

# Ricerca di Sistema elettrico



Un sistema di supporto alle decisioni GIS-based per un  
approccio sostenibile alla localizzazione degli impianti  
agrivoltaici (LA 3.7)

G. Fattoruso, R. Scorzelli, S. Rahmani, A. Annunziata, B. Murgante



## UN SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI GIS-BASED PER UN APPROCCIO SOSTENIBILE ALLA LOCALIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI AGRIVOLTAICI (LA 3.7)

R. Scorzelli<sup>2</sup>, S. Rahmani<sup>2</sup>, A. Annunziata<sup>2</sup>, B. Murgante<sup>2</sup>, G. Fattoruso<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ENEA, <sup>2</sup> Università degli Studi della Basilicata

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: 1.1 "Fotovoltaico ad alta efficienza"

Linea di attività: LA. 3.7

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: UniBas - Università degli Studi della Basilicata - Scuola di Ingegneria

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di Collaborazione: "Un sistema di supporto alle decisioni GIS-based per un approccio sostenibile alla localizzazione degli impianti agrivoltaici"

Responsabile scientifico ENEA: Grazia Fattoruso

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Beniamino Murgante

## INDICE

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Risultati attesi .....   | 4  |
| 2     | Risultati ottenuti.....  | 5  |
| 3     | Prodotti attesi .....  | 6  |
| 4     | Prodotti sviluppati .....  | 7  |
| 5     | Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....                   | 8  |
| 6     | Sintesi delle attività svolte .....                                      | 9  |
| 6.1.1 | .....  | 9  |
| 7     | Dettaglio delle attività svolte.....                                     | 10 |
| 7.1.1 | Obiettivi della LA 3.7 .....   | 10 |
| 7.1.2 | Metodologia .....  | 10 |
| 7.2.1 | Servizi Ecosistemici.....  | 11 |
| 7.2.2 | Indicatori spaziali .....  | 11 |
| 7.1.3 | Confronto degli scenari ex ante ed ex post l'installazione.....          | 14 |
| 7.1.4 | Il Caso studio .....   | 14 |
| 7.1.5 | Discussione dei risultati.....   | 17 |
| 7.1.6 | Riferimenti bibliografici .....  | 18 |
| 8     | Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte..... | 20 |
| 9     | Pubblicazioni scientifiche .....   | 21 |
| 10    | Eventi di disseminazione .....   | 22 |

## INDICE DELLE FIGURE

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Flow chart della metodologia.....  | 10 |
| Figura 2 - Variazione della percezione dell'altezza e delle dimensioni di un oggetto..... | 13 |
| Figura 3 - Mappa delle variazioni del degrado degli habitat.....                          | 15 |
| Figura 4 - Mappa delle variazioni della qualità degli habitat.....                        | 15 |
| Figura 5 - Mappa della variazione dell'abbondanza dell'impollinazione.....                | 16 |
| Figura 6 - Mappa della variazione del carbon stock.....                                   | 16 |
| Figura 7 - Mappa della variazione della produzione delle colture.....                     | 17 |

# 1 Risultati attesi

I risultati attesi di questa LA sono:

- 1) una metodologia di indagine in grado di fornire una valutazione integrata degli impatti potenziali che gli impianti agrivoltaici possono determinare sul paesaggio circostante e sui livelli di servizi ecosistemici. Questa metodologia prenderà in input la mappa (output LA3.6) dei siti idonei all'installazione di impianti agrivoltaici generata sulla base di un insieme ben definito di criteri che ottimizzano sia la produzione agricola che quella energetica. Rilevati gli impatti derivanti dagli impianti agrivoltaici secondo un framework basato su servizi ecosistemici e sulla visibilità, questi possono essere considerati all'interno di un modello integrato più ampio capace di stimare le prestazioni sia tecniche che socio-economiche ed ambientali dei sistemi agrivoltaici.
- 2) Definizione e implementazioni di indicatori spaziali (es. indice di frammentazione, indice di visibilità etc.) che quantifichino gli impatti sul paesaggio, da quelli relativi alla visibilità degli impianti agriPV a quelli relativi ai servizi ecosistemici.
- 3) Mappatura dei servizi ecosistemici prima e dopo la potenziale localizzazione degli impianti agrivoltaici. Per ogni singolo scenario verrà prodotta una mappa spaziale multicriterio degli impatti territoriali conseguenti. Il risultato sono delle mappe di site suitability riguardanti la localizzazione ottimale degli impianti agrivoltaici risultante dal trade-off tra massimizzazione della produzione agricola-energetica e minimizzazione dell'impatto sul paesaggio.
- 4) Un sistema di monitoraggio territoriale basato sul GIS per un approccio sostenibile alla localizzazione degli impianti agrivoltaici che implementi la metodologia e il caso studio (che sarà identificato nel corso delle attività sulla base della disponibilità dei dati). I risultati delle attività saranno discussi in un report tecnico-scientifico.

## 2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti nell'ambito della LA 3.7 sono pienamente in linea con quanto atteso. In particolare:

1. è stata sviluppata e implementata una metodologia integrata per la valutazione degli impatti potenziali degli impianti agrivoltaici, che prende in input la mappa dei siti idonei (output LA 3.6) e consente un'analisi spaziale degli effetti sull'ambiente, sul paesaggio e sui servizi ecosistemici. Tale metodologia ha permesso di stimare le performance complessive dei sistemi agrivoltaici, inclusi aspetti tecnici, socio-economici e ambientali.
2. Sono stati definiti e applicati indicatori spaziali coerenti con quelli attesi (es. indice di frammentazione, indice di visibilità), in grado di quantificare in maniera oggettiva e comparabile gli impatti sul paesaggio e sui servizi ecosistemici.
3. È stata realizzata la mappatura dei Servizi Ecosistemici pre e post localizzazione degli impianti, con la produzione di mappe spaziali multicriterio che supportano la valutazione del trade-off tra produzione agricola-energetica e impatti territoriali. I risultati evidenziano come le strategie di mitigazione possano efficacemente ridurre gli impatti sulle aree più sensibili.
4. È stato sviluppato un sistema di monitoraggio territoriale basato su GIS, che integra la metodologia proposta e i risultati delle analisi in un modello decisionale utile alla pianificazione sostenibile. L'applicazione della metodologia a un caso studio in Basilicata ha confermato la validità e la trasferibilità dell'approccio.

### 3 Prodotti attesi

Report tecnico-scientifico: "Un sistema di supporto alle decisioni GIS-based per un approccio sostenibile alla localizzazione degli impianti agrivoltaici".

## 4 Prodotti sviluppati

Report tecnico-scientifico: "Un sistema di supporto alle decisioni GIS-based per un approccio sostenibile alla localizzazione degli impianti agrivoltaici".

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si sono verificati scostamenti o criticità rispetto agli aspetti tecnico-scientifici del progetto. Tutte le attività previste, sia quelle relative allo sviluppo e alla definizione della metodologia di ricerca, sia quelle concernenti l'analisi e l'interpretazione dei risultati ottenuti, sono state portate avanti in linea con quanto stabilito nel programma iniziale. Il lavoro si è svolto in modo coerente e puntuale, rispettando sia le tempistiche previste che gli standard qualitativi attesi, confermando così la solidità del percorso progettuale e la validità dell'impostazione scientifica adottata.

Da un punto di vista economico, durante lo svolgimento del progetto si sono registrati alcuni lievi scostamenti rispetto alla previsione iniziale, che tuttavia non hanno in alcun modo compromesso né rallentato l'andamento complessivo delle attività né tantomeno la qualità dei risultati conseguiti. In particolare, nel corso della fase di sviluppo ci siamo resi conto che il nostro gruppo di ricerca possedeva tutte le competenze e le risorse necessarie per portare a termine l'intero lavoro in maniera autonoma. Questo ha reso superfluo il ricorso a consulenze esterne, originariamente ipotizzate nella pianificazione economica iniziale. Tale scelta, oltre ad aver comportato una razionalizzazione dei costi, ha consentito di mantenere un controllo diretto su tutte le fasi del progetto, senza alcuna ripercussione sulla qualità, la coerenza e la completezza dei risultati finali.

## 6 Sintesi delle attività svolte

### 6.1.1

Le attività si sono concentrate sullo sviluppo e sull'applicazione di un approccio decisionale integrato per la pianificazione sostenibile degli impianti agrivoltaici, con l'obiettivo di ottimizzarne la localizzazione, valutando impatti ambientali e paesaggistici. La metodologia analizza le trasformazioni territoriali utilizzando mappe di idoneità su scala locale e regionale (output LA 3.6), basate su criteri che ottimizzano la produzione agricola ed energetica. Simulazioni nella regione Basilicata hanno valutato scenari alternativi e quantificato i Servizi Ecosistemici prima e dopo l'installazione. Lo studio impiega strumenti come InVEST per modellare indicatori chiave, tra cui l'indice di frammentazione e l'analisi della visibilità, misurando gli impatti territoriali e supportando decisioni sostenibili. Il sistema fornisce una pianificazione multidimensionale che integra le esigenze energetiche globali con valori locali, offrendo strumenti replicabili per altre applicazioni fotovoltaiche.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1.1 Obiettivi della LA 3.7

Nell'ambito della Linea di Attività (LA) 3.7, in accordo con gli obiettivi previsti, è stata sviluppata una metodologia integrata per valutare gli impatti dei sistemi agrivoltaici sul paesaggio e sui Servizi Ecosistemici (SE), garantendo un equilibrio tra produzione agricola ed energetica. Lo studio descritto in questo paragrafo si articola nella presentazione della metodologia, che prevede un'analisi dettagliata degli impatti dei sistemi agrivoltaici sui SE, esaminando qualità dell'habitat, stock di carbonio, impollinazione e produzione agricola attraverso il modello InVEST. Inoltre, vengono illustrati indicatori spaziali, come lo Sprinkling Index e l'analisi della visibilità, per valutare la frammentazione del paesaggio e l'impatto visivo. Infine, il confronto tra scenari ex ante ed ex post all'installazione, insieme all'analisi di un caso studio in Basilicata, offre una valutazione concreta delle variazioni nei SE, fornendo strumenti utili per una pianificazione agrivoltaica sostenibile.

### 7.1.2 Metodologia

In linea con l'obiettivo della LA 3.7, la metodologia sviluppata (Figura 1) integra l'analisi degli impatti dei sistemi agrivoltaici sul paesaggio e sui Servizi Ecosistemici (SE). Basata sulla mappa dei siti idonei (LA 3.6), ottimizza la produzione agricola ed energetica e utilizza un framework SE per stimare le performance tecniche e ambientali.

L'elaborazione impiega strumenti come InVEST [1], che modella i SE in relazione ai cambiamenti ambientali e quantifica gli effetti dell'uso del suolo e delle risorse idriche. Indicatori spaziali, tra cui lo Sprinkling Index (SPX) [2], per la dispersione degli elementi e l'analisi della visibilità, consentono il monitoraggio degli impatti. Infine, il confronto tra scenari ex ante ed ex post offre una visione globale delle trasformazioni sui SE e sulle dinamiche spaziali.

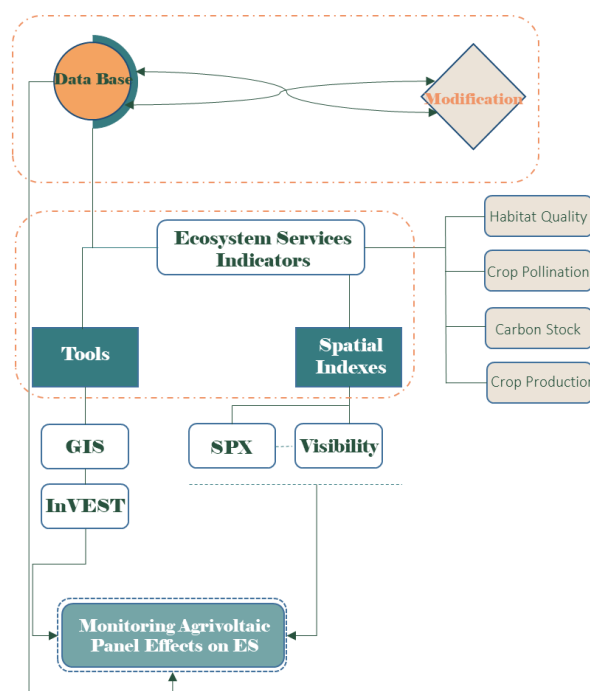


Figura 1 - Flow chart della metodologia.

### 7.2.1. Servizi Ecosistemici

L'analisi degli impatti si è concentrata sui seguenti SE: qualità dell'habitat, stock di carbonio, impollinazione e produzione delle colture.

- Qualità dell'habitat

La qualità dell'habitat è fondamentale per comprendere l'impatto ecologico dei sistemi agrivoltaici. Valutare la qualità dell'habitat aiuta, difatti, a comprendere il loro impatto sulla biodiversità e sulla salute degli ecosistemi, bilanciando produzione di energia e conservazione degli stessi. Il modello "InVEST Habitat Quality" utilizza i dati Land Use e Land Cover (LULC) e le minacce alla biodiversità per generare mappe di qualità dell'habitat.

- Stock di carbonio

I sistemi agrivoltaici combinano agricoltura e produzione solare, migliorando la sostenibilità e lo stock di carbonio. L'integrazione dei pannelli solari con le coltivazioni preserva gli habitat naturali e favorisce la crescita delle piante, aumentando lo stoccaggio del carbonio. Il software InVEST mappa le densità di carbonio sui raster LULC, considerando almeno una delle seguenti fonti: biomassa sopra e sottoterra, materia organica del suolo e morta.

- Impollinazione delle colture

L'impollinazione è fondamentale per i sistemi agrivoltaici, influenzando produttività agricola ed ecosistemi. Api, farfalle e altri insetti migliorano resa e qualità dei raccolti, ma gli impianti agrivoltaici possono modificarne gli habitat. L'uso di piante favorevoli e una gestione ottimale del suolo possono rafforzare la biodiversità e la sostenibilità agroalimentare.

Il modello InVEST viene utilizzato per valutare l'impollinazione nelle installazioni agrivoltaiche, analizzando cambiamenti d'uso del suolo, miglioramento degli habitat e benefici economici. L'obiettivo è integrare vegetazione adatta, favorire la coesistenza con gli impollinatori e promuovere politiche di conservazione in sinergia con lo sviluppo delle energie rinnovabili.

- Produzione delle colture

L'effetto di ombreggiatura e la moderazione della temperatura forniti dai sistemi agrivoltaici possono aumentare la produttività delle colture. Per monitorare la resa dopo l'implementazione agrivoltaica, utilizziamo il modello "InVEST Crop Production" [3], che permette di analizzare costi e benefici della produzione agricola. Il modello copre 175 colture a livello globale. Il modello "InVEST Crop Production Percentile" stima la resa delle 175 colture basandosi su dati esistenti, percentili di produzione e rendimenti osservati, utilizzando dataset FAO e subnazionali [4] espressi in tonnellate per ettaro.

### 7.2.2 Indicatori spaziali

Per valutare l'impatto degli impianti agrivoltaici sul paesaggio e sui servizi ecosistemici, sono stati utilizzati due indicatori spaziali: l'**Indice di Frammentazione (SPX)** e l'**Indice di Visibilità**.

- Indice di Frammentazione (SPX)

Lo SPX [2] è stato calcolato spazialmente mediante la seguente formula:

$$SPX = \frac{\sum \sqrt{(x_i - x^*)^2 + (y_i - y^*)^2}}{R}$$

dove  $x_i$  e  $y_i$  sono le coordinate del centro di ciascun poligono dei campi agrivoltaici presenti in ogni cella della griglia di 1 km<sup>2</sup>;  $x^*$  e  $y^*$  sono le coordinate del centroide del nucleo maggiore presente in ogni cella.  $R$  è il raggio dell'area circolare di dimensioni simili a quelle della somma delle aree degli impianti agrivoltaici presenti per ogni cella. Per calcolare lo SPX, basato sulla distanza euclidea, è necessario definire unità spaziali ridotte per ottenere risultati significativi su scala regionale. L'analisi è stata condotta su una griglia di 1 km<sup>2</sup>, considerando l'identità di ogni cella. Per valutare l'impatto degli impianti agrivoltaici sulla copertura del suolo, è stato applicato un buffer di 25 metri. Inoltre, sono stati analizzati gli aggregati degli impianti solari in diversi intervalli temporali: prima, durante e dopo l'installazione, con una soglia di aggregazione di 250 metri per rappresentare al meglio il fenomeno di concentrazione degli impianti.

L'SPX varia da 0 a  $+\infty$ : valori più alti indicano una maggiore frammentazione territoriale, mentre un valore pari a zero può significare la presenza di un unico aggregato molto piccolo o un impianto compatto che occupa esattamente 1 km<sup>2</sup>. Per interpretare correttamente i dati, i risultati dell'SPX sono stati correlati all'area occupata dagli impianti in ogni cella, classificandoli in sei categorie per valutare il livello di frammentazione del paesaggio energetico.

- Indice di visibilità

Tra gli aspetti chiave da considerare nell'implementazione degli impianti agrivoltaici vi è il loro impatto estetico sull'area circostante, in particolare rispetto il paesaggio [5] e soprattutto a scala locale. A tal fine lo strumento GIS open-source quantifica l'impatto visivo dei campi agrivoltaici. La metodologia implementata si basa su studi già sviluppati per valutare l'installazione di pannelli solari e turbine eoliche [6, 7]. Tale metodologia si basa sui concetti di: (i) analisi della visibilità [8] e magnitudine visiva [9], (ii) percezione dell'occhio umano e del suo campo visivo; (iii) geometria descrittiva.

I fattori chiave per il calcolo dell'indice di visibilità includono il campo visivo umano (FOV), la forma e le dimensioni percepite di un oggetto e l'indice di impatto visivo.

Il campo visivo umano è la regione visibile definita da angoli specifici:

- Naso: 85° orizzontalmente rispetto al naso.
- Superiore: 65° verso l'alto.
- Inferiore: 70° verso il basso.

Questi angoli delimitano il FOV statico visto da almeno un occhio. Considerando la possibilità di muovere lo sguardo, emergono due tipi di FOV dinamico:

- 1 FOV cilindrico: l'osservatore ruota orizzontalmente di 360°, creando un'area laterale cilindrica.
- 2 FOV sferico: include anche il movimento verticale, creando un'area di visualizzazione sferica. Per i campi agrivoltaici, che hanno profili bassi e piatti, si utilizza l'approccio cilindrico per valutare l'impatto visivo.

La dimensione e la forma percepita di un oggetto possono differire dalle sue dimensioni reali in base alla distanza e all'angolo tra l'oggetto e l'osservatore. La dimensione percepita è

rappresentata come la proporzione del campo visivo occupata da un oggetto, che diventa indipendente dalla distanza tra l'osservatore e l'oggetto [7]

La Figura 2 mostra come le dimensioni percepite di un pannello fotovoltaico variano a seconda della posizione dell'osservatore. L'osservatore guarda un campo agrivoltaico con una lunghezza reale ( $L$ ) e una larghezza reale ( $W$ ). L'osservatore è posizionato a un angolo obliquo ( $\alpha$ ) e a una distanza ( $p$ ) dal pannello.

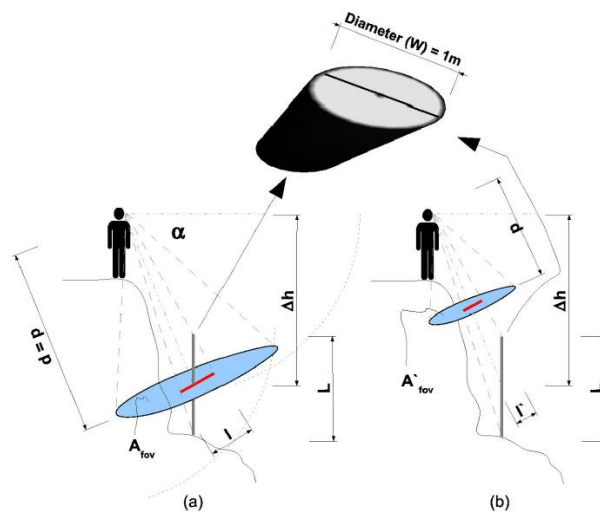


Figura 2 - Variazione della percezione dell'altezza e delle dimensioni di un oggetto.

In questo caso: il piano proiettivo ( $A_{fov}$ ) è centrato sul pannello solare a una distanza  $d$  e l'area percepita del pannello agrivoltaico ( $la$ ) è calcolata come il prodotto della lunghezza percepita ( $l$ ) e della larghezza percepita ( $w$ ). I fattori che influenzano l'area percepita sono:

1. **Angolo ( $\alpha$ ):** maggiore è l'angolo tra l'osservatore e il pannello solare, minore sarà la lunghezza percepita ( $l$ ) e, di conseguenza, minore sarà l'area percepita.
2. **Distanza ( $p$ ):** più lontano è l'osservatore dal centro del sito agrivoltaico, minore apparirà il pannello rispetto al campo visivo (FOV). Questo è espresso dal rapporto  $la/A_{fov}$ .

Usando questo esempio, un pannello agrivoltaico osservato da angoli e distanze diverse può sembrare distorto nelle sue dimensioni. Ad esempio, quando viene visto frontalmente ( $\alpha = 0^\circ$ ), sono visibili tutte le dimensioni del pannello ( $l$  e  $w$ ). Tuttavia, con angoli ripidi o distanze maggiori, il pannello appare più piccolo e meno prominente nel campo visivo dell'osservatore.

Sulla base di questi processi matematici [7] è stato calcolato l'Indice di Impatto Visivo (NI) definendo quantitativamente l'Indice di Impatto Visivo Non Dimensionale (NI) come il rapporto tra le due aree:

$$NI = A_{obj} / A_{fov}$$

dove  $A_{obj}$  è l'area percepita dell'elemento,  $A_{fov}$  è l'area del campo visivo scelto (fisso, cilindrico o sferico).

Inoltre, per facilitare la visualizzazione spaziale dell'indice proposto, è stato sviluppato un plugin per **GRASS GIS** [10]. Questo plugin calcola l'indice di impatto visivo (NI-index) per ciascuna cella di una mappa raster nell'area circostante una o più installazioni di energie rinnovabili. Gli input richiesti per l'analisi includono:

- **Modello Digitale di Elevazione (DEM)** per fornire informazioni topografiche.
- **Mappa vettoriale** con la posizione dei centri degli impianti agrivoltaici.
- **Dimensioni e inclinazione** delle strutture per tener conto delle loro caratteristiche strutturali.
- **Parametri di distanza** per definire la zona di analisi per valutare l'impatto o la visibilità.

L'output principale dello strumento è un raster in cui i valori delle celle rappresentano il valore dell'Indice di Impatto Visivo non dimensionale (NI).

### 7.1.3 Confronto degli scenari ex ante ed ex post l'installazione

I SE vengono valutati in diversi intervalli temporali, confrontando l'ultimo anno considerato con il periodo precedente all'installazione dei sistemi agrivoltaici. I risultati vengono aggregati spazialmente tramite un'Analisi Spaziale Multicriteriale [11] che assegna priorità diverse a seconda dello scenario analizzato. Gli scenari (analizzati nel caso studio) sono i seguenti:

- Scenario 1: un focus sulla biodiversità, per favorire la qualità degli habitat, la conservazione della biodiversità e il ripristino delle aree degradate.
- Scenario 2: un focus sul carbonio che mira a ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> e la perdita di stock di carbonio, migliorando la capacità di sequestro del carbonio.
- Scenario 3: un focus sull'agricoltura, per ottimizzare la produttività agricola con pratiche sostenibili, garantendo la salute del suolo e la resa a lungo termine.

### 7.1.4 Il Caso studio

Lo studio, condotto in Basilicata, ha analizzato le variazioni nei Servizi Ecosistemici (SE) prima e dopo l'installazione di impianti agrivoltaici, in un'area con elevato potenziale per le energie rinnovabili. La qualità dell'habitat, indicatore di biodiversità, è stata valutata con il modello "InVEST Habitat Quality", che genera mappe di qualità e degrado degli habitat. Il degrado è stato classificato in quattro livelli (assenza di habitat, basso, medio e alto degrado) e analizzato attraverso mappe tematiche (Figure 3 e 4). La prima mostra il degrado degli habitat con tonalità più scure per le variazioni negative più intense, mentre la seconda evidenzia la qualità dell'habitat, rivelando una correlazione tra degrado e perdita di qualità. L'analisi indica un minimo aumento delle aree non-habitat, ma una trasformazione significativa delle zone a basso degrado in classi di medio e alto degrado. Questo sottolinea l'importanza di valutare gli impatti degli impianti rinnovabili su scala territoriale, oltre ai singoli siti di installazione.

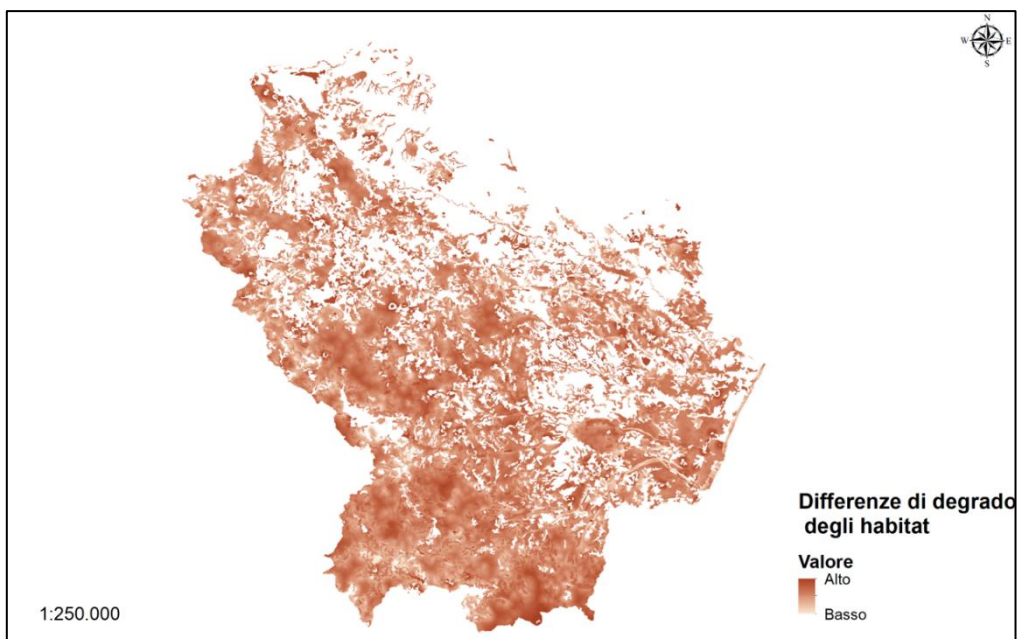


Figura 3 - Mappa delle variazioni del degrado degli habitat.

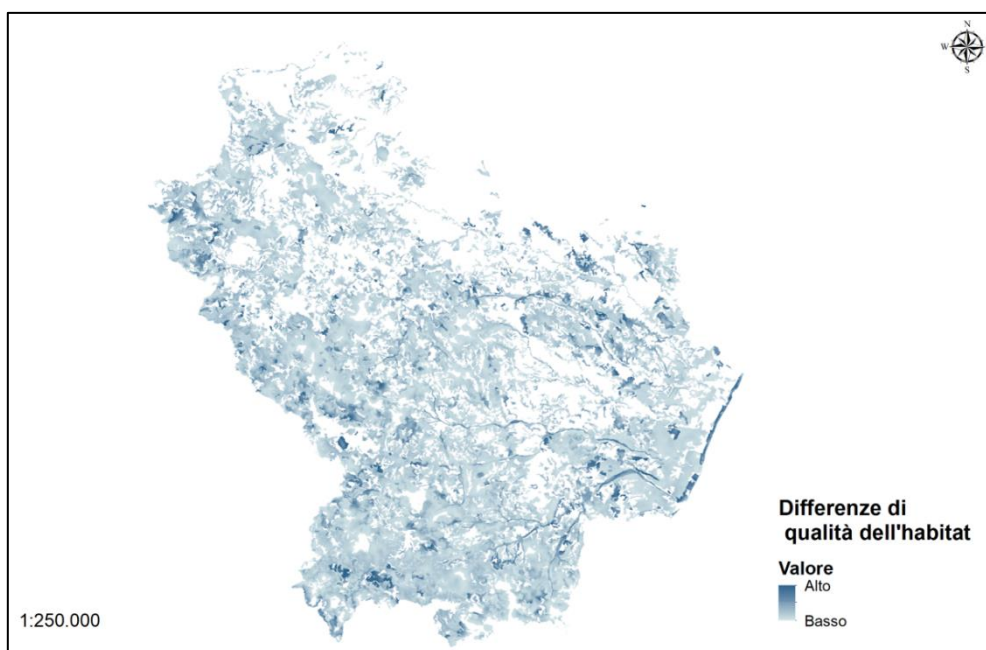


Figura 4 - Mappa delle variazioni della qualità degli habitat.

La mappa (Figura 5) che rappresenta l'impollinazione delle colture mostra che nella maggior parte dell'area il cambiamento dell'impollinazione è moderato, ma ci sono alcune aree che mostrano cambiamenti elevati dopo l'implementazione delle fonti energetiche rinnovabili in questi anni.

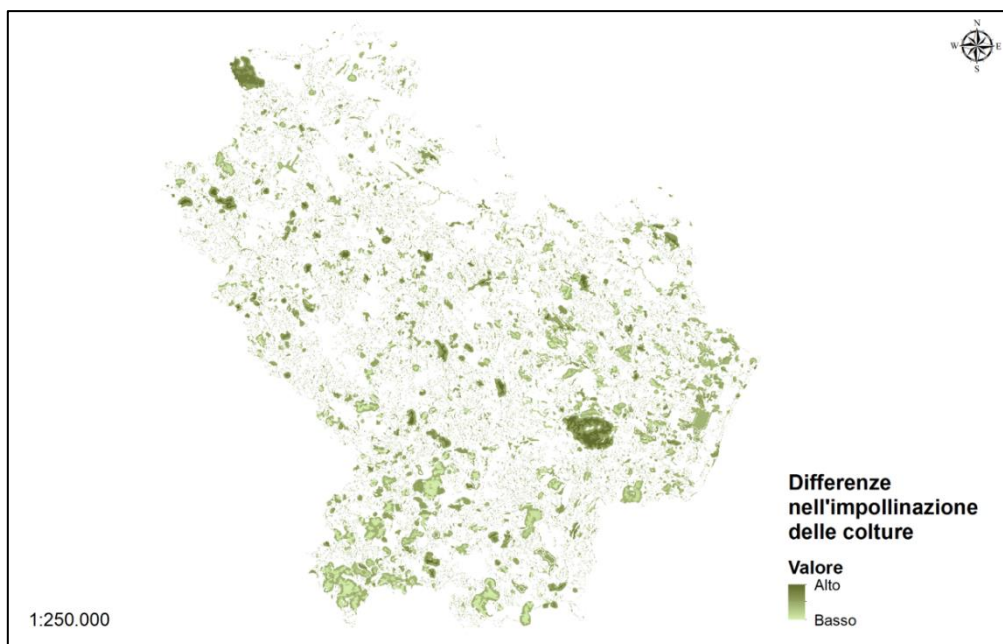


Figura 5 - Mappa della variazione dell'abbondanza dell'impollinazione.

La Figura 6 mostra la variazione della quantità di carbonio immagazzinato nel periodo dello studio. Questo valore, considerando le trasformazioni indotte dagli impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili, rimane pressoché invariato.

La Figura 7 invece mostra la differenza nella produzione agricola, con le aree in verde che rappresentano diversi livelli di variazione. Le tonalità più scure indicano differenze maggiori, mentre quelle più chiare segnalano differenze minori. La distribuzione spaziale suggerisce che i cambiamenti nella produzione agricola non sono uniformi in tutta la regione.

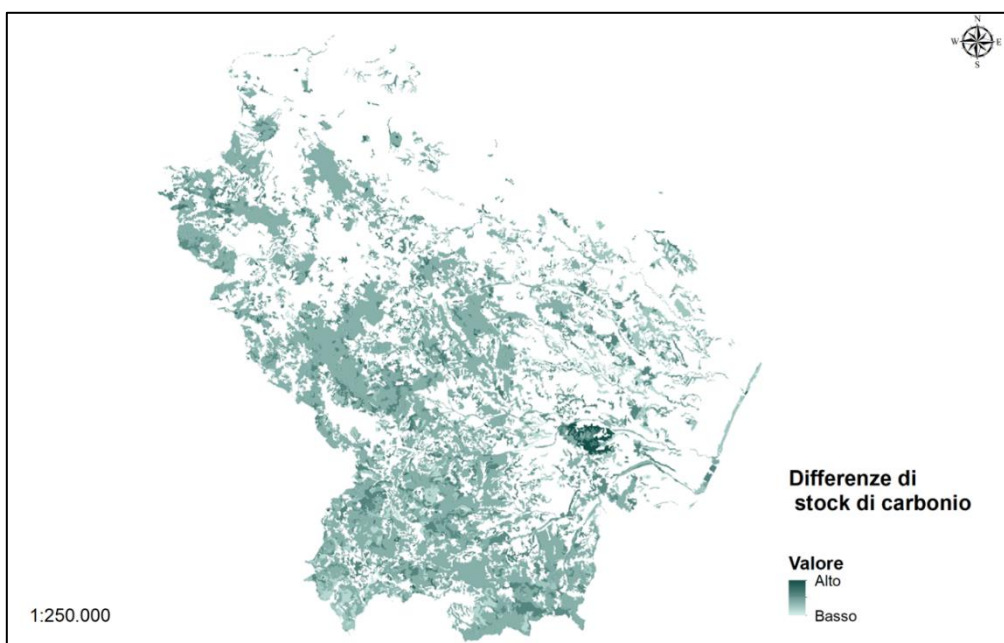


Figura 6 - Mappa della variazione del carbon stock.

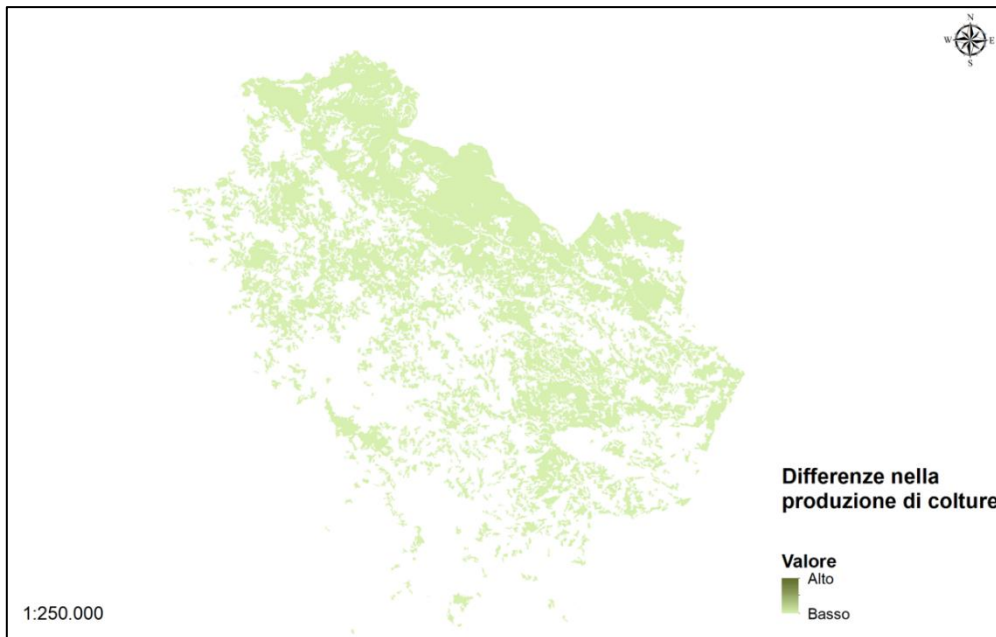


Figura 7 - Mappa della variazione della produzione delle colture.

### 7.1.5 Discussione dei risultati

L'analisi ha evidenziato che l'installazione di impianti agrivoltaici influisce sulla qualità degli habitat, con un aumento delle aree a medio e alto degrado. Tuttavia, strategie di mitigazione come fasce tampone e diversificazione colturale possono ridurre questi impatti e favorire la biodiversità. Lo stock di carbonio è rimasto pressoché invariato, confermando che la combinazione tra pannelli solari e agricoltura può preservare il sequestro del carbonio, migliorabile con interventi di riforestazione e pratiche conservative. L'impollinazione non ha subito variazioni significative, sebbene in alcune aree siano stati osservati cambiamenti legati alla frammentazione degli habitat. La piantumazione di specie mellifere e l'agricoltura sostenibile possono garantire la stabilità di questo servizio ecosistemico. La produzione agricola ha mostrato effetti variabili: in alcune zone è aumentata grazie all'ombreggiatura moderata dei pannelli, mentre in altre si è ridotta. L'uso di colture ombro tolleranti e una progettazione attenta degli impianti possono ottimizzare la resa agricola. Gli impatti paesaggistici variano in base alla posizione e alla conformazione del territorio, influenzando la percezione visiva e la connettività ecologica. Barriere vegetali e una pianificazione strategica possono ridurre l'impatto estetico. L'approccio multi-criteriale adottato ha dimostrato l'utilità degli impianti agrivoltaici nella transizione energetica, a condizione di una gestione attenta per minimizzare gli effetti sugli ecosistemi e sulle comunità. Il coinvolgimento degli stakeholder e linee guida mirate saranno fondamentali per un'integrazione sostenibile a lungo termine.

## 7.1.6 Riferimenti bibliografici

1. Posner, S., Verutes, G., Koh, I., Denu, D., Ricketts, T.: Global use of ecosystem service models. *Ecosyst Serv.* 17, 131–141 (2016). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.12.003>.
2. Romano, B., Zullo, F., Fiorini, L., Ciabò, S., Marucci, A.: Sprinkling: An approach to describe urbanization dynamics in Italy. *Sustainability (Switzerland)*. 9, (2017). <https://doi.org/10.3390/su9010097>.
3. Pilogallo, A., Scorza, F.: Regulation and Maintenance Ecosystem Services (ReMES): A Spatial Assessment in the Basilicata Region (Southern Italy). In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. pp. 703–716. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH (2021). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-87007-2\\_50](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87007-2_50).
4. Monfreda, C., Ramankutty, N., Foley, J.A.: Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochem Cycles*. 22, (2008). <https://doi.org/10.1029/2007GB002947>.
5. Wüstenhagen, R., Wolsink, M., Bürer, M.J.: Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*. 35, 2683–2691 (2007). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001>.
6. Molina-Ruiz, J., Martínez-Sánchez, M.J., Pérez-Sirvent, C., Tudela-Serrano, M.L., García Lorenzo, M.L.: Developing and applying a GIS-assisted approach to evaluate visual impact in wind farms. *Renew Energy*. 36, 1125–1132 (2011). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.041>.
7. Minelli, A., Marchesini, I., Taylor, F.E., De Rosa, P., Casagrande, L., Cenci, M.: An open source GIS tool to quantify the visual impact of wind turbines and photovoltaic panels. *Environ Impact Assess Rev.* 49, 70–78 (2014). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.07.002>.
8. Manchado, C., Otero, C., Gómez-Jáuregui, V., Arias, R., Bruschi, V., Cendrero, A.: Visibility analysis and visibility software for the optimisation of wind farm design. *Renew Energy*. 60, 388–401 (2013). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.05.026>.
9. Chamberlain, B.C., Meitner, M.J.: A route-based visibility analysis for landscape management. *Landsc Urban Plan.* 111, 13–24 (2013). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.004>.
10. Neteler, M., Bowman, M.H., Landa, M., Metz, M.: GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. *Environmental Modelling & Software*. 31, 124–130 (2012). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.014>.
11. Hill, M.J., Braaten, R., Veitch, S.M., Lees, B.G., Sharma, S.: Multi-criteria decision analysis in spatial decision support: the ASSESS analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis. *Environmental Modelling & Software*. 20, 955–976 (2005). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.04.014>.
12. Scorza, F., Pilogallo, A., Saganeiti, L., Murgante, B., Pontrandolfi, P.: Comparing the territorial performances of renewable energy sources' plants with an integrated

ecosystem services loss assessment: A case study from the Basilicata region (Italy).  
Sustain Cities Soc. 56, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102082>.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non abbiamo ritenuto necessario affidare alcuna attività in consulenza esterna, in quanto tutte le fasi della ricerca – dalla progettazione metodologica, all'analisi dei dati, fino all'elaborazione dei risultati – sono state sviluppate e portate a termine integralmente all'interno del nostro gruppo di ricerca. Questo è stato possibile grazie alla presenza di competenze multidisciplinari già consolidate nel team, che ci hanno consentito di affrontare efficacemente ogni aspetto del lavoro, garantendo al contempo continuità, coerenza e un alto livello di qualità scientifica.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Murgante, B., Rahmani, S., Scorzelli, R., Fattoruso, G., & Annunziata, A. (2024). Optimizing Agrivoltaic Integration: Spatial Analysis and AHP Assessment. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 14825 LNCS, 303–311. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-65343-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-65343-8_22)

## 10 Eventi di disseminazione

Presentazione alla 24th International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA 2024) 1- 4, Luglio 2024 presso la Thuyloi University, Hanoi, Vietnam.

Presentazione a Map Talks - Dalla Cartografia storica alla Geospatial Artificial Intelligence. Rappresentare la complessità attraverso le carte- Aula Magna Storica del Palazzo della Sapienza - Università di Pisa

Presentazione "Improving decision-making processes through the adoption of Geo-computational models for building sustainable scenarios" alla conferenza interazionale IGRSM 2024 29 - 30 Aprile 2024 Berjaya Times Square Hotel, Kuala Lumpur, Malaysia