RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

Avvio CER: Strumenti e metodi GIS-based per la pianificazione energetica a scala territoriale delle CER (LA1.6)

Guglielmina Mutani, Valerio Morando, Xuan Zhou, Mehran Tayefinasrabad, Ahvar Mohammad Hossein, Aleksandr Mishutin, Ahad Montazeri

Politecnico di Torino
1859
Dipartimento Energia "G.Ferraris"

RdS_PTR 22-24_PR1.7_LA1.6_321

Avvio CER: Strumenti e metodi GIS-based per la pianificazione energetica a scala territoriale delle CER

LA1.6 - Avvio CER: Strumenti e metodi GIS-based per la pianificazione energetica a scala territoriale delle CER

Autori: G. Mutani, V. Morando, X. Zhou, M. Tayefinasrabad, A. Montazeri

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 1.6

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Angelo Frascella, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Guglielmina Mutani, Dipartimento Energia, Politecnico di Torino

Mese inizio previsto: 10

Mese inizio effettivo: 10

Mese fine previsto: 32

Mese fine effettivo: 32

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione dal titolo: Studio e sviluppo di strumenti, processi e modelli a supporto delle comunità energetiche

Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte:
Fabio Duò, Lucrezia Bettas Begalin, Aida Shaneh, Prithvi Tanvi, Hassan Mohamed Hassan Elgendy, Chang Haici.

Indice

1 Risultati attesi 4
2 Risultati ottenuti 5
2.1 La raccolta e l'analisi dei dati in formato geografico (punti 1 e 2 sezione 1) 5
2.2 Caratteristiche delle principali tecnologie che sfruttano le risorse rinnovabili (punto 3 della sezione 1) 7
2.3 Costi dei vettori energetici in riferimento alle condizioni del mercato e al panorama di incentivi nazionali sulla produzione di energia da FER e sull'auto-consumo collettivo (punto 4 della sezione 1) 7
2.4 Progettazione dell'architettura della piattaforma e sviluppo di un prototipo con Web-GIS di supporto agli stakeholders territoriali (punto 5, sezione 1) 7
3 Prodotti attesi 8
4 Prodotti sviluppati 9
5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati 10
6 Sintesi delle attività svolte 11
7 Dettaglio delle attività svolte 12
7.1 Analisi dei consumi energetici e identificazione dei profili di consumo 12
7.2 Analisi della produzione attuale di energia da fonti energetiche rinnovabili 13
7.3 Analisi della disponibilità di risorse energetiche rinnovabili per scenari di producibilità futura 13
7.3.1 Solare 13
7.3.2 Vento 14
7.3.3 Biomassa 14
7.4 Analisi dei vincoli territoriali per la producibilità di energia da FER 14
7.5 Tecnologie per la produzione di energia da FER 15
7.6 Analisi della produzione potenziale di energia da fonti energetiche rinnovabili 15
7.7 Analisi sulla povertà energetica 16
7.8 Analisi dei risultati 17
8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte 24
9 Pubblicazioni scientifiche 25
10 Eventi di disseminazione 26

Indice delle figure

Figura 1 – Schema metodologico adottato per l'analisi di fattibilità degli scenari con le FER e le CER 5

Figura 2 – Rappresentazione dell'interfaccia del prototipo di geoportale per le FER e CER..... 9

Figura 3 – Distribuzione spaziale delle risorse energetiche rinnovabili disponibili 18

Figura 4 – Vincoli utilizzati per le fonti rinnovabili 18

Figura 5 – Valutazione dell'indice di auto-sufficienza SSI per i comuni e per gli scenari S0, S1.2, S2.2, S3.2, S4 e S6 23

Figura 6 – La povertà energetica attuale con lo scenario S0 (in rosso) e futura con lo scenario S6 (in verde). 23

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Banche-dati geografiche e non geografiche utilizzate 6

Tabella 2 – Vincoli analizzati per la valutazione delle FER disponibili e realizzazione delle CER 6

Tabella 3 – Indici e indicatori utilizzati per valutare gli scenari attuali e futuri.....19

Tabella 4 – Risultati di produzione, consumo, auto-consumo e auto-sufficienza degli scenari analizzati 20

Tabella 5 - Risultati di auto-consumo e auto-sufficienza degli scenari analizzati per le grandi città italiane 21

1 Risultati attesi

I risultati attesi da questa ricerca si possono elencare secondo i seguenti punti:

1. Analisi delle banche-dati place-based sulle risorse energetiche (dati geografici) disponibili a scala nazionale (regionale o locale): risorse energetiche rinnovabili (RES), vincoli di tipo tecnico, ambientale, economico e regolatorio (per il prelievo della risorsa e/o l'installazione di impianti).
2. Analisi delle banche-dati sui consumi e identificazione di profili di consumo (carichi elettrici, termici e frigoriferi delle utenze) in relazione alle tipologie di utenze energetiche (domestico, municipale, industriale-commerciale), al contesto ambientale (morfologia territoriale e zona climatica locale), del patrimonio costruito (es. destinazioni d'uso ed epoca di costruzione degli edifici) e delle caratteristiche socio-economiche della popolazione (es. caratteristiche demografiche, povertà energetica...). Nello specifico si predisporranno le seguenti banche-dati QGIS a scala nazionale: consumi di energia termica ed elettrica; Impianti esistenti e produzione di energia; RES disponibili; limiti e vincoli territoriali: tecnici, ambientali, economici, di governance e di tipo regolatorio.
3. Analisi delle caratteristiche tecnico-economiche delle principali tecnologie che sfruttano le FER (flessibilità, scalabilità, applicabilità, ...) in riferimento alla valutazione anche spaziale di ottemperanza ai requisiti minimi previsti dalle procedure di legge per accedere ai diversi incentivi.
4. Analisi dei costi dei vettori energetici in riferimento alle condizioni del mercato e al panorama di incentivi nazionali sulla produzione di energia da FER e sull'auto-consumo collettivo.
5. Progettazione dell'architettura della piattaforma e sviluppo di un prototipo con Web-GIS di supporto agli stakeholders per lo sviluppo delle comunità energetiche rinnovabili (CER). Le specifiche tecniche della piattaforma saranno realizzate secondo gli standard ENEA di interoperabilità di dati, dei servizi e delle informazioni.

2 Risultati ottenuti

I risultati di questa ricerca valutano la potenzialità di energia che può essere prodotta sfruttando le FER disponibili e la possibilità di scambiare energia attraverso la costituzione di comunità energetiche rinnovabili (CER), tenendo conto delle specifiche caratteristiche di ogni territorio in Italia. L'analisi è stata effettuata con l'accuratezza massima in relazione ai dati disponibili e i risultati sono poi stati aggregati a scala municipale, provinciale e regionale. Facendo riferimento ai risultati attesi, in questa sezione si riportano i risultati che sono stati effettivamente ottenuti.

In Figura 1 è stata rappresentata la metodologia utilizzata nell'analisi.

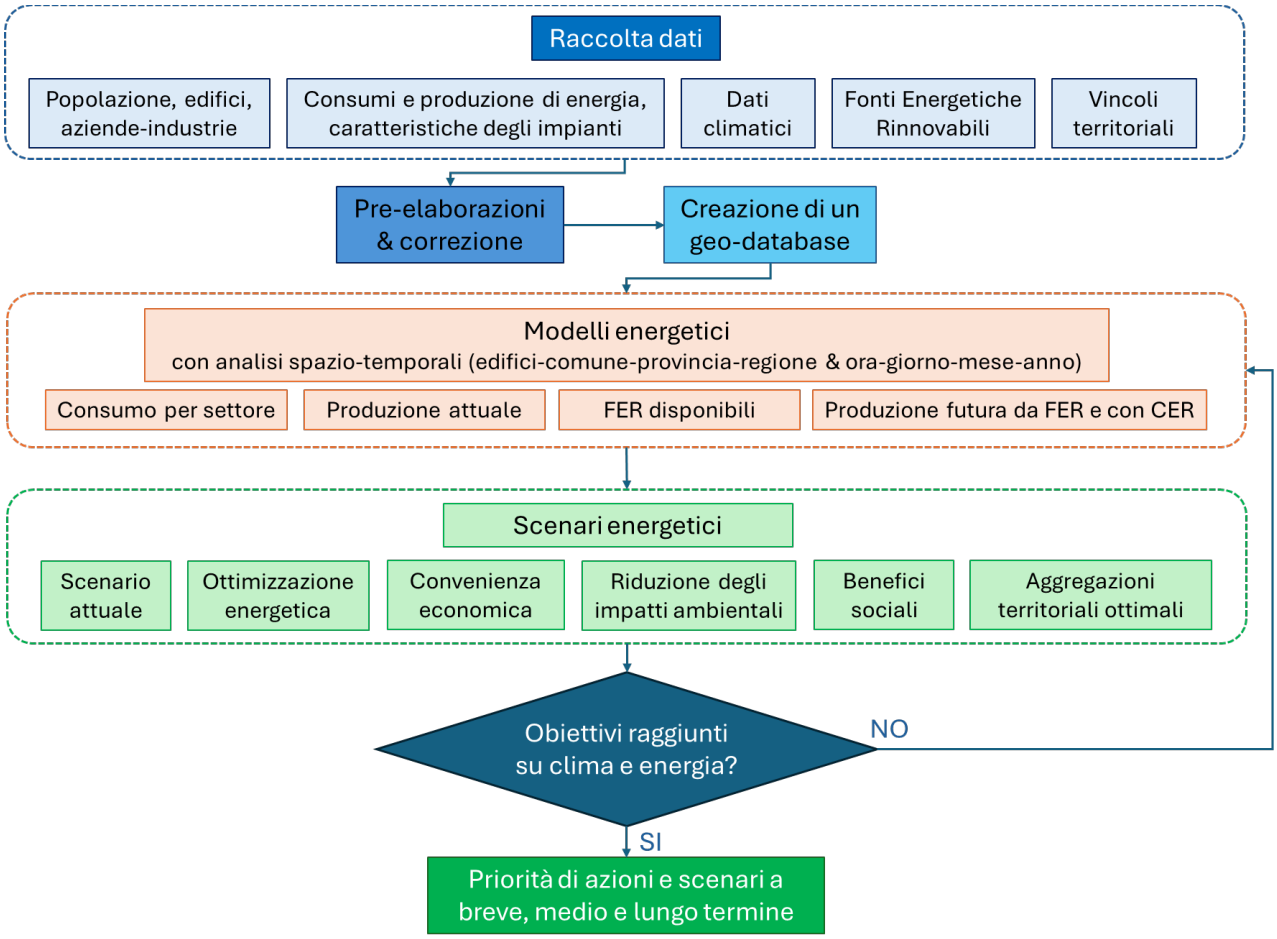


Figura 1 – Schema metodologico adottato per l'analisi di fattibilità degli scenari con le FER e le CER

