziale è stato riconoscere e classificare il tipo di ogni tetto, prestando attenzione però a dividere il tetto in due differenti poligoni, nel caso di particolare sbilanciamento tra porzione di copertura pannellata e non utilizzata. Di seguito alcuni esempi in figura 2.3

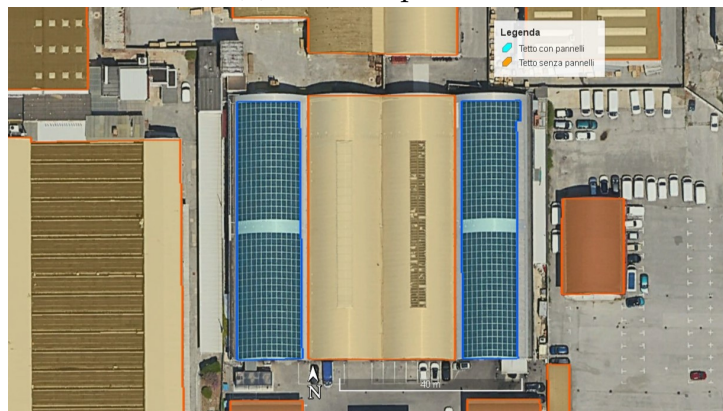
È stata compiuta, inizialmente, un'analisi quantitativa che considera la proporzione di tetti provvisti di pannelli rispetto ai tetti che ne sono sprovvisti. Si può notare però, come in "tetti con pannelli" a e b, la copertura dei pannelli sui tetti sia variabile. Per questo motivo, per il calcolo della stima energetica è stato scelto un approccio più ingegneristico che fa uso di uno studio statistico per valutare con maggiore precisione la metratura effettiva utilizzabile.



(a) Tetto con pannelli



(b) Tetto con pannelli



(c) Tetto misto



(d) Tetto con tegole

Figura 2.3: Esempi delle categorie analizzate

2.4 TOOL: PVGIS

Per la stima dell'energia prodotta è stato usato il tool PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Questo strumento è stato sviluppato dal European Commission Joint Research Centre [20] e permette di:

- Calcolare le performance di un impianto fotovoltaico durante un anno e durante ogni mese
- Ricevere informazioni riguardo la radiazione solare annua
- Ricevere informazioni sul tempo atmosferico caratteristico di un determinato luogo

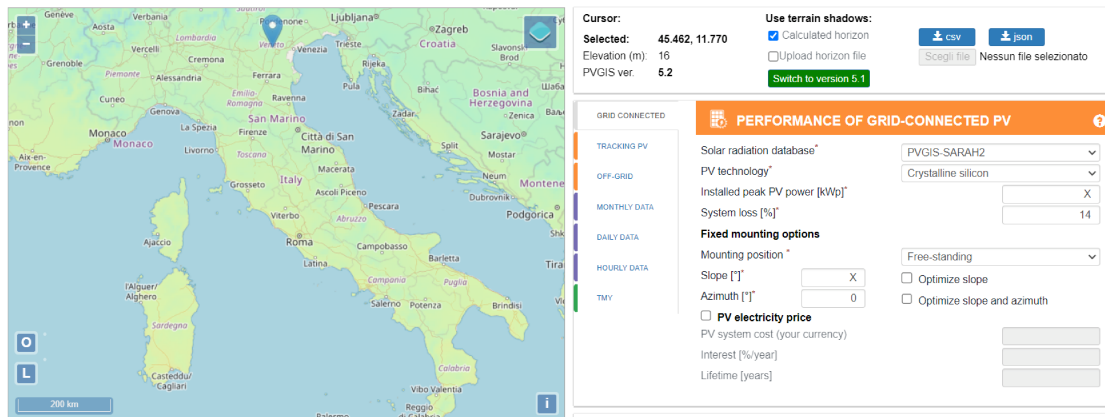


Figura 2.4: Tool PVGIS

Il tool richiede all'utente l'inserimento di diversi parametri. Per la seguente analisi, le variabili dipendenti dalla tipologia di installazione e dalla tipologia specifica di tecnologia fotovoltaica, come le perdite di sistema, non sono ritenute pertinenti e sono mantenute costanti al valore di default.

I dati che invece sono calcolati ed inseriti manualmente sono l'inclinazione dei pannelli e il kWp installato, ovvero la potenza che viene dichiarata prodotta dal produttore in condizioni standard; essa viene stimata con:

$$kWp = \frac{1 \frac{kW}{m^2} \cdot area \cdot \eta}{100} \quad (2.1)$$

2.5 DATI

Successivamente alla fase di elaborazione, per eseguire un confronto che fornisca dati di più immediata visualizzazione, è stato fatto uso di banche dati for-

nite da ISTAT e Terna. ISTAT è l'acronimo dell'Istituto Nazionale di Statistica, l'ente governativo italiano responsabile della raccolta, dell'elaborazione e della diffusione di dati statistici riguardanti l'Italia. Terna invece è la principale società italiana operante nel settore della trasmissione di energia elettrica.

Dati	Valore	Fonte
Consumi elettrici per abitante totale	5.02 $\frac{KWh}{ab}$	[4]
Consumi elettrici per abitante per uso domestico	1.095 $\frac{KWh}{ab}$	[4]
Potere calorifico Carbone	25-30 $\frac{MJ}{Kg}$	
Potere Calorifico Gas Naturale	40-45 $\frac{MJ}{Kg}$	
Fattori di emissione di CO ₂ da Carbone	899,9 $\frac{gCO_2}{KWh}$	[21]
Fattori di emissione di CO ₂ da Gas Naturale	365,0 $\frac{gCO_2}{KWh}$	[21]

Tabella 2.1: Tabella dei dati utilizzati con relativa fonte

3

Risultati e discussione

3.1 MAPPATURA DELLE COPERTURE A FOTOVOLTAICO

La mappatura eseguita su GEP ha contato circa un migliaio di tetti in tutta la zona industriale di cui 156 "Tetti con pannelli", 756 "Tetti senza pannelli", 40 "Tetti con tegole" e 59 parcheggi ognuno con associata la propria metratura. In Appendice sono state aggiunte le mappe dettagliate della mappatura.

È stata eseguita una prima analisi per verificare attualmente la proporzione di tetti provvisti di pannelli rispetto a quelli che non ne sono sprovvisti.

Come anticipato questa stima si basa sulla metratura dei tetti che possiedono i pannelli contro quelli che non li possiedono. Può anche essere interpretata come un indice di quante industrie in relazione alla loro dimensione si sono affidate alla tecnologia fotovoltaica per la loro azienda.

Si indichi con $A_{tipotetto}$ la metratura totale ottenuta, si ricava

$A_{tetticonpannelli}$	$633870 m^2$
$A_{tettisenzapannelli}$	$1812693 m^2$
$A_{parcheggiconpannelli}$	$7649 m^2$
$A_{parcheggisenzapannelli}$	$8670 m^2$
$A_{tetticontegole}$	$1849 m^2$
A_{totale}	$2472066 m^2$

Tabella 3.1: Risultati mappatura

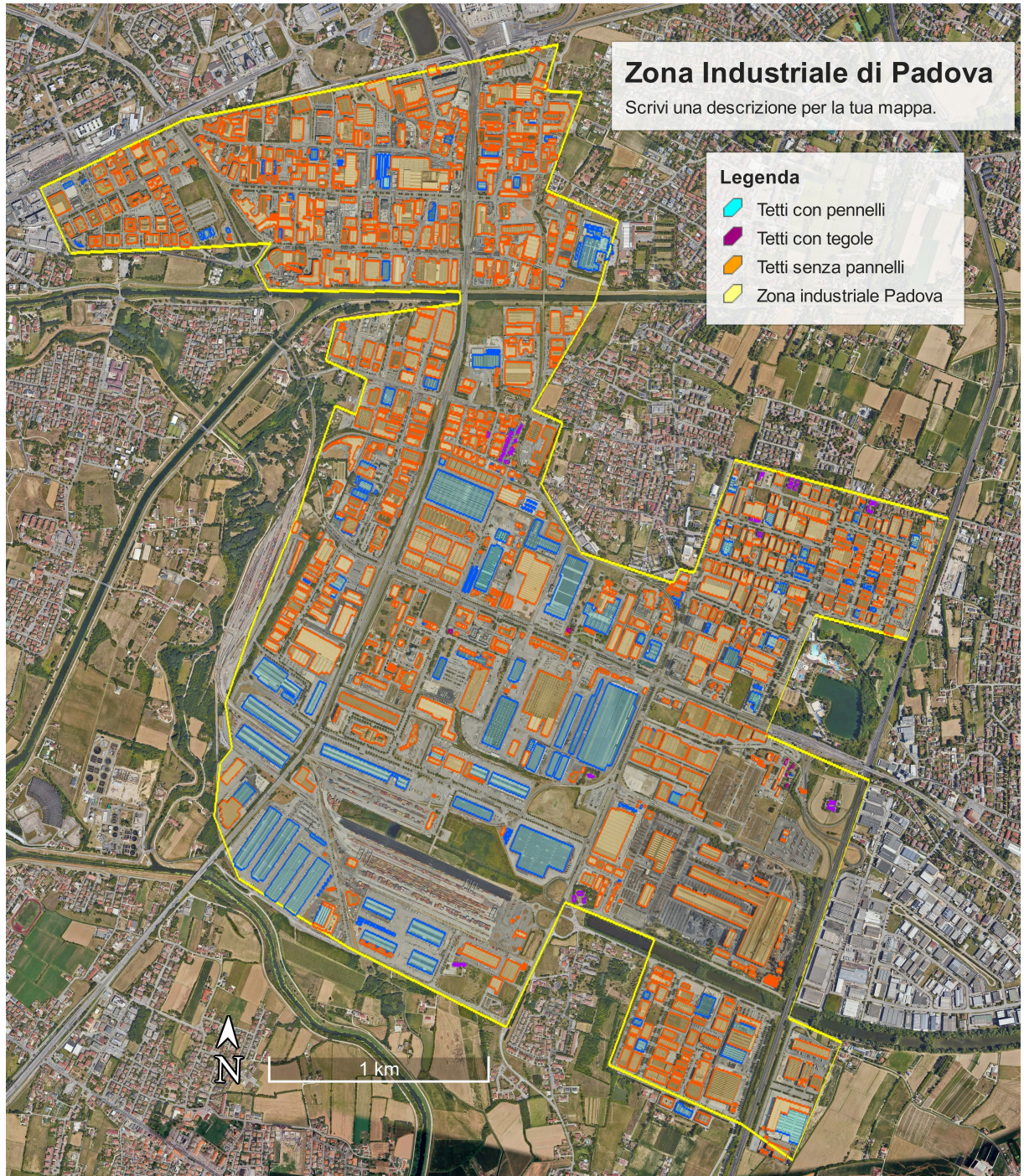


Figura 3.1: Risultato della mappatura

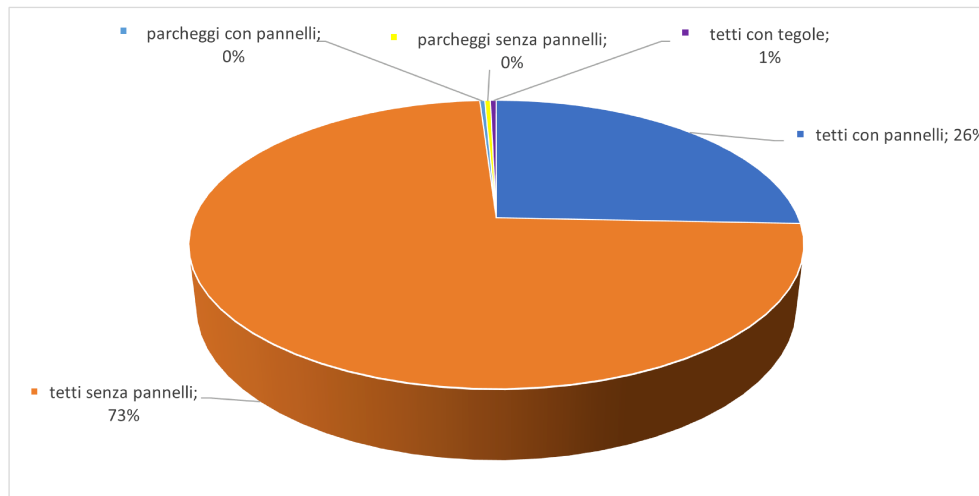


Figura 3.2: Divisione attuale delle coperture nella ZIP

Si può notare che i parcheggi sono quasi influenti, in quanto possiedono una superficie molto minore rispetto ai tetti dei grandi capanni industriali. Allo stesso modo i tetti di tegole, che si trovano all'interno del perimetro della zona industriale, anche se non è noto se il loro utilizzo è abitativo o commerciale, non hanno copertura sufficiente a renderli rilevanti. Le analisi seguenti quindi considereranno i capannoni come soggetto predominante, non solo in relazione alla loro area, ma anche per le motivazioni precedentemente nominate di comodità ed efficienza dell'uso di tetti piani e molto grandi.

3.2 ANALISI STATISTICA SULLA PERCENTUALE DI COPERTURA

Per rendere più realistici i calcoli che seguono, è stata eseguita un'analisi statistica per definire più precisamente, in media, quanta superficie di un tetto è, o può essere provvista, di pannelli fotovoltaici. L'impossibilità di sfruttare l'intera copertura può essere dovuta sia a problemi strutturali che economici, ma ipotizzando che i problemi sorti nell'installazione dei pannelli ora presenti si possano riproporre durante l'espansione, consideriamo un parametro di scala per calcolare l'area utile pannellabile. Come risulta chiaro nelle immagini seguenti, infatti, l'area che è stata considerata " $A_{tetticonpannelli}$ " sovrastima la produzione effettiva perchè considera sia la metratura dei pannelli che parti di copertura inerte.

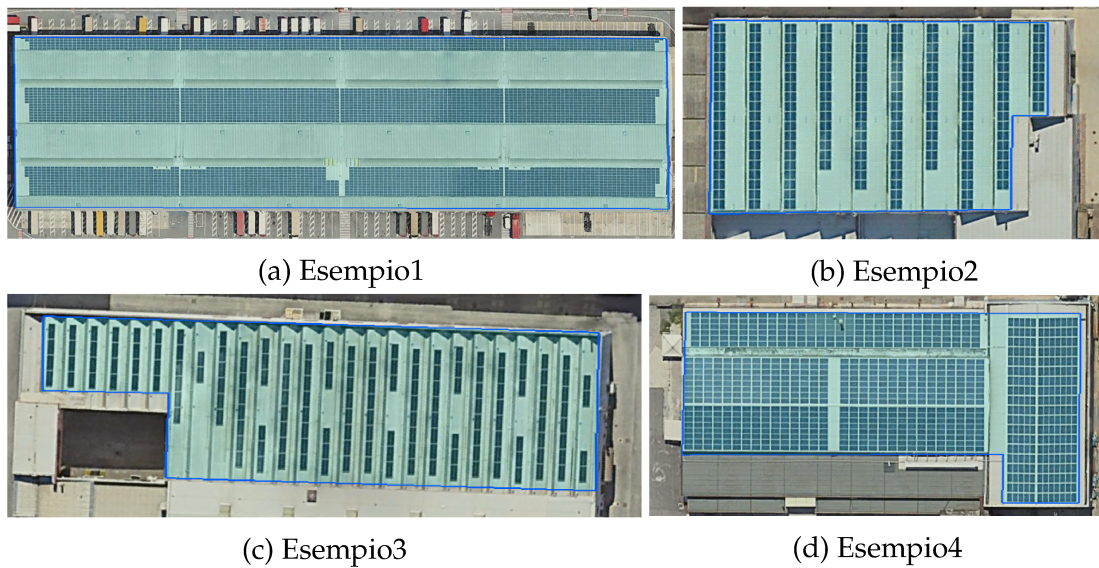


Figura 3.3: Esempi tetti con pannelli

Eseguiamo quindi un'analisi statistica su 40 campioni (circa 1/4 dei tetti con pannelli per ricavare un fattore correttivo ϕ sulle metrature.

$$\phi = \frac{\sum_{n=1}^{40} \%_{copertura} \cdot A_{tetto}}{\sum_{n=1}^{40} A_{Tetto}} = 58\% \quad (3.1)$$

Il risultato ottenuto, pari a 58%, è quindi un indice della percentuale di tetto occupata dai pannelli attualmente e che considereremo per l'espansione. Il calcolo è una media pesata sull'area, in modo da dare maggiore importanza ai tetti di grande dimensione, che come da ipotesi spesso sono caratterizzati dall'essere piatti e più carichi di pannelli, e pesando meno i tetti di più piccola dimensione.

3.3 STUDIO DELL'INCLINAZIONE OTTIMA

Per il calcolo dell'inclinazione ottima è stato usato un metodo più sperimentale cercando di eseguire un'analisi di sensibilità. Per questa tecnica sono stati mantenuti costanti tutti i parametri all'interno del tool PVGIS. Variando solamente l'inclinazione, e rielaborando i risultati ottenuti importandoli in Excel, è stato possibile riconoscerne l'andamento e ricavarne il massimo. È stato scelto per le simulazioni il valore arbitrario di 100000 m^2 .

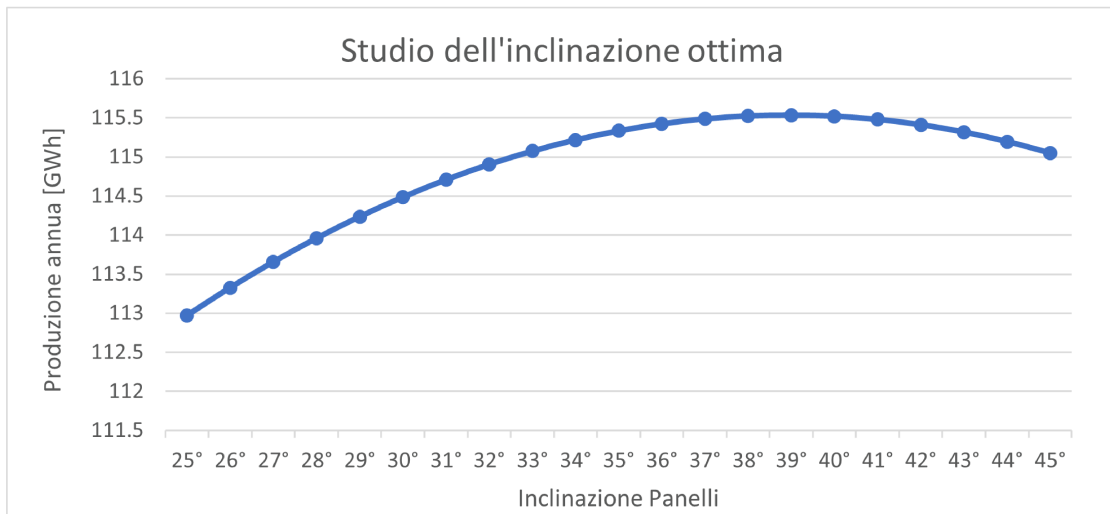


Figura 3.4: Studio dell'inclinazione ottima

Dai grafici si possono trarre alcune considerazioni importanti. Si può notare che alla latitudine dell'area in esame la produzione massima si raggiunge attorno ai 40°, per l'esattezza a 39°. La produzione complessiva maggiore è intesa come area integrale maggiore, non come valore puntualmente maggiore. Tramite il secondo grafico si può notare infatti che l'inclinazione che fornisce la produzione annua più elevata è quella che permette una maggiore costanza di produzione durante l'anno.

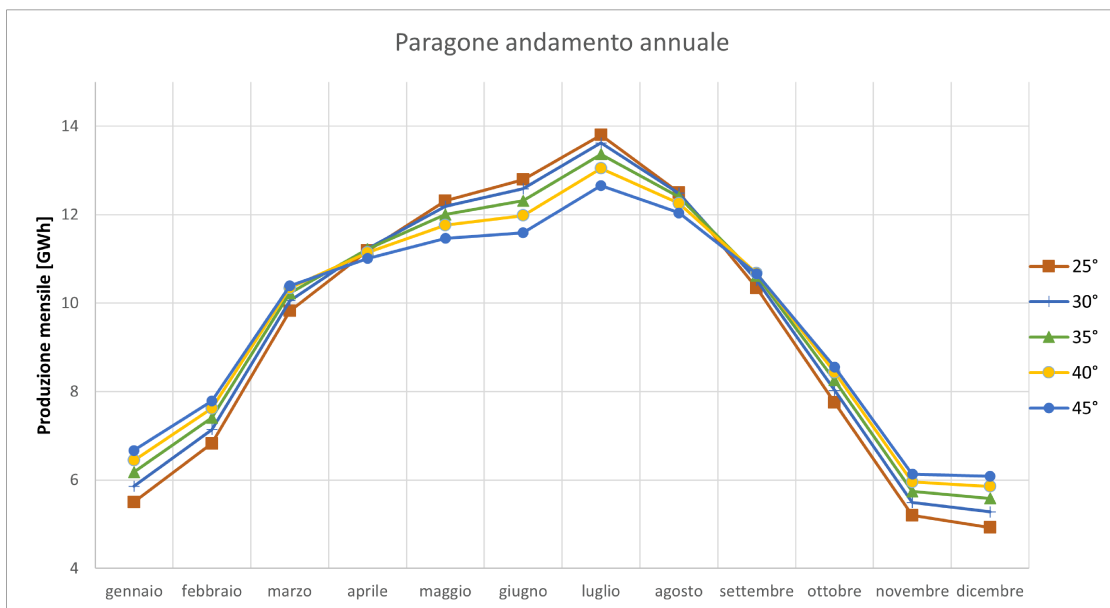


Figura 3.5: Dati ricavati dall'analisi di sensibilità

In fase di progettazione è possibile scegliere un differente obiettivo, per esempio raggiungere il massimo picco di produzione possibile, in quel caso l'inclinazione ottimale sarebbe differente. Tuttavia in questo caso di studio si considera ottima l'inclinazione che permette di massimizzare la produzione annua.

3.4 RISULTATI DELL'AMPLIAMENTO

Database	PVGIS-SARAH2
Tecnologia fotovoltaica	Crystalline Silicon
Perdite di sistema	14%
Efficienza η	17%
Inclinazione α	39°

Tabella 3.2: Tabella riassunti dei parametri usati e ricavati

Per prima cosa calcoliamo la metratura dei pannelli che sono attualmente installati e quelli che prevediamo per l'ampliamento. Per fare questo notiamo che la superficie reale di un pannello rispetto a quella misurata dalla verticale è maggiore, con semplici calcoli trigonometrici ricaviamo che:

$$A_{reale} = \frac{A_{piana}}{\cos(\alpha)} \quad (3.2)$$

Per stimare la produzione energetica, utilizziamo il tool PVGIS. Impostando l'inclinazione ottima ottenuta e lasciando invariati gli altri parametri, l'unico dato mancante è il kWp che è definito:

$$kWp = \frac{A \cdot \eta}{100} \quad (3.3)$$

Inserendo i valori del kWp attuale e previsto nel tool, si ottiene:

	Metratura "reale"	kWp	Produzione annua stimata
Attuale	471 339	80 127	107.5 [GWh]
Prevista	1 347 900	229 143	307.5 [GWh]

Tabella 3.3: Risultati delle elaborazioni

Si può notare il considerevole aumento della produzione che corrisponde a quasi 4 volte quella attuale, con una produzione complessiva di 415 GWh

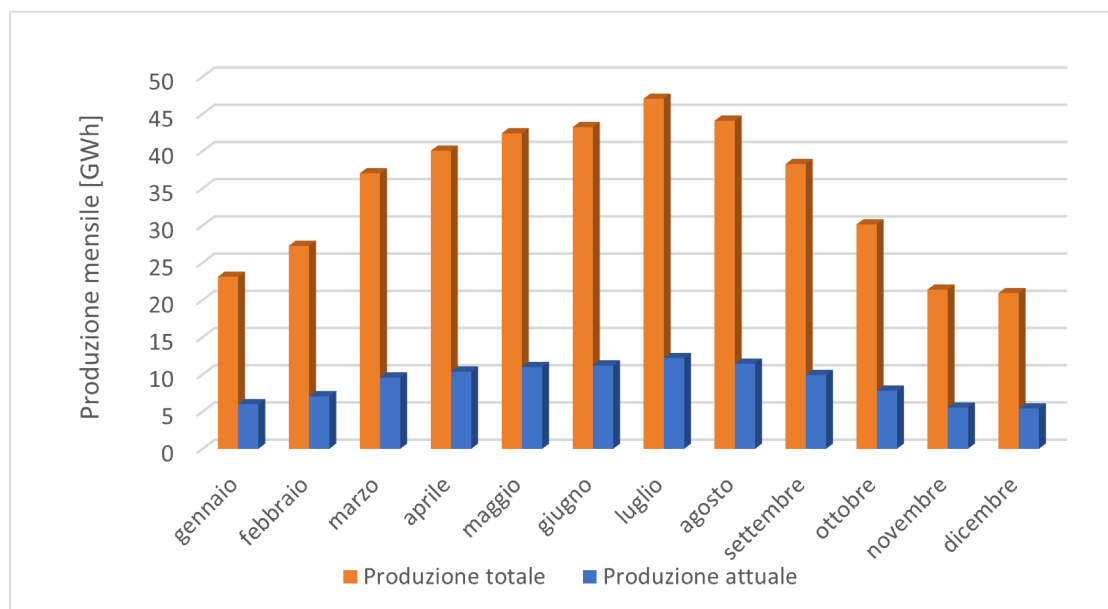


Figura 3.6: Paragone produzione attuale rispetto l'ampliamento

3.5 IMPLICAZIONI ECONOMICHE E AMBIENTALI

Utilizziamo la banca dati fornita da Terna per tradurre in dati comprensibili i risultati ottenuti adesso. Siano rispettivamente $5.022 \frac{KWh}{ab}$ il consumo medio di un italiano, definito come consumo totale italiano (comprensivo quindi anche dei consumi industriali) su numero di abitanti, e $1095 \frac{KWh}{ab}$ il consumo medio di un abitante solo ad uso domestico. Otteniamo quindi, nel primo caso, che 415 GWh possono soddisfare le necessità di 82.600 persone, mentre nel secondo caso addirittura 378.800. Considerando che il caso studio è limitato alla zona industriale di Padova, si può intuire quanto sia significativo questa porzione di energia, immaginando di riproporlo nelle molteplici piccole zone industriali italiane ci si può aspettare una produzione energetica considerevole. Tuttavia, oltre al problema che si presenterà tra 30 anni relativo allo smaltimento di tutti i pannelli giunti al termine della loro utilità, da tenere in considerazione nell'immediato, è il problema economico di installazione di questo massiccio quantitativo di risorse. Considerando che il costo medio di un impianto fotovoltaico varia tra i 3000 e i 5000 € per ogni 3 kWp installati, il costo per la realizzazione dell'espansione

fotovoltaica proposta è stimabile tra i 230 e i 400 milioni di €. Dal punto di vista ambientale, i vantaggi che derivano dall'utilizzo del fotovoltaico per produrre l'energia stimata sono considerevoli. Ricordando che l'energia prodotta è circa 415 GWh e che il potere calorifico di gas naturale e carbon fossile sono rispettivamente 30 e $45 \frac{MJ}{Kg}$ si può calcolare che per produrre la stessa quantità di energia, sfruttando le due citate fonti non rinnovabili caratterizzate da rendimenti del 35 e 60%, verrebbero bruciati 142000 Kg di carbon fossile o 55300 Kg di gas naturale, con conseguente rilascio in atmosfera di 373.5 Kg nel primo caso, o di 151.5 Kg CO_2 nel secondo caso.

4

Conclusione

In questa tesi è stata discussa l'importanza delle energie rinnovabili e il loro ruolo nella transizione energetica verso la neutralità climatica. Attraverso l'analisi condotta e le fonti citate si evince che la rilevanza di tali tecnologie sia da non sottovalutare rispetto ai combustibili fossili.

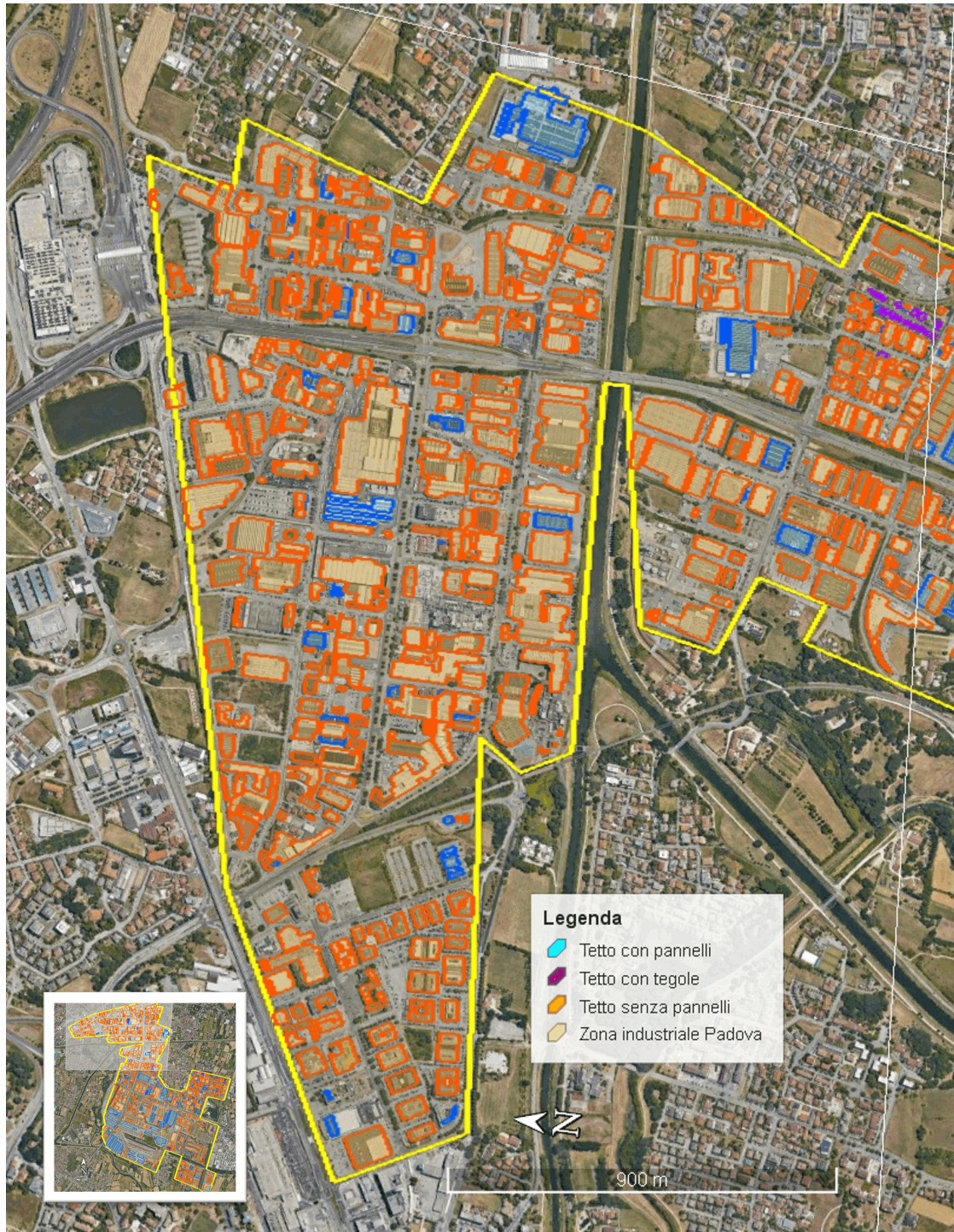
È stata presentata una soluzione di implementazione in area urbana di impianti fotovoltaici che sfrutta la superficie dei tetti a differenza dei campi fotovoltaici a terra, che sottraggono spazio e terreno ad altre attività. In particolare sembra promettente l'applicazione di questa soluzione nelle aree industriali in quanto non soggette a vincolo paesaggistico e caratterizzate tipicamente da grandi tetti piani. La presente ricerca ha scelto come caso di studio la zona industriale di Padova, con l'obiettivo di valutarne il potenziale fotovoltaico. Attraverso la mappatura dell'area e un'analisi statistica del rapporto tra tetti già dotati di pannelli solari e tetti inutilizzati, è stata esaminata la possibilità di espansione dei sistemi fotovoltaici. Al fine di massimizzare la produzione annua di energia, è stato determinato l'angolo ottimale di inclinazione dei pannelli. I risultati ottenuti indicano un significativo incremento della produzione energetica, con vantaggi rilevanti dal punto di vista ambientale.

È dunque evidente che le risorse rinnovabili rivestano un ruolo fondamentale nella transizione energetica e, una volta superate le sfide economiche, saranno in grado di contribuire in modo significativo alla riduzione delle emissioni. Fortunatamente, numerosi incentivi economici promossi dagli stati potrebbero facilitare questo processo, tuttavia, è necessaria una chiara volontà per promuovere il cambiamento. A titolo di esempio, considerando la numerosità delle

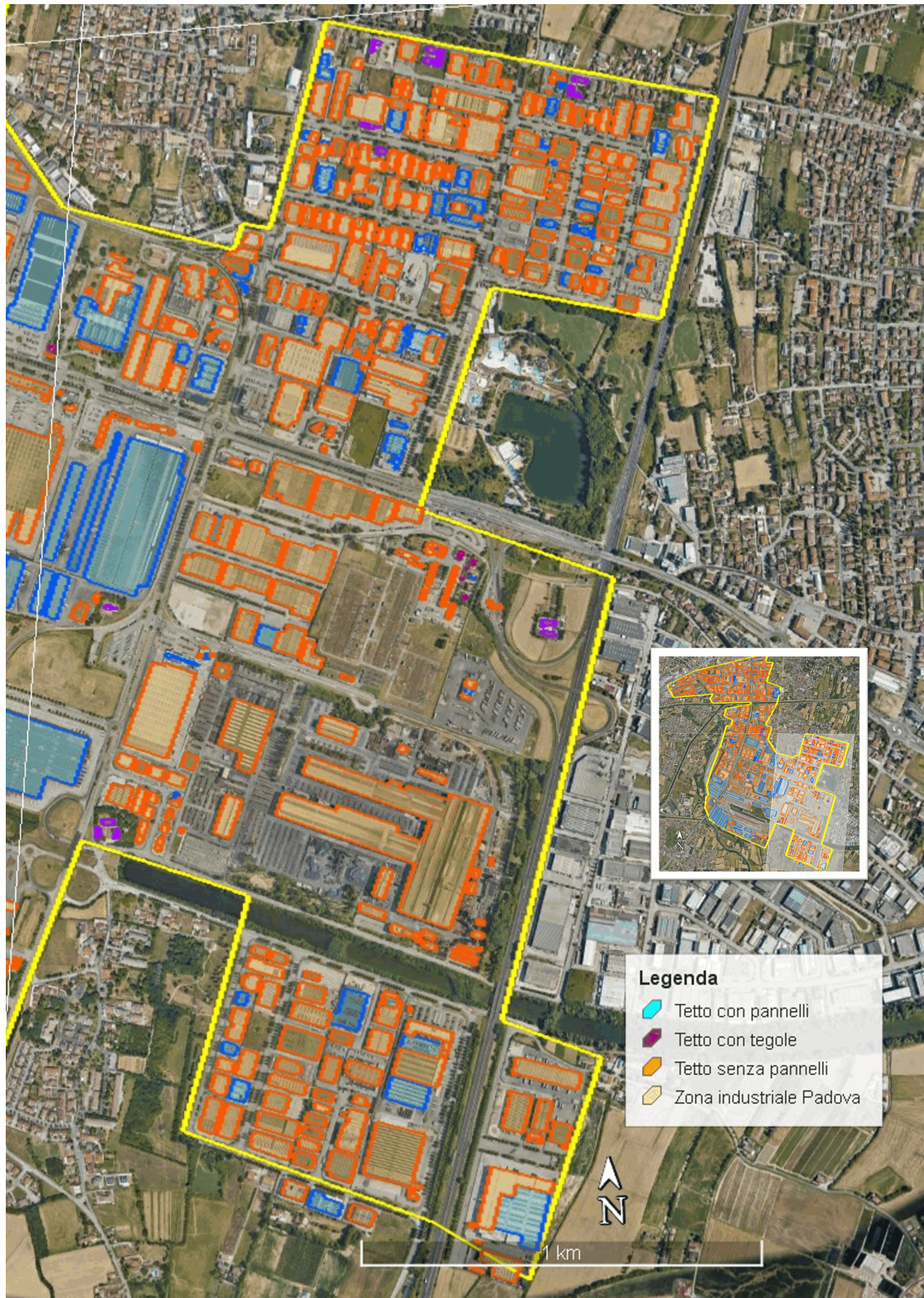
zone industriali presenti in Italia, se ciascuna provincia fosse in grado di produrre 400 GWh di energia fotovoltaica all'anno, la quota di energia proveniente da fonti rinnovabili aumenterebbe dal 26.5% al 41.4% della domanda energetica italiana. Si tratta di un'iniziativa di vasta portata che potrebbe essere cruciale per il raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni che ci siamo prefissati.



Appendice: Cartografie di Dettaglio







Bibliografia

- [1] Hannah Ritchie, Max Roser e Pablo Rosado. «Renewable Energy». In: Our World in Data (2020). <https://ourworldindata.org/renewable-energy>.
- [2] Dolf Gielen, Francisco Boshell, Deger Saygin, Morgan D. Bazilian, Nicholas Wagner e Ricardo Gorini. «The role of renewable energy in the global energy transformation». In: Energy Strategy Reviews (2019). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19300082>.
- [3] Mihaela Pacesila, Stefan Gabriel Burcea e Sofia Elena Cole-sca. «Analysis of renewable energies in European Union». In: Renewable and Sustainable Energy Reviews (2016). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115012319>.
- [4] TERNA S.p.A. Dati statistici sull'energia elettrica in italia 2022. 2023. <https://www.terna.it/it/sistema%20elettrico/statistiche/pubblicazioni-statistiche>.
- [5] Mohamad Abou Akrouch, Khaled Chahine, Jalal Faraj, Farouk Hachem, Cathy Castelain e Mahmoud Khaled. «Advancements in cooling techniques for enhanced efficiency of solar photovoltaic panels: A detailed comprehensive review and innovative classification». In: Energy and Built Environment (2023). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266612332300106X>.
- [6] Song Lv, Mingming Zhang, Yin Lai, Yangyang Wu, Jingcai Deng, Ying Guo, Mengqi Feng, Guoqing Shi, Bolong Zhang, Juwen Ren e Jiahao Yang. «Comparative analysis of photovoltaic thermoelectric systems using different photovoltaic cells». In: Applied Thermal Engineering (2023). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123013856>.

- [7] Maria Guerra Pellón. «Comparative Life Cycle Assessment of commercial photovoltaic technologies based on current conditions». In: *Archivo Digital Universidad Politecnica de Madrid (UPM)* (2017). https://oa.upm.es/49252/1/TFG_MARIA_GUERRA_PELLON.pdf.
- [8] Atul Sharma, Priyanka Mahajan e Rajesh Garg. «End-of-life solar photovoltaic panel waste management in India: forecasting and environmental impact assessment». In: *International Journal of Environmental Science and Technology* (2024). <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04953-2>.
- [9] Biao Li, Chen Lei, Wenpu Zhang, Victor Samuel Olawoore e Yong Shuai. «Numerical model study on influences of photovoltaic plants on local microclimate». In: *Renewable Energy* (2024). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148123014660>.
- [10] Katalin Bódis, Ioannis Kougias, Arnulf Jäger-Waldau, Nigel Taylor e Sándor Szabó. «A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2019). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119305179>.
- [11] Sergio Castellanos, Deborah A. Sunter e Daniel M. Kammen. «Rooftop solar photovoltaic potential in cities: how scalable are assessment approaches?» In: *IOP Publishing* (2017). <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa7857>.
- [12] Salvador Izquierdo, Carlos Montañés, César Dopazo e Norberto Fueyo. «Roof-top solar energy potential under performance-based building energy codes: The case of Spain». In: *Solar Energy* (2011). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X10003439>.
- [13] Tim N.C. de Vries, Joris Bronkhorst, Martijn Vermeer, Jaap C.B. Donker, Sven A. Briels, Hesam Ziar, Miro Zeman e Olindo Isabella. «A quick-scan method to assess photovoltaic rooftop potential based on aerial imagery and LiDAR». In: *Solar Energy* (2020). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20307672>.
- [14] Luca Bergamasco e Pietro Asinari. «Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy)». In: *Solar Energy* (2011). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11000752>.

- [15] Laura Romero Rodríguez, Eric Duminil, José Sánchez Ramos e Ursula Eicker. «Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach». In: *Solar Energy* (2017). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17301445>.
- [16] L.K. Wiginton, H.T. Nguyen e J.M. Pearce. «Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy». In: *Computers, Environment and Urban Systems* (2010). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971510000025>.
- [17] J. Alstan Jakubiec e Christoph F. Reinhart. «A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly Daysim simulations». In: *Solar Energy* (2013). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13001291>.
- [18] Rhythm Singh e Rangan Banerjee. «Estimation of rooftop solar photovoltaic potential of a city». In: *Solar Energy* (2015). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15001346>.
- [19] Al Gore. «The Digital Earth». In: *Australian Surveyor* (1998). <https://doi.org/10.1080/00050348.1998.10558728>.
- [20] European Commission Joint Research Centre. PVGIS background information. from 2001. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/pvgis-background-information_en#References.
- [21] ISPRA. Fattori di emissione atmosferica di CO₂ e altri gas a effetto serra nel settore elettrico. 2017. https://www.isprambiente.gov.it/files2017/pubblicazioni/rapporto/R_257_17.pdf.