2.1 La raccolta e l'analisi dei dati in formato geografico (punti 1 e 2 sezione 1)

I dati in formato geografico sulle risorse energetiche sono stati ricavati principalmente da geo-portali nazionali, regionali e locali, liberamente accessibili con licenza non restrittiva (es. CC-BY). L'utilizzo dei dati geografici è fondamentale per poter geo-localizzare le informazioni e caratterizzare dei territori. Le banche-dati sono state analizzate e pre-processate per poter utilizzare tutti i dati disponibili anche con un dettaglio spaziale e temporale diverso. Anche i

dati "non geografici" sono stati geo-localizzati e l'architettura del geo-portale prevede che tutti i dati potranno in futuro potranno essere facilmente aggiornati.

In tabella 1 sono state elencate le principali fonti utilizzate e nello specifico: le caratteristiche degli edifici e della popolazione, le risorse rinnovabili disponibili, i principali dati climatici e i vincoli territoriali.

In tabella 2 sono stati elencati i vincoli di tipo ambientale, tecnico, economico e di tipo regolatorio che sono stati considerati e che limitano l'utilizzo delle FER (per il prelievo della risorsa e/o per l'installazione di impianti).

Tabella 1 – Banche-dati geografiche e non geografiche utilizzate

Riferimento	Dato	Scala	Anno
Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA)	Consumi di energia mensili per settore	Provinciale	2022
	Profili orari di consumo del residenziale	Provinciale	2022
Copernicus	Corine Land Cover – Uso del suolo	Locale	2018
Ente Nazionale Meccanizzazione Agricola (ENAMA)	Progetto sulla biomassa	Nazionale	2010
Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'Energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA)	Atlante per l'Irradiazione Solare	Locale	2022
	Profili orari di consumo per settore	Nazionale	2018
Geoportale Nazionale	Corsi l'acqua - DB Prior 10k project	Locale	2007
	Incentivi per le configurazioni di autoconsumo	National	2024
	Vincoli territoriali ("vincoli in rete")	Locale	2024
Global Wind Atlas	Caratteristiche del vento – velocità, fattore di capacità, profilo orario	Locale	2019
Atlaimpianti, Gestore dei Servizi Energetici (GSE)	Profili di consumo per settore	Locale	2015
	Caratteristiche degli impianti/tecnologie rinnovabili	Locale	2021
	Rapporto statistico per le fonti rinnovabili e fotovoltaico – ore di utilizzo	Regionale	2021
	Rapporto statistico per il fotovoltaico – ore di utilizzo	Provinciale	2023
	Costo dell'energia (acquisto e vendita) per zona di mercato	Regionale	2024
Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA)	Aree a rischio alluvione, frana, ...	Locale	2020-21
	Vincoli territoriali - PITESAI	Locale	2024
	Rifiuti urbani	Locale	2023
	Misure di qualità dell'aria (NO_2, PM_{10}, …)	Nazionale	2022
Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT)	Atlante statistico dei comuni	Locale	2020
	Censimento della popolazione e delle abitazioni	Locale	2011-21
	Censimento dell'industria e dei servizi	Locale	2011
	Censimento generale dell'agricoltura	Locale	2010
Joint Research Centre (JRC)	PVGIS – Quota diffusa dell'irradiazione solare, irradianza e produzione di energia elettrica da fotovoltaico	Locale	2020
Meteotest	Fattore di Torbidità di Linke - Meteonorm	Locale	2019
Ricerca sul Sistema Energetico (RSE)	Caratteristiche del vento – Atlante nazionale del vento AEOLIAN	Locale	2019
Trasmissione Elettrica Rete Nazionale (TERNA)	Consumi di energia per settore	Provinciale	2015-22
	Profili di consumo per il settore secondario	Regionale	2022
Tinitaly	Digital Terrain Model - DTM 10 m e 20 m	Locale	2022
Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, la Scienza e la Cultura (UNESCO)	Vincoli territoriali dei siti UNESCO	Locale	2024

Tabella 2 – Vincoli analizzati per la valutazione delle FER disponibili e realizzazione delle CER

Vincolo	Descrizione
Ambientale	Aree naturali protette, siti Ramsar, Natura 2000 e IBA, aree con specie protette, aree con scarsa qualità dell'aria e problemi di inquinamento acustico.
e del Paesaggio	Siti UNESCO, aree del patrimonio culturale, centri storici, aree agricole non idonee, alto impatto visivo, aree vicine a parchi archeologici, aree costiere, aree vicine a laghi, fiumi, torrenti e loro rive, aree montane (sopra determinate altitudini), ghiacciai e circhi glaciali, parchi nazionali e regionali, foreste e boschi, aree con usi civici, vulcani, siti archeologici
Idrogeologico	Aree a rischio frana e alluvioni e di dissesto idrogeologico
Tecnico	Disponibilità e accessibilità delle risorse, disponibilità di spazio per gli impianti
Economico	Convenienza economica con e senza incentivi

2.2 Caratteristiche delle principali tecnologie che sfruttano le risorse rinnovabili (punto 3 della sezione 1)

Sono state individuate le tecnologie più utilizzate sul territorio italiano e le caratteristiche di conversione dell'energia attualizzate in modo da poter fare delle previsioni sul potenziale futuro di produzione dell'energia da FER. Le caratteristiche delle tecnologie sono state desunte dal sito di Atlaimpianti del GSE (https://www.gse.it/dati-e-scenari/atlaimpianti) che indica la tipologia di impianto e la potenza installata per tipologia di FER, con dati aggiornati al luglio 2021. Per i costi delle tecnologie si è fatto riferimento alla letteratura e ai costi di impianti già realizzati [1, 2, 3, 4, 5].

2.3 Costi dei vettori energetici in riferimento alle condizioni del mercato e al panorama di incentivi nazionali sulla produzione di energia da FER e sull'auto-consumo collettivo (punto 4 della sezione 1)

I costi dei vettori energetici sono stati aggiornati facendo riferimento alle informazioni disponibili più aggiornate per il fabbisogno, il prelievo e l'immissione dell'energia. In particolare, le principali fonti analizzate sono ARERA e GSE:

- https://www.arera.it/it/dati/eep35.htm
- https://www.arera.it/dati-e-statistiche
- https://www.gse.it/servizi-per-te/fotovoltaico/ritiro-dedicato/documenti
- https://www.gse.it/servizi-per-te/fonti-rinnovabili/gestione-incentivi/fer-elettriche.

Per gli incentivi delle CER si è fatto riferimento al Decreto CACER (in vigore dal 24/1/2024) che ha definito i nuovi incentivi per promuovere lo scambio di energia tra membri delle comunità energetiche, dei gruppi di auto-consumatori e per l'auto-consumatore a distanza:

- https://www.gse.it/servizi-per-te/autoconsumo/gruppi-di-autoconsumatori-e-comunita-di-energia-rinnovabile/corrispettivi-e-tariffa .

2.4 Progettazione dell'architettura della piattaforma e sviluppo di un prototipo con Web-GIS di supporto agli stakeholders territoriali (punto 5, sezione 1)

È stato progettato un prototipo di portale Web-GIS per analizzare la produzione, il consumo e lo scambio di energia su diverse scale geografiche e in vari scenari. Sono stati utilizzati due software, QGIS e Looker Studio, per esplorare e condividere informazioni in tempo reale.

L'interfaccia del portale realizzata consente di gestire mappe interattive, grafici e menu "a tendina" (o elenchi a discesa) per fornire a diversi stakeholder informazioni per la pianificazione delle energie rinnovabili e delle CER nei diversi comuni, province e regioni. L'interfaccia è stata studiata come strumento a supporto delle decisioni per esplorare e confrontare i dati energetici nelle regioni, province e comuni in Italia.

---

[1] "Towards energy self-consumption and self-sufficiency in urban energy communities", Todeschi V., Marocco P., Mutani G., Lanzini A., Santarelli M., IJHT 39:1, 2021, pp. 1-11, https://doi.org/10.18280/ijht.390101

[2] "Optimization of Costs and Self-Sufficiency for Roof Integrated Photovoltaic Technologies on Residential Buildings", G. Mutani, V. Todeschi, Energies 14 (13), 4018, pp. 1-25, 2021, https://doi.org/10.3390/en14134018

[3] "Advantages of coupling a woody biomass cogeneration plant with a district heating network for a sustainable built environment: a case study in Luserna San Giovanni (Torino, Italy)", C. Delmastro, G. Mutani, L. Schranz, Energy Procedia 78, 2015, Pages 794-799, https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.102

[4] "An Italian Geoportal for Renewable Energy Communities", G Mutani, V Morando, X Zhou, M Tayefinasrabad, A Tundo, December 2024, JSE 3(4):244-264, https://doi.org/10.56578/jse030404

[5] https://atlanteeolico.rse-web.it/html/help/help-terria-calcolo-EN.html

3 Prodotti attesi

Il prodotto di questa linea di attività è questo rapporto tecnico descrittivo della ricerca e dei risultati ottenuti accompagnato da strumenti operativi che rappresentano un punto di partenza per la realizzazione di uno strumento di pianificazione energetica per il territorio italiano e per l'identificazione delle aree più idonee per le comunità delle comunità energetiche.

4 Prodotti sviluppati

I prodotti di questa linea di attività sono presentati in questo rapporto tecnico dal titolo "Strumenti e metodi GIS-based per la pianificazione energetica a scala territoriale delle CER" e sono accompagnati da dei primi database geografici che rappresentano i profili orari medi mensili dei consumi e della produzione e producibilità di energia da fonti rinnovabili a scala municipale. Inoltre, è possibile valutare la possibilità dello scambio di energia all'interno di ogni comune.

Infine, è stato sviluppato un prototipo di portale sulle fonti energetiche rinnovabili e CER che si basa sui database geografici realizzati per questa ricerca.

I database geografici sono stati realizzati attraverso delle elaborazioni con il software QGIS, mentre per creare il prototipo di piattaforma è stato utilizzato il software Looker Studio.

A questo link è possibile utilizzare il prototipo della piattaforma sulle fonti energetiche rinnovabili e le CER: https://lookerstudio.google.com/reporting/89b10f39-b80c-4548-ae84-3211d8aa1ea0 .

In Figura 2 è rappresentata l'interfaccia della piattaforma che è costituita da tre moduli principali:

- un modulo che descrive la disponibilità delle risorse rinnovabili dalla scala nazionale alla scala locale,
- un secondo modulo che confronta la produzione (dalle diverse FER) con il consumo (per settore economico) di energia anche attraverso dei grafici; e
- l'ultimo modulo in cui vengono descritti cinque scenari futuri sulla produzione e scambio di energia sfruttando le FER.

In questa fase si è scelto di utilizzare la lingua inglese in modo da poter avere un maggior numero di accessi e quindi feedback. La piattaforma è stata utilizzata dagli studenti del Politecnico di Torino nell'ambito di corsi, tirocini e tesi.

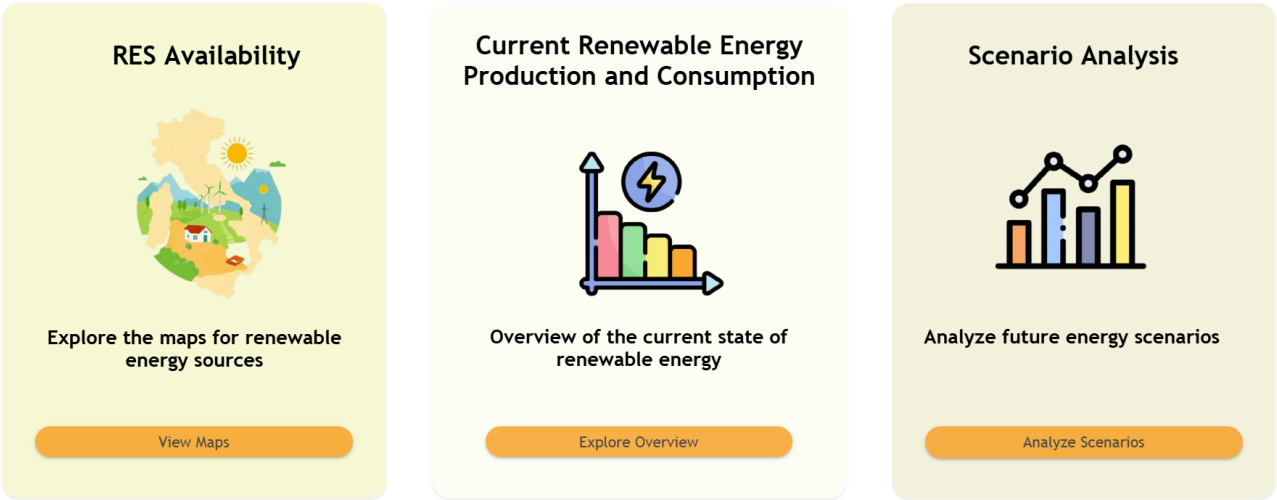


Figura 2 – Rappresentazione dell'interfaccia del prototipo di geoportale per le FER e CER

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Rispetto al programma non ci sono stati scostamenti tecnici/economici rispetto al preventivo.

6 Sintesi delle attività svolte

Il lavoro, realizzato grazie all'adozione di una metodologia place-based e ad un ampio ricorso ai Sistemi Informativi Geografici (GIS), è stato articolato in quattro fasi principali.

La prima fase ha previsto la raccolta dei dati che ha costituito il punto di partenza fondamentale per tutte le analisi successive e che hanno permesso di caratterizzare il territorio italiano sotto molteplici punti di vista (energetico, ambientale, economico, sociale e di tipo regolatorio).

La seconda fase ha previsto la creazione dei modelli necessari per la definizione dei profili di consumo, di produzione e di producibilità di energia. I profili sono stati definiti tenendo in considerazione le diverse scale spaziali (comunale, provinciale, regionale e nazionale) e temporali (oraria, giornaliera, mensile e annua).

La terza fase è quella che ha previsto l'analisi integrata dei risultati ottenuti nelle fasi precedenti e la formulazione di scenari futuri utili a valutare l'impatto che il ricorso alle fonti energetiche rinnovabili e alla realizzazione di comunità energetiche rinnovabili potrebbe avere da un punto di vista energetico, economico, ambientale e sociale.

Infine, l'ultima fase ha riguardato lo sviluppo di un prototipo di piattaforma a supporto delle decisioni per enti pubblici, privati e cittadini.

7 Dettaglio delle attività svolte

In questo paragrafo vengono descritte le metodologie di analisi utilizzate e i risultati ottenuti.

7.1 Analisi dei consumi energetici e identificazione dei profili di consumo

L'analisi dei consumi è stata condotta con l'obiettivo di definire i profili di consumo di energia elettrica degli utenti alla scala comunale a partire dai dati prodotti dall'Ufficio Statistico di Terna, dall'ARERA e da ISTAT. Nello specifico, si è fatto ricorso al Rapporto Statistico sui consumi pubblicato da Terna nel 2022 [6] contenente i dati sui consumi annuali a scala provinciale suddivisi per settore di utilizzazione (settore domestico, settore primario, settore secondario, settore terziario [7]) e ai dati relativi ai consumi di energia elettrica alla scala comunale pubblicati dal GSE nel 2015 [8].

Per la determinazione dei consumi di energia elettrica per settore e a scala comunale è stato utilizzato un modello statistico di regressione lineare multipla. Tale operazione è stata effettuata individuando le variabili più correlate ai consumi di energia elettrica e, successivamente, descrivendo l'associazione tra queste e i consumi con una regressione lineare multipla. Il modello adottato è stato considerato "statisticamente significativo" verificando i coefficienti di determinazione, l'indipendenza tra le variabili e attraverso l'analisi dei residui [9].

I profili di consumo di energia elettrica per gli utenti domestici sono stati definiti sulla base dei dati relativi al prelievo medio mensile e al prelievo medio orario dei clienti domestici alla scala regionale e a quella provinciale per l'anno 2022 pubblicati da ARERA [10]. Per la definizione del profilo orario di consumo medio del cliente non domestico, invece, sono state impiegate le informazioni contenute nei report tecnici del GSE [11], Terna [12] ed ENEA [13].

Per quanto riguarda invece i profili di consumo dell'energia per il riscaldamento, la produzione di acqua calda e il raffrescamento degli edifici sono stati utilizzati i profili tipici degli edifici dei diversi settori. La letteratura fornisce i profili tipici degli edifici residenziali e non residenziali in funzione delle caratteristiche specifiche degli edifici [14,15,16,17] (es. epoca di costruzione e

---

[6] https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/pubblicazioni-statistiche#:~:text=il%20termoelettrico%20ha%20registrato%20un,63%2C2%20GW%20del%202023

[7] Il settore primario comprende l'agricoltura e l'attività estrattiva, quello secondario è il settore dell'industria e quello terziario considera i servizi

[8] GeoDB ETA, RSE https://dbeta.rse-web.it/?language=IT&tiputente=1

[9] "Statistical data analysis for energy communities", G. Mutani, S. Santantonio, A. Tartaglia, TI-IJES 64(2-4), 2020, pp. 385-397, https://doi.org/10.18280/ti-ijes.642-438; "Statistical GIS-based analysis of energy consumption for residential buildings in Turin (IT)", Mutani G., Fontana R., Barreto A., IEEE CANDO EPE 2019, pp 179-184, ISBN: 978-1-7281-4358-3, https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE47959.2019.9111035

[10] https://www.arera.it/dati-e-statistiche/dettaglio/analisi-dei-consumi-dei-clienti-domestici

[11] https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Servizi%20per%20te/AUTOCONSUMO/Gruppi%20di%20autoconsumatori%20e%20comunita%20di%20energia%20rinnovabile/Regole%20e%20procedure/Autoconsumatori.pdf

[12] https://dati.terna.it/fabbisogno/imcei#imcei-vs-ipi

[13] https://www.ricercasistemaelettrico.enea.it/archivio-documenti.html?task=download.send&id=3811:ottimizzazione-economico-exergetica-delle-prestazioni-di-reti-energetiche-distribuite-su-scala-distrettuale-applicazione-ad-un-caso-studio-reale&catid=131

[14] "Urban Building Energy Modeling: A Comparative Study of Process-driven and Data-driven Models", A. Montazeri, Y. Usta, G. Mutani, MMEP 11(10), 2024, https://doi.org/10.18280/mmep.111003

[15] "Statistical Building Energy Model from Data Collection, Place-Based Assessment to Sustainable Scenarios for the City of Milan", G. Mutani, M. Alehasin, Y. Usta, F. Fiermonte, A. Mariano, Sustainability 15, 14921, 2023, https://doi.org/10.3390/su152014921

[16] "Urban-Scale energy models: the relationship between cooling energy demand and urban form", Mutani G., Todeschi V., Santantonio S., 2022, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2177:012016, https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1742-6596/2177/1/012016

[17] "Spatial energy modelling for the Metropolitan City of Rome", G. Mutani, E. Fabiano, D. Astiaso Garcia, F. Mancini, 2021 IEEE CANDO-EPE, pp. 43-48, https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667932

geometria), del clima (es. gradi-giorno di riscaldamento e di raffrescamento [18]) e attraverso le banche-dati degli attestati di prestazione energetica [19,20].

7.2 Analisi della produzione attuale di energia da fonti energetiche rinnovabili

L'analisi della produzione attuale di energia elettrica da fonti energetiche rinnovabili è stata condotta sulla base dei dati forniti dal Gestore dei Servizi Energetici (GSE) relativi alla potenza installata, alle ore di utilizzazione e alla produzione di energia elettrica degli impianti di generazione da fonte idraulica, solare (con tecnologia fotovoltaica), eolica, geotermica e da bioenergie (biomasse solide, frazione biodegradabile dei rifiuti, biogas, bioliquidi).

La produzione attuale di energia elettrica (kWh) è stata calcolata sulla base della potenza nominale installata (kW) per ciascuna tipologia di impianto e sulla base delle ore di utilizzazione (h) per ogni FER. Per la determinazione del numero di impianti attivi e della relativa potenza nominale sono state utilizzate le informazioni contenute nel portale Atlaimpianti per ogni comune italiano. Per l'individuazione delle ore di utilizzazione, invece, sono stati utilizzati i dati contenuti nei Rapporti Statistici "Energia da fonti rinnovabili in Italia" pubblicati dal GSE [21](si è fatto riferimento all'anno 2021, coerentemente all'aggiornamento del portale Atlaimpianti). Le ore di utilizzazione sono anche state individuate per ogni fonte rinnovabile a scala regionale nota la produzione di energia elettrica (kWh) e la potenza installata (kW). Solo per gli impianti fotovoltaici le ore di utilizzazione sono a scala provinciale grazie alle informazioni contenute nel Rapporto Statistico "Solare Fotovoltaico" del GSE. Definito il numero di ore di utilizzazione per ciascuna tipologia di impianto nelle diverse regioni d'Italia si è proceduto con il calcolo della produzione di energia elettrica generata alla scala comunale, nonché alla determinazione dei relativi profili orari, giornalieri e mensili di produzione.

7.3 Analisi della disponibilità di risorse energetiche rinnovabili per scenari di producibilità futura

Al fine di valutare la producibilità di energia elettrica da FER è stata effettuata una ricognizione delle risorse energetiche rinnovabili disponibili.

7.3.1 Solare

Per la risorsa solare, in questo lavoro si considerano solo tecnologie integrate sui tetti degli edifici e quindi questa analisi è stata effettuata su ogni edificio, considerandone la destinazione d'uso, la dimensione e l'orientamento [22]. Per determinare l'irradiazione solare, il territorio italiano è stato suddiviso nelle venti regioni e, all'interno di ogni regione, distinguendo le aree costiere, pianeggianti, collinari e montane (in base all'altitudine).

Sulla base di questa classificazione sono stati stimati i dati orari di irradiazione solare considerando l'orografia del territorio (attraverso il Digital Terrain Model DTM 20 m x 20 m), la forma degli edifici, i valori specifici mensili delle componenti solari, con il rapporto tra

---

[18] UNI 10349-3:2016 Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici

[19] "GIS-based urban energy modelling and energy efficiency scenarios using the energy performance certificate database", Guglielmina Mutani, Valeria Todeschi, Energy Efficiency, volume 14, Article number: 47 (2021) Springer Ed., pp. 1-28, https://doi.org/10.1007/s12053-021-09962-z

[20] "Place-based Atlas for Energy Communities using Energy Performance Certificates Database", G. Mutani, S. Beltramino, M. Schiavone, IEEE Cando Conference 2020, pp. 179-184, https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE51100.2020.9337766

[21] https://www.gse.it/dati-e-scenari/statistiche

[22] "Roof-integrated green technologies, energy saving and outdoor thermal comfort: insights from a case study in urban environment", Mutani G., Todeschi V., IJSDP 16(1), 2021, pp. 13-23, https://doi.org/10.18280/ijsdp.160102

irradiazione diffusa e globale (D/G), e il tipo di atmosfera, attraverso il fattore di torbidità di Linke (TL) e la trasmissività. L'irradiazione solare oraria è stata stimata utilizzando gli strumenti QGIS "*Area solar radiation*" e "*r.sun insoltime*" per i dodici giorni tipici mensili.

7.3.2 Vento

Per determinare i profili di velocità del vento sono state impiegate le informazioni reperite tramite l'Atlante del Vento Italiano (AEOLIAN) sviluppato da RSE, che fornisce i dati sul vento con una risoluzione di 1,4 km. Per l'analisi, sono state utilizzate le serie storiche orarie (1990 - 2019) relative alla velocità del vento (m/s) e alla direzione (dal 2015), sia on-shore, sia off-shore. I dati orari dei dodici giorni tipici mensili sono stati raccolti tenendo in considerazione la suddivisione del territorio in aree costiere, pianeggianti, collinari e montane per ciascuna regione.

7.3.3 Biomassa

Per l'analisi della disponibilità di biomassa sono state considerate tre diverse tipologie di biomassa: forestale, agricola e da rifiuti. Per la biomassa forestale e agricola, le informazioni riguardanti le categorie forestali e le colture agricole sono state ottenute attraverso la copertura e l'uso del suolo forniti dall'ultimo aggiornamento del Corine Land Cover (CLC) pubblicato nel 2018 [23]. Le informazioni sulla disponibilità di rifiuti sono state raccolte dal Registro Nazionale dei Rifiuti dell'ISPRA, contenente le quantità di rifiuti a livello municipale nel 2022 [24]. Le categorie di rifiuti idonee per la produzione di energia sono state identificate considerando la loro frazione di riutilizzo, quella rinnovabile e il potere calorifico inferiore [25,26].

7.4 Analisi dei vincoli territoriali per la producibilità di energia da FER

L'analisi dei vincoli vigenti all'installazione degli impianti alimentati da risorse energetiche rinnovabili o al prelievo delle stesse è stata condotta principalmente alla luce dei contenuti del Decreto Ministeriale 20 giugno 2024 che stabilisce principi e criteri omogenei per l'individuazione delle aree idonee e non idonee per l'installazione di impianti a fonti rinnovabili. In assenza della zonizzazione elaborata dalle Regioni (il processo di individuazione delle aree è in corso), si è proceduto indicando come "aree e siti non idonei all'installazione degli impianti" le aree particolarmente sensibili e/o vulnerabili alle trasformazioni territoriali o del paesaggio, già elencate nell'Allegato 3 del Decreto Ministeriale 10 settembre 2010. Da questo elenco si possono desumere tre principali tipologie di vincoli: vincoli paesaggistici, vincoli ambientali e vincoli idrogeologici.

I vincoli paesaggistici sono volti alla tutela del paesaggio e del patrimonio storico-culturale e includono, ad esempio, i siti inseriti nella lista del patrimonio mondiale dell'UNESCO e le aree, gli immobili ed i beni di notevole interesse culturale e storico.

I vincoli ambientali sono volti alla tutela e alla conservazione dell'ecosistema naturale e della biodiversità. Rientrano in questa categoria, ad esempio, le aree naturali protette istituite ai sensi della Legge n. 394/1991, le aree incluse nella Rete Natura 2000 e le aree tutelate dalle Convenzioni Internazionali. Inoltre, bisogna tener conto dell'inquinamento dell'aria (es. per l'uso

[23] https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018
[24] https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti
[25] "Assessment of potential energy producible from agricultural biomass in the municipalities of the Novara plain", I. Carlucci, G. Mutani, M. Martino, 4th ICRERA-2015, pp 1394-1398, https://doi.org/10.1109/ICRERA.2015.7418636
[26] "A Clean Energy Atlas for Energy Communities in Piedmont Region (Italy)", G. Mutani, S. Beltramino, A. Forte, IJDNE 15(3), 2020, pp. 343-353, https://doi.org/10.18280/ijdne.150308

della biomassa) e dell'inquinamento acustico (es. per l'uso degli aerogeneratori o generatori eolici) che possono causare gli impianti per la produzione di energia.

I vincoli idrogeologici sono volti alla tutela di quelle aree caratterizzate da situazioni di dissesto e/o rischio idrogeologico perimetrate nei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) adottati dalle competenti Autorità di Bacino ai sensi del D.L. n. 180/1998.

Oltre a queste tre tipologie di vincoli sono stati considerati anche i vincoli:

- tecnici, relativi agli aspetti che influenzano gli effettivi approvvigionamenti delle FER o installazioni degli impianti,
- economici, relativi alla convenienza economico-finanziaria sui nuovi impianti e sulla produzione-scambio-vendita di energia elettrica da FER e
- di governance, relativi alla presenza di enti pubblici o privati che possano facilitare la produzione da FER e l'istituzione delle CER (es. oil free zone, comunità-unioni montane).

7.5 Tecnologie per la produzione di energia da FER

Le tecnologie considerate per la produzione di energia da FER sono quelle più utilizzate in Italia. Sono state utilizzate le informazioni del tool del GSE "Atlaimpianti" e si è considerata l'ipotesi di una produzione distribuita di energia da FER con piccoli impianti (impianti fotovoltaici con una potenza di 4.5-20 kW, impianti eolici da 100-2000 kW e impianti a biomassa da 500-1500 kW). In questa analisi non sono stati considerati i sistemi di accumulo.

Anche per i coefficienti di conversione dell'energia (o efficienze) sono state utilizzate le informazioni sulle tecnologie più recenti in modo da poterle utilizzare negli scenari futuri.

Per gli impianti fotovoltaici è stato considerato un pannello in Silicio monocristallino con una potenza di circa 450 W, un'efficienza del 23% e un costo variabile in funzione della potenza installata. Questa analisi è stata effettuata su ogni tetto degli edifici e considerando solo l'area più esposta all'irradiazione solare.

Per gli impianti a biomassa solida (agricola e forestale) sono stati considerati impianti cogenerativi (o Combined Heat Power CHP) per la produzione combinata di energia elettrica e termica ad alta efficienza. Sono stati considerati due piccoli impianti (<1 MW) che consentono di avere anche bassi costi di gestione e un'efficienza di conversione sull'elettrico del 20% circa.

Per gli impianti eolici, sono stati selezionati due aerogeneratori ad asse orizzontale con potenza nominale di 850 e 2000 kW che funzionano con velocità del vento di circa 4-15 m/s.

7.6 Analisi della produzione potenziale di energia da fonti energetiche rinnovabili

Per l'analisi della produzione potenziale di energia elettrica da FER sono stati impiegati tre modelli atti a valutare il potenziale di ciascun comune sulla base della specifica disponibilità di risorse, della tipologia di tecnologie impiegate e dei vincoli esistenti.

Per l'analisi del potenziale fotovoltaico è stato utilizzato un modello che, a partire dai dati sull'irradiazione solare, permette di stimare la producibilità di energia elettrica per ciascun edificio presente sul territorio. Ai fini dello studio, infatti, è stata presa in considerazione esclusivamente l'integrazione dei pannelli fotovoltaici sul tetto degli edifici, considerando solo le superfici ben esposte e senza ostruzioni. L'energia producibile è stata quindi stimata in funzione dell'irradiazione solare e delle caratteristiche specifiche degli edifici considerandone

la destinazione d'uso (posizione geografica, superficie disponibile e orientamento delle falde del tetto). Per la determinazione dei profili orari di producibilità sono state impiegate le informazioni relative alla radiazione solare presenti sul portale Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Per ciascuna regione e area geografica si è proceduto con l'individuazione del giorno tipo mensile [27] da utilizzare come riferimento per la definizione del profilo orario di produzione.

Per la valutazione del potenziale eolico è stato utilizzato un modello che, a partire dai dati relativi alle caratteristiche del vento e quelli relativi alle caratteristiche tecniche degli aerogeneratori impiegati, permette di stimare la producibilità di energia elettrica nei diversi comuni italiani, tenendo conto delle specificità geografiche e climatiche di ognuno di essi. La producibilità di energia elettrica tramite l'impiego di aerogeneratori è stata stimata in funzione di una serie di parametri, tra cui la velocità e la direzione del vento, la densità dell'aria e le caratteristiche tecniche della turbina eolica. Sulla base dei dati orari relativi alla velocità del vento è stato possibile calcolare la producibilità oraria e, a partire da questa, si è proceduto con la determinazione della producibilità giornaliera, mensile e annua per ciascuna località individuata. Dalla producibilità di energia elettrica per singolo aerogeneratore, è stata calcolata la producibilità di energia elettrica a scala comunale in funzione del numero massimo di aerogeneratori che è possibile installare in ciascun comune tenendo in considerazione i vincoli esistenti.

Per la valutazione dell'energia producibile tramite l'impiego della biomassa sono stati utilizzati tre modelli differenti, uno per ciascuna tipologia di biomassa considerata: forestale, agricola e da rifiuti. Per i primi due modelli si è proceduto con l'individuazione delle aree agricole e boscate e delle relative aree agricole accessibili in funzione delle caratteristiche del territorio; successivamente, è stata calcolata la quantità di sostanza secca che ogni anno è possibile prelevare per la produzione di energia elettrica, in funzione delle caratteristiche specifiche delle categorie forestali e delle colture agricole considerate. Nota la quantità di sostanza secca si è proceduto con la determinazione dell'energia elettrica producibile in funzione del potere calorifico inferiore della biomassa e delle caratteristiche dell'impianto. Il procedimento per la determinazione della quantità di energia elettrica producibile tramite l'impiego dei rifiuti è analogo a quanto introdotto precedentemente, ad eccezione del fatto che il quantitativo di sostanza secca è anche stato determinato in funzione della frazione rinnovabile propria di ciascuna categoria di rifiuti.

7.7 Analisi sulla povertà energetica

L'Osservatorio Italiano sulla Povertà Energetica (OIPE) ha pubblicato una stima della povertà energetica in Italia nel 2023 [28]. L'indicatore utilizzato per la povertà energetica LIHC (Low Income-High Costs LIHC) si basa sul concetto di famiglia a basso reddito ma con elevata spesa. La valutazione della povertà energetica con l'indicatore LIHC si basa sulla verifica di due condizioni: la spesa energetica al di sopra del valore mediano nazionale e un reddito, al netto della spesa energetica, tale da collocare la famiglia al di sotto della soglia di povertà nazionale [29].

---

[27] Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind, J. A. Duffie, W. A. Beckman, John Wiley & Sons Inc Editor, 2020, ISBN-13978-1119540281

[28] https://oipeosservatorio.it/en/energy-poverty/, https://oipeosservatorio.it/wp-content/uploads/2024/03/rapporto_2023_IT.pdf

[29] https://documenti.camera.it/leg19/dossier/pdf/AP0151.pdf, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:At-risk-of-poverty_rate

7.8 Analisi dei risultati

L'obiettivo di questo lavoro era valutare la potenzialità dei territori per la produzione di energia da fonti rinnovabili e per la realizzazione di comunità energetiche rinnovabili. Gli scenari che sono stati valutati sono:

- Scenario attuale considerando la produzione di energia da fonti rinnovabili e che sarà utilizzato come base per gli scenari futuri: **S0**
- Scenari futuri che sfruttano la tecnologia fotovoltaica installata sui tetti degli edifici: **S1.1** escludendo i tetti dei centri storici e **S1.2** escludendo anche i vincoli culturali e le aree protette
- Scenari futuri che sfruttano la tecnologia eolica: **S2.1** con turbine eoliche da 850 kW e **S2.2** con potenza nominale da 2000 kW
- Scenari futuri che sfruttano la biomassa forestale, agricola e da rifiuti: **S3.1** escludendo i comuni con problemi di qualità dell'aria e **S3.2** considerando tutti i comuni;
- Scenari futuri con le comunità energetiche rinnovabili **CER**:

  S4 solo gli edifici residenziali sono prosumers; producono energia con pannelli fotovoltaici integrati sui tetti degli edifici e scambiano l'extra-produzione di energia con gli altri utenti dei settori primario, secondario e terziario e

  S5 si considerano solo gli edifici residenziali; il 25% diventa prosumer e scambia energia con il 75% degli altri consumatori

- Scenari futuri che sfruttano il solare, l'energia eolica e la biomassa: **S6.1** si utilizzano tutte le FER e **S6.2** si utilizza il 50% del solare e il 100% delle altre FER disponibili.

Nell'individuazione delle risorse rinnovabili disponibili per gli scenari futuri è stata valutata la disponibilità di irradiazione solare, vento e biomassa agricola, forestale e da rifiuti. In Figura 3 è stata rappresentata la distribuzione delle risorse utilizzate nelle analisi.

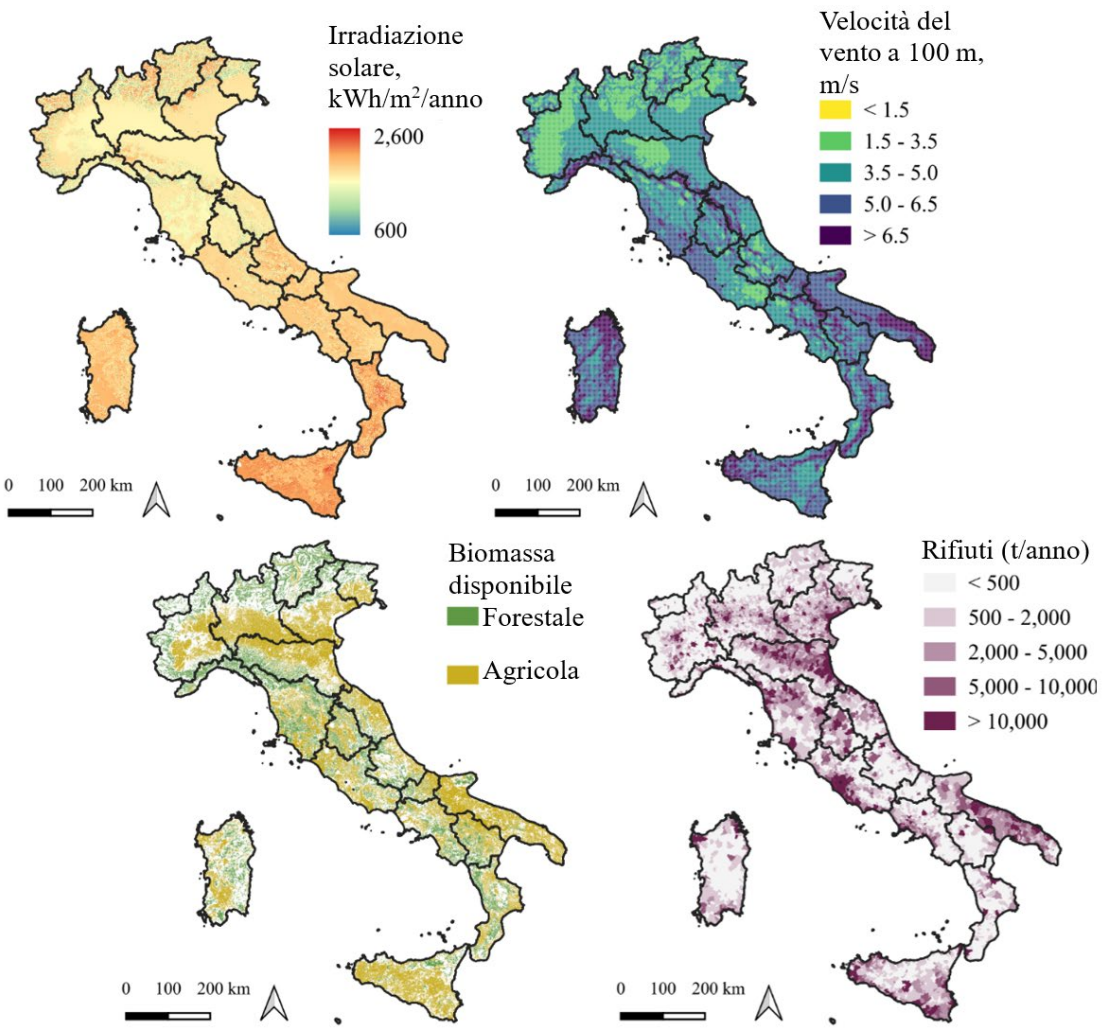
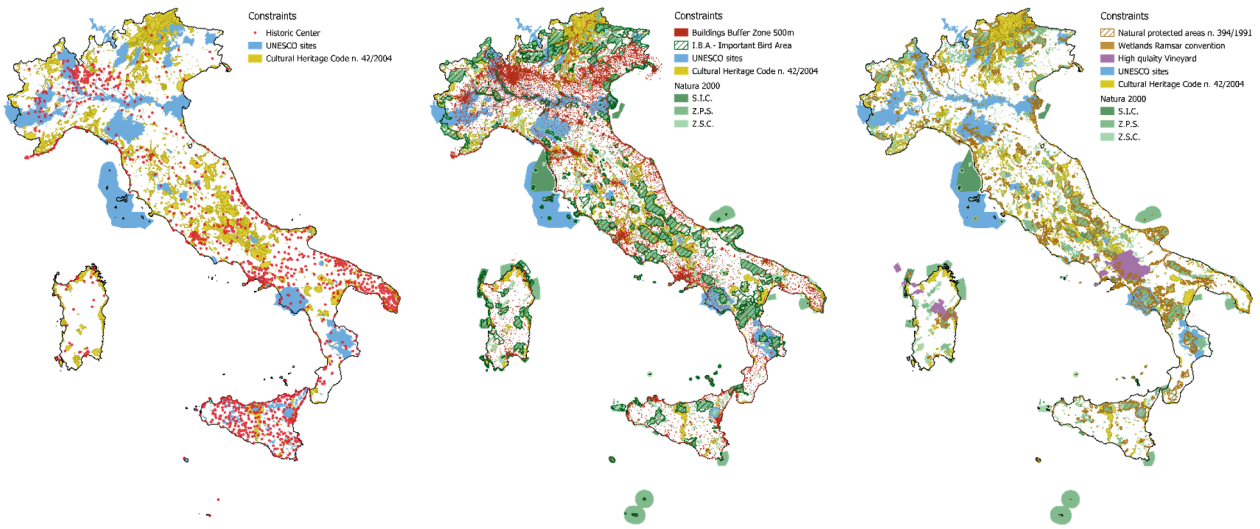


Figura 3 – Distribuzione spaziale delle risorse energetiche rinnovabili disponibili



Impianti solari

Impianti eolici

Impianti a biomassa

Figura 4 – Vincoli utilizzati per le fonti rinnovabili

Per le analisi sui futuri scenari sono stati considerati anche i vincoli legislativi (e s.m.i.) tra cui:

- per gli impianti solari integrati: la Legge 1089/1939 che tutela le cose, immobili e mobili, che presentano interesse artistico, storico, archeologico o etnografico (inclusi i siti UNESCO) e il D. Lgs 42/2004 sul codice dei beni culturali e del paesaggio;
- per gli impianti eolici: il D. Lgs 42/2004 sul codice dei beni culturali e del paesaggio, il D. Lgs 387/2003 sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da FER, il D. M. 10/9/2010 per l'autorizzazione degli impianti alimentati da FER e il D. M. 252/2023 sulla biodiversità;
- per gli impianti a biomassa: la Legge sulle aree protette 394/1991, il D. del 25 marzo 2005 con le Zone di Protezione Speciale e il D. Lgs 155/2010 che tutela la qualità dell'aria.

Per la valutazione dei risultati sono stati utilizzati gli indicatori e indici energetici, economici, sociali e ambientali descritti nella Tabella 3. Tutti gli indicatori sono stati calcolati su base oraria per i giorni tipici mensili e i risultati sono poi stati aggregati per calcolare gli indici giornalieri, mensili e annuali su scala comunale, provinciale e regionale.

Tabella 3 – Indici e indicatori utilizzati per valutare gli scenari attuali e futuri

Tipologia di indicatore/indice	Indicatore/indice	Descrizione	Unità
Energetico	C	Consumo per settore	kWh
	P_attuale	Produzione attuale per FER	kWh
	P_futura	Produzione futura per FER	kWh
	SC (self-consumption)	Auto-consumo, minimo (C; P)	kWh
	OP (over-production)	Extra-produzione	kWh
	UD (uncovered demand)	Domanda non coperta dalla produzione da FER	kWh
	cSC (collective self-consumption)	Extra-produzione scambiata con altri utenti o autoconsumo collettivo	kWh
	SCI (self-consumption index)	Indice di autoconsumo SC/P	%
	SSI (self-sufficiency index)	Indice di auto-sufficienza SC/C	%
	OPI (over-production index)	Indice di extra-produzione OP/P	%
Economico	Prezzo dell'energia	Prezzo dell'energia per kWh prelevato	€/kWh
	Ricavo per SC	Incentivo per l'auto-consumo	€/kWh
	Ricavo per OP	Incentivo per immissione dell'energia in rete	€/kWh
	CAPEX (capital expenditure)	Spesa per acquistare, installare e mantenere un impianto da FER	€
	PBT (payback time)	Tempo di ritorno di un investimento	anni
Sociale	LIHC (low income-high cost)	% di popolazione in condizioni di povertà energetica*	%
	CERusers_%	% di membri di una comunità che partecipano alla CER	%
	CER_vulnerable-users_%	% di famiglie disagiate che partecipano alla CER	%
Ambientale	GHG greenhouse gas emissions	Tonnellate di $CO_{2,eq}$	kg o t di $CO_{2,eq}$
	variazione di GHG emissions	emissioni di gas climalteranti rispetto allo scenario attuale	-

*Impossibilità per una famiglia di accedere a servizi energetici essenziali che forniscono livelli basilari e standard dignitosi di vita e salute, compresa un'erogazione adeguata di riscaldamento, acqua calda, raffrescamento, illuminazione ed energia per alimentare gli apparecchi, nel rispettivo contesto nazionale, della politica sociale esistente a livello nazionale e delle altre politiche nazionali pertinenti, a causa di una combinazione di fattori, tra cui almeno l'inaccessibilità economica, un reddito disponibile insufficiente, spese elevate per l'energia e la scarsa efficienza energetica delle abitazioni (https://documenti.camera.it/leg19/dossier/pdf/AP0151.pdf).

I risultati ottenuti sono stati calcolati per ogni comune italiano e sintetizzati nella Tabella 4 raggruppati per area geografica. Si può osservare che, partendo da un'auto-sufficienza SSI attuale media italiana del 13% e sfruttando tutte le FER disponibili, si può raggiungere il 54% nello scenario 6 in cui si produce energia dalle risorse solari, eoliche e di biomassa ancora disponibili. Sfruttando anche lo scambio di energia delle comunità energetiche rinnovabili (con gli scenari 4 e 5) l'auto-sufficienza aumenta in modo significativo soprattutto considerando diversi utenti come nello scenario 4. Con gli scenari solare S1.2, eolico 2.2 e biomassa 3.2 si

può osservare come i valori di auto-sufficienza siano maggiori al Sud e sule isole. Con le CER, scenari S4 e S5, con lo scambio di energia, i risultati diventano più omogenei.

Tabella 4 – Risultati di produzione, consumo, auto-consumo e auto-sufficienza degli scenari analizzati

	Zona	P [GWh]	C [GWh]	SC [GWh]	SCI [-]	SSI [-]	GHG [-]
S0	Nord	43,899	164,218	19,584	0.45	0.12	1.00
	Centro-Nord	8,759	24,058	2,793	0.32	0.12	1.00
	Centro-Sud	11,031	47,087	4,773	0.43	0.10	1.00
	Sud	13,268	19,453	5,296	0.40	0.27	1.00
	Calabria	3,975	4,856	932	0.23	0.19	1.00
	Sicilia	4,838	17,044	2,404	0.50	0.14	1.00
	Sardegna	4,547	7,944	1,523	0.33	0.19	1.00
S1.2	Nord	146,243	164,218	61,651	0.42	0.38	0.71
	Centro-Nord	21,818	24,058	9,052	0.41	0.38	0.71
	Centro-Sud	48,099	47,087	17,275	0.36	0.37	0.70
	Sud	21,666	19,453	8,633	0.40	0.44	0.76
	Calabria	11,008	4,856	2,425	0.22	0.50	0.62
	Sicilia	31,544	17,044	7,755	0.25	0.45	0.63
	Sardegna	10,677	7,944	3,391	0.32	0.43	0.71
S2.2	Nord	66,029	164,218	25,964	0.39	0.16	0.96
	Centro-Nord	56,487	24,058	8,733	0.15	0.36	0.72
	Centro-Sud	83,008	47,087	14,150	0.17	0.30	0.78
	Sud	120,696	19,453	13,699	0.11	0.70	0.41
	Calabria	38,579	4,856	3,189	0.08	0.66	0.42
	Sicilia	135,097	17,044	8,611	0.06	0.51	0.58
	Sardegna	105,019	7,944	5,024	0.05	0.63	0.45
S3.2	Nord	49,490	164,218	24,018	0.49	0.15	0.97
	Centro-Nord	10,565	24,058	4,256	0.40	0.18	0.93
	Centro-Sud	13,297	47,087	6,768	0.51	0.14	0.95
	Sud	15,278	19,453	6,499	0.43	0.33	0.92
	Calabria	4,588	4,856	1,450	0.32	0.30	0.87
	Sicilia	5,992	17,044	3,307	0.55	0.19	0.94
	Sardegna	4,957	7,944	1,869	0.38	0.24	0.95
S4	Nord	117,683	164,218	11,425	0.34	0.48	0.75
	Centro-Nord	17,272	24,058	2,235	0.38	0.53	0.70
	Centro-Sud	43,632	47,087	5,316	0.35	0.38	0.72
	Sud	13,764	19,453	1,946	0.35	0.50	0.89
	Calabria	6,961	4,856	735	0.40	0.28	0.74
	Sicilia	29,744	17,044	2,474	0.43	0.24	0.67
	Sardegna	8,517	7,944	1,006	0.40	0.38	0.74
S5	Nord	29,421	30,123	2,856	0.29	0.30	-
	Centro-Nord	4,318	5,465	559	0.32	0.41	-
	Centro-Sud	10,908	13,941	1,329	0.29	0.36	-
	Sud	3,441	4,895	487	0.31	0.44	-
	Calabria	1,740	2,004	184	0.31	0.36	-
	Sicilia	7,436	5,776	618	0.35	0.27	-
	Sardegna	2,129	2,263	251	0.36	0.39	-
S6	Nord	185,321	164,218	72,856	0.39	0.44	0.63
	Centro-Nord	75,068	24,058	15,102	0.20	0.63	0.42
	Centro-Sud	132,422	47,087	26,934	0.20	0.57	0.48
	Sud	134,099	19,453	16,116	0.12	0.83	0.24
	Calabria	47,341	4,856	4,033	0.09	0.83	0.21
	Sicilia	165,774	17,044	12,388	0.07	0.73	0.32
	Sardegna	113,251	7,944	6,039	0.05	0.76	0.30

Inoltre, in Tabella 5 gli indicatori di auto-consumo e auto-sufficienza sono anche stati riportati per le cinque città italiane più popolate: Roma, Milano, Napoli, Torino e Palermo. Le città, infatti, sono i territori più critici per la transizione energetica verso le fonti rinnovabili e la riduzione dei consumi, a causa dell'alta concentrazione di consumi e per le poche risorse rinnovabili. Si può osservare come la principale risorsa da sfruttare sia quella solare che consente di arrivare in media un SSI del 23% (S1.2); inoltre, con il solare solo sugli edifici residenziali e la condivisione dell'energia con le CER (S4) si ottimizza l'uso dell'energia solare fino al 36% di SSI per Palermo e al 35% di Roma. Infine, con lo scenario S6, rispetto allo scenario attuale, si possono ridurre le emissioni di gas climalteranti fino al 33-34% per Roma e Palermo.

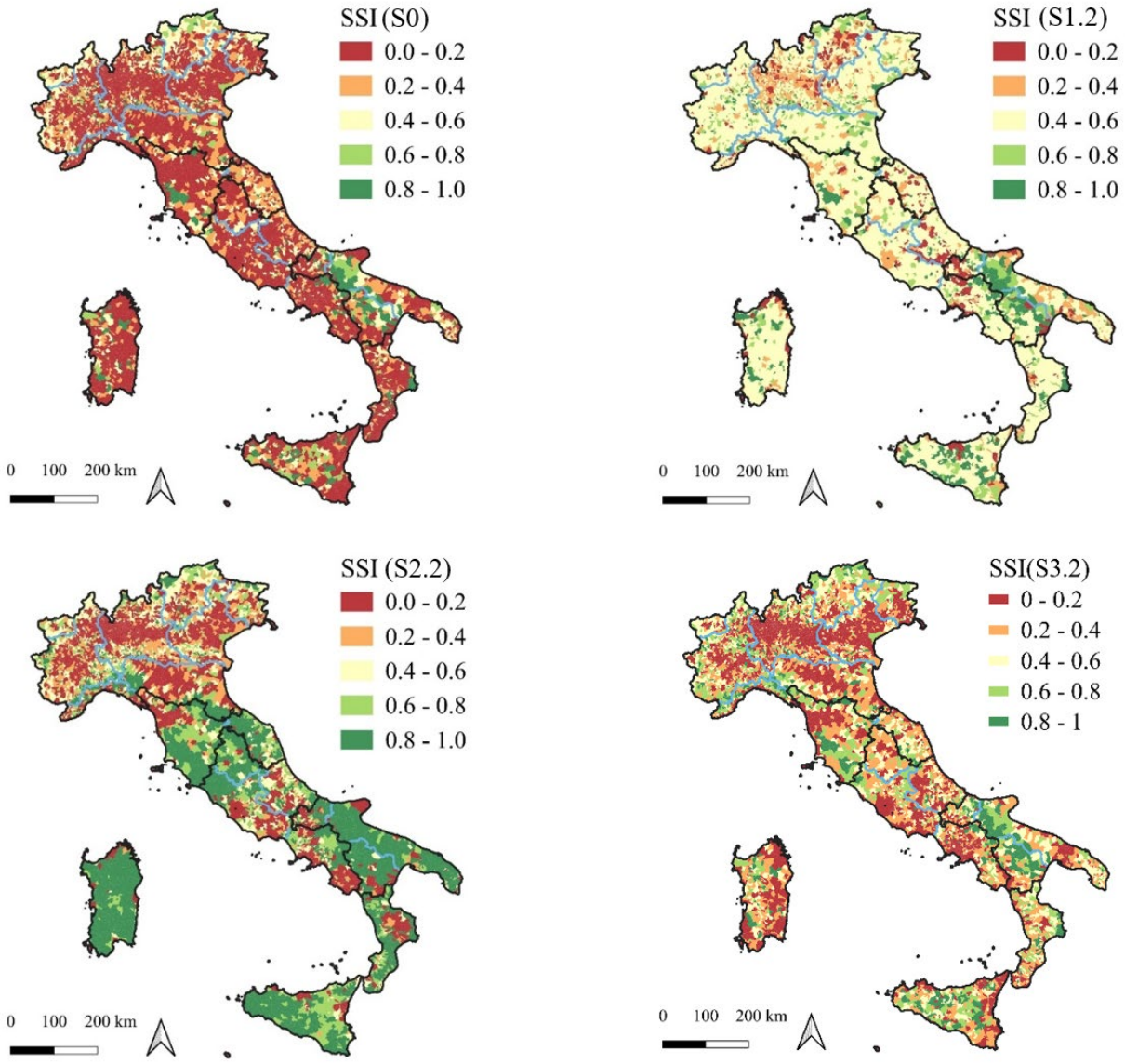
Tabella 5 - Risultati di auto-consumo e auto-sufficienza degli scenari analizzati per le grandi città italiane

	Città	**P** [GWh]	**C** [GWh]	**SC** [GWh]	**SCI** [-]	**SSI** [-]	**GHG** [-]
S0	Roma	240.31	11314.14	240.31	1.00	0.02	1.00
	Milano	33.67	8532.61	33.67	1.00	0.00	1.00
	Napoli	22.85	2914.46	22.85	1.00	0.01	1.00
	Torino	428.90	4362.80	428.90	1.00	0.10	1.00
	Palermo	76.51	1899.49	76.51	1.00	0.04	1.00
S1.2	Roma	3396.25	11314.14	3066.18	0.90	0.27	0.74
	Milano	1100.97	8532.61	925.55	0.84	0.11	0.90
	Napoli	358.59	2914.46	358.59	1.00	0.12	0.88
	Torino	1400.04	4362.80	1308.76	0.93	0.30	0.78
	Palermo	822.72	1899.49	685.01	0.83	0.36	0.67
S2.2	Roma	884.11	11314.14	884.11	1.00	0.08	0.94
	Milano	33.67	8532.61	33.67	1.00	0.00	1.00
	Napoli	22.85	2914.46	22.85	1.00	0.01	1.00
	Torino	428.90	4362.80	428.90	1.00	0.10	1.00
	Palermo	79.30	1899.49	79.30	1.00	0.04	1.00
S3.2	Roma	388.32	11314.14	388.32	1.00	0.03	0.99
	Milano	76.03	8532.61	76.03	1.00	0.01	1.00
	Napoli	43.57	2914.46	43.57	1.00	0.01	0.99
	Torino	428.90	4362.80	428.90	1.00	0.01	1.00
	Palermo	113.05	1899.49	113.05	1.00	0.02	0.98
S4	Roma	3703.35	11314.14	3276.34	0.88	0.29	0.73
	Milano	1101.89	8532.61	918.65	0.83	0.11	0.90
	Napoli	494.15	2914.46	486.36	0.98	0.17	0.84
	Torino	1101.66	4362.80	984.30	0.89	0.23	0.86
	Palermo	813.41	1899.49	660.73	0.81	0.35	0.68
S5	Roma	925.84	3133.67	304.82	0.87	0.26	
	Milano	275.47	1570.37	103.19	0.68	0.12	
	Napoli	123.54	898.68	77.90	1.00	0.14	
	Torino	275.42	872.69	70.24	0.73	0.23	
	Palermo	203.35	778.78	81.98	0.95	0.25	
S6	Roma	4572.27	11314.14	4112.33	0.90	0.36	0.65
	Milano	1156.76	8532.61	974.19	0.84	0.11	0.89
	Napoli	524.12	2914.46	516.80	0.99	0.18	0.83
	Torino	1509.29	4362.80	1388.54	0.92	0.32	0.76
	Palermo	898.71	1899.49	737.70	0.82	0.39	0.64

Per le città è necessario valutare delle aggregazioni territoriali più ampie per raggiungere valori maggiori di auto-sufficienza, come le città metropolitane. Aggregazioni di CER o di territori non vincolati alle aree sottese alle cabine primarie potrebbero far parte di Comunità Energetiche Territoriali per migliorare l'auto-sufficienza energetica.

In Figura 5 si può osservare l'effetto sull'utilizzo delle FER e l'introduzione delle CER sui comuni italiani. Con lo scenario attuale S0, l'auto-sufficienza dei comuni italiani è del 13%, con il solare si arriva al 39-42%, con l'eolico al 26-28%, con la biomassa 16-17%, con le REC 33-43% e infine con tutte le FER 71-73%. Questi dati però hanno una variabilità sui territori molto importante con delle potenzialità maggiori nelle regioni meridionali.

In Figura 6 è rappresentato l'indice di povertà energetica EP attuale (scenario S0) e futuro raggiungibile sfruttando tutte le fonti disponibili con lo scenario S6. Partendo da una povertà media dell'8.5%, con lo scenario 6 e l'auto-consumo delle fonti rinnovabili disponibili, si arriva al 4.7%. Attualmente le regioni con valori maggiori di EP sono la Calabria (EP_{S0}=16.7%) e la Puglia (EP_{S0}=16.5%); con lo scenario S6 le regioni che riescono a ridurre maggiormente la povertà energetica solo le regioni del Sud, ad eccezione di Campania (EP_{S6}=6.1%) e Lazio. Riduzioni dell'EP si possono osservare per la Lombardia, il Trentino, il Piemonte e la Valle d'Aosta.



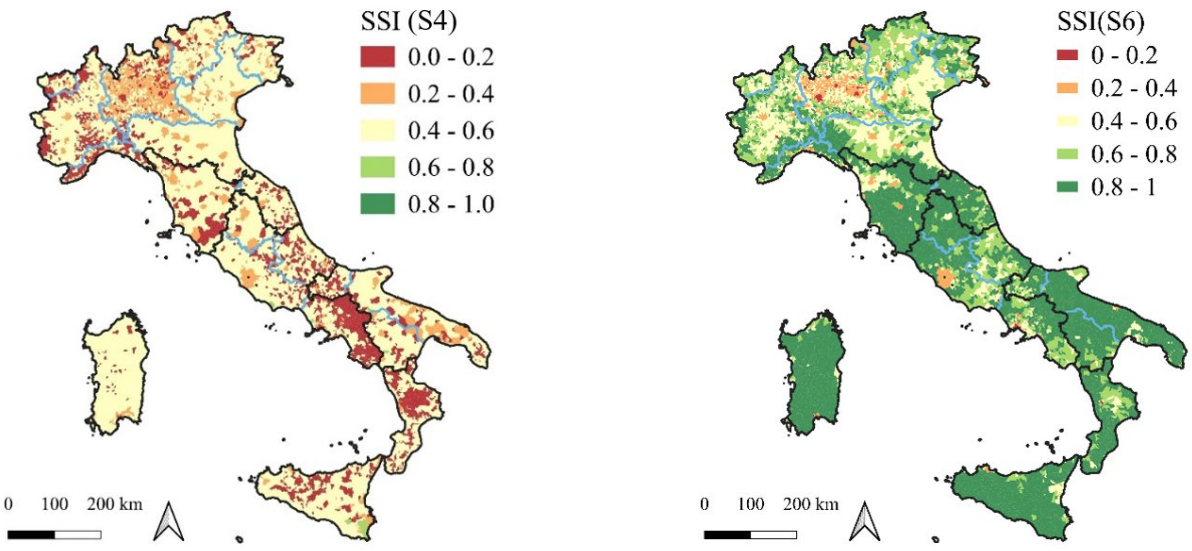


Figura 5 – Valutazione dell'indice di auto-sufficienza SSI per i comuni e per gli scenari S0, S1.2, S2.2, S3.2, S4 e S6

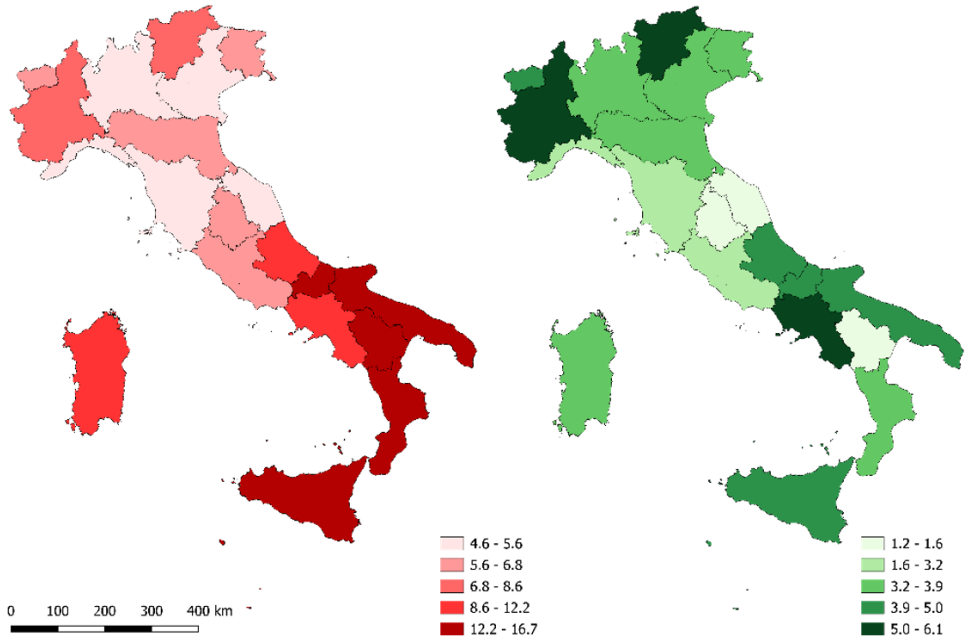


Figura 6 – La povertà energetica attuale con lo scenario S0 (in rosso) e futura con lo scenario S6 (in verde).

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state effettuate consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche risultanti dall'attività svolta:

"La pianificazione energetica del territorio e le comunità energetiche. Modelli, banche-dati, strumenti e applicazioni", G. Mutani, in Pianificazione Urbana e Territoriale dalla Lezione di Giampiero Vigliano alle Prospettive del Green New Deal - Urbanistica Dossier vol. 27, pp. 106-109, ISBN: 9788876032417, Dicembre 2022 (http://www.inuedizioni.com/it/prodotti/rivista/n-027-urbanistica-dossier).

"La Comunità energetica rinnovabile del pinerolese. Un esempio di best practice", G. Mutani, S. Santantonio, Y. Usta, S. Beltramino, H. Alsibai, M. Alehasin, E. Giraudo, in Pianificazione Urbana e Territoriale dalla Lezione di Giampiero Vigliano alle Prospettive del Green New Deal – Urbanistica Dossier vol. 27, pp. 117-119, ISBN: 9788876032417 Dicembre 2022 (http://www.inuedizioni.com/it/prodotti/rivista/n-027-urbanistica-dossier).

"Holistic Approach for Sustainable Cities and Communities: Best Practices in Living Labs ", Tundo, A., Capezzuto, P., Blaso, L., Marinucci, P., Mutani, G. (2024). In: Innovation in Urban and Regional Planning. Lecture Notes in Civil Engineering Innovation in Urban and Regional Planning, vol 467. Springer, Cham. ISBN 978-3-031-54118-6, Pages 301-312, https://doi.org/10.1007/978-3-031-54118-6_28 , https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-54118-6_28 .

"Urban Building Energy Modeling: A Comparative Study of Process-driven and Data-driven Models", A. Montazeri, Y. Usta, G. Mutani, Mathematical Modelling of Engineering Problems (MMEP), Volume 11, Number 10, 2024, https://doi.org/10.18280/mmep.111003 https://www.iieta.org/journals/mmep/paper/10.18280/mmep.111003.

"An Italian Geoportal for Renewable Energy Communities", G Mutani, V Morando, X Zhou, M Tayefinasrabad, A Tundo, Journal of Sustainability for Energy 3(4):244-264, 2024, https://doi.org/10.56578/jse030404 .

"Smart energy communities, a national framework for Italian smart sustainable cities", P Capezzuto, A Tundo, G Mutani, 1st smart cities, towns, rural and mountains villages international congress, Torino, 21 November 2024, in progress.

10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione in cui è stata presentata questa attività sono stati:

Presentazione "Strumenti e metodi GIS-based per la pianificazione energetica delle CER a scala nazionale", Seminario: comunità energetica, questa sconosciuta, **RESTRUCTURA**, 25 Novembre 2023, https://www.fondazioneperlarchitettura.it/corso/comunita-energetica-questa-sconosciuta/ .

Presentazione "Strumenti e metodi GIS-based per la pianificazione energetica nazionale delle CER ", **Planet Week del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica,** Sfida e Futuro delle Comunità Energetiche, Energy Center, Politecnico di Torino, 23 Aprile 2023, https://www.polito.it/ateneo/comunicazione-e-ufficio-stampa/appuntamenti/news?idn=22963 .

Tavola rotonda "Buildings' energy consumption models and applications" of the **7th AIGE/IIETA International Conference and 16th AIGE 2022 Conference on "Energy Conversion, Management, Recovery, Saving, Storage and Renewable Systems"** (www.aige2022.unipr.it; https://dia.unipr.it/it/notizie/8-e-9-giugno-2022-international-conference-and-16th-aige-2022-conference; https://www.aige2022.unipr.it/Conference-materials.html; https://www.aige2022.unipr.it/files/LocandinaTavolaRotondaBuildingsv31.pdf), Parma (Italy), June 8th-9th, 2022 .

Tavola rotonda e "Renewable Energy Communities" at the **9th AIGE/IIETA International Conference and 19th AIGE 2024 Conference on "Energy Conversion, Management, Recovery, Saving, Storage and Renewable Systems"**, Caserta (Italy), June 3rd-5th, 2024 (https://www.aige-iieta.it/public/index.php?node=7&nm=Home; https://www.aige-iieta.it/public/index.php?node=49&nm=Round+Tables .

Presentazione "Smart energy communities, a national framework for Italian smart sustainable cities", **1st smart cities, towns, rural and mountains villages international congress** - 21 November 2024, Lingotto Exhibition Center - Oval Pavilion – Turin, https://energia.enea.it/wp-content/uploads/2024/11/Final-Flyer_Program_Smart-city-congress_2024_11_21.pdf .

Inoltre, questo lavoro è stato presentato nell'ambito di tirocini, tesi e all'interno dei corsi del Politecnico di Torino